

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REPARADAS COM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA**

FERNANDO CESAR COELHO FRANÇA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

DEZEMBRO DE 2017

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REPARADAS COM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA**

FERNANDO CESAR COELHO FRANÇA

“Tese apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, como
parte das exigências para obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Civil”.

Orientador: D. Sc. Dylmar Penteado Dias
Coorientador: D. Sc. Sergio Luis González Garcia

Campos dos Goytacazes - RJ
Dezembro de 2017

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REPARADAS COM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA**

FERNANDO CESAR COELHO FRANÇA

“Tese apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, como
parte das exigências para obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Civil”.

Aprovada em 15 de Dezembro de 2017.

Comissão examinadora:

D.Sc. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho - PUC - Rio.

D. Sc. Jonas Alexandre - UENF

D. Sc. Sergio Luis González Garcia - UENF
Coorientador

D. Sc. Dylmar Penteado Dias – UENF
Orientador

À minha mãe Genilda,
meu eterno agradecimento e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dylmar Dias, pela competente orientação e pela amizade desenvolvida ao longo dos anos da pesquisa. É uma amizade que desejo levar por toda minha vida.

Ao professor Sergio González, pela orientação em todos os ensaios, pela paciência e comprometimento, por ter me ajudado a não desistir quando tudo parecia intransponível. Sem sua ajuda, conselhos e incentivo eu não conseguiria alcançar os resultados para a finalização deste trabalho.

À minha grande amiga Elisabete Ribeiro, que é meu chão, minha fortaleza, meu socorro e minha maior incentivadora.

À Thais Rocha, que se tornou uma grande amiga. Agradeço por todo conhecimento compartilhado e pela ajuda em todas as fases deste trabalho. Tenho certeza que tudo que passamos juntos serviu para um grande crescimento pessoal.

Ao meu filho do coração Gustavo Azeredo, por ter me ajudado em todos os ensaios e por ter me ouvido e compreendido nos momentos que mais precisei.

À Kissila Goliath, pelo incentivo e companheirismo.

Ao professor e amigo Jonas Alexandre, por ter sido o primeiro a acreditar que eu seria capaz de levar este trabalho até o final e por permitir a fabricação das argamassas de reparo em seu laboratório.

À empresa Quartzolit pela doação da argamassa comercial utilizada neste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVIII
LISTA DE TABELAS	XX
LISTA DE GRÁFICOS.....	XXIII
RESUMO.....	XXVII
ABSTRACT	XXVIII
1. INTRODUÇÃO.....	29
1.1. Objetivo geral	31
1.2. Objetivos específicos.....	31
1.3. Resumo dos capítulos	32
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1. Recuperação de estruturas de concreto.....	33
2.2. Requisitos para os materiais serem utilizados em reparos de estruturas.....	34
2.2.1. Aderência	36
2.2.1.1. Mecanismos de aderência	36
2.2.1.1.1. Aderência por adesão (ligações químicas).....	37
2.2.1.1.2. Aderência mecânica	39
2.2.1.1.3. Aderência por atrito	41
2.2.1.2. Tensão de aderência	42
2.3. Materiais utilizados em reparo de estruturas de concreto	45
2.3.1. Materiais convencionais para reparo de estruturas de concreto	46
2.3.1.1. Argamassas.....	46
2.3.1.2. Grautes	47
2.3.1.3. Concretos.....	48
2.3.2. Materiais não convencionais para reparo de estruturas de concreto	48
2.3.2.1. Geopolímeros	49
2.3.2.1.1. Precursores e ativadores.....	53
2.3.2.1.2. Resistência à compressão dos geopolímeros	53
2.3.2.1.3. Trabalhabilidade dos geopolímeros.....	53

2.3.2.1.4.	Tempo de pega dos geopolímeros	54
2.3.2.1.5.	Microestrutura dos geopolímeros	54
2.3.2.1.6.	Geopolímeros e elevadas temperaturas	55
2.3.2.1.7.	Geopolímeros e aderência	55
2.4.	Ensaio experimental para determinação da aderência	58
2.4.1.	Ensaio de conformação superficial ou ensaio de tirante de concreto	58
2.4.2.	Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos	62
2.4.3.	Ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão	62
2.5.	Trabalhos anteriores sobre aderência	64
2.5.1.	Dias (2001).....	65
2.5.2.	Soares (2006)	66
2.5.3.	Mazza (2010)	69
2.5.4.	Ranjbar <i>et al.</i> (2016).....	71
2.6.	Considerações finais	74
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	76
3.1.	Materiais.....	77
3.1.1.	Areia quartzosa	77
3.1.2.	Brita 0.....	79
3.1.3.	Cimento Portland	80
3.1.4.	Água.....	82
3.1.5.	Superplastificante.....	82
3.1.6.	Barras de aço.....	83
3.1.7.	Argamassa comercial para reparo de peças de concreto	87
3.1.7.1.	Composição química	88
3.1.8.	Metacaulim ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	88
3.1.8.1.	Composição química	89
3.1.8.2.	Massa específica	90
3.1.8.3.	Difração de raios X	90
3.1.8.4.	Granulometria a laser	91
3.1.8.5.	Análises térmicas.....	92
3.1.8.6.	Microscopia eletrônica de varredura	94
3.1.9.	Silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3)	95

3.1.10. Hidróxido de potássio (KOH)	95
3.2. Métodos.....	96
3.2.1. Dimensionamento das vigas e cálculo das armaduras	96
3.3. Instrumentação dos corpos de prova	102
3.4. Dosagem do concreto de substrato.....	104
3.5. Fôrmas	105
3.6. Preparação das fôrmas para concretagem	109
3.7. Fabricação do concreto e moldagem dos corpos de prova	112
3.8. Produção da argamassa comercial	115
3.9. Dosagem das argamassas geopoliméricas.....	117
3.10. Produção das argamassas geopoliméricas.....	119
3.10.1. Produção da AGT1	120
3.10.2. Produção da AGT2	122
3.11. Ensaio mecânicos do concreto do substrato e das argamassas de reparo no estado endurecido.....	124
3.11.1. Resistência à compressão axial.....	125
3.11.2. Módulo de elasticidade longitudinal, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento	126
3.11.3. Resistência à tração por compressão diametral	128
3.11.4. Microscopia eletrônica de varredura	129
3.12. Ensaio mecânicos de aderência.....	132
3.12.1. Resistência de aderência à tração na flexão com corpos de prova mistos	132
3.12.1.1. Configurações dos corpos de prova mistos	132
3.12.1.2. Confecção dos corpos de prova mistos	134
3.12.1.3. Ensaio	135
3.12.2. Ensaio de tirantes	135
3.12.2.1. Confecção dos corpos de prova	136
3.12.2.2. Configuração dos tirantes	137
3.12.2.3. Ensaio	138
3.12.2.4. Novos corpos de prova de tirantes	140
3.12.3. Ensaio de resistência à tração na flexão e resistência de aderência ao cisalhamento na flexão em vigas	142
3.12.3.1. Confecção das vigas reconstituídas	143

3.12.3.2. Rugosidade dos substratos.....	143
3.12.3.3. Configurações das vigas.....	144
3.12.3.4. Instrumentação das vigas para o ensaio da ABNT NBR 12142 (2010) ..	146
3.12.3.5. Ensaio.....	147
3.12.3.6. Novos corpos de prova	148
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	152
4.1.Caracterização do concreto e das argamassas de reparo no estado endurecido	152
4.1.1. Concreto convencional.....	152
4.1.2. ACQT e ACQU.....	154
4.1.3. Argamassas geopoliméricas	155
4.1.4. Resumo da caracterização dos materiais e comparação dos resultados...	157
4.1.5. Consistência das argamassas	158
4.2. Corpos de prova mistos.....	159
4.3. Tirantes	163
4.4. Vigas com e sem reparo.....	166
4.4.1. Vigas das séries A, D e G	166
4.4.1.1. Carga de ruptura das vigas das séries A, D e G.....	167
4.4.1.2. Carga <i>versus</i> flecha das vigas das séries A, D e G	169
4.4.1.3.Carga <i>versus</i> deformação na zona de compressão das vigas das séries A, D e G	171
4.4.1.4.Carga <i>versus</i> deformação na zona de tração das vigas das séries A, D e G	173
4.4.1.5. Carga <i>versus</i> deformação na zona de interface substrato/reparo das vigas das séries A, D e G	174
4.4.1.6. Momento de fissuração das vigas das séries A, D e G.....	175
4.4.1.7. Modo de ruptura das vigas das séries A, D e G.....	176
4.4.2. Vigas das séries B, E e H.....	180
4.4.2.1. Carga de ruptura das vigas das séries B, E e H	180
4.4.2.2. Carga <i>versus</i> flecha para as vigas das séries B, E e H	182
4.4.2.3.Carga <i>versus</i> deformação na zona de compressão das vigas das séries B, E e H.....	184

4.4.2.4.Carga <i>versus</i> deformação na armadura de tração das vigas das séries B, E e H.....	186
4.4.2.5. Posição da linha neutra nas vigas das séries B, E e H.....	187
4.4.2.6. Momento de fissuração das vigas das séries B, E e H.....	188
4.4.2.7. Modo de ruptura das vigas das séries B, E e H.....	189
4.4.3. Vigas das séries C, F e I.....	191
4.4.3.1. Carga de ruptura das vigas das séries C, F e I.....	191
4.4.3.2. Carga <i>versus</i> flecha das vigas das séries C, F e I.....	193
4.4.3.3.Carga <i>versus</i> deformação na zona de compressão das vigas das séries C, F e I.....	195
4.4.3.4.Carga <i>versus</i> deformação na armadura de tração das vigas das séries C, F e I.....	196
4.4.3.5. Posição da linha neutra nas vigas das séries C, F e I.....	197
4.4.3.6. Momento de fissuração das vigas das séries C, F e I.....	199
4.4.3.7. Modo de ruptura das vigas das séries C, F e I.....	200
4.4.4. Resultados das vigas em serviço.....	202
4.4.5. Comparação entre as séries (E e H) e (F e I).....	203
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	205
5.1. Conclusões.....	205
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	207
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	208
ANEXO A.....	223
ANEXO B.....	225

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aderência por adesão (FUSCO, 1995).	38
Figura 2.2 - Representação esquemática dos mecanismos de aderência adesivo-substrato (COSTA, 2014).	39
Figura 2.3 - Aderência mecânica em barras de aço nervuradas (FUSCO, 1995).	40
Figura 2.4 - Rugosidade superficial de barras e fios lisos de aço (FUSCO, 1995)....	41
Figura 2.5 - Aderência por atrito (FUSCO, 1995).	41
Figura 2.6 - Diagrama esquemático da deformação do concreto ao redor da barra de aço após a formação das fissuras internas causadas por tensões principais de tração (GOTO, 1971).	42
Figura 2.7 - Surgimento da tensão de aderência (DUMÊT e PINHEIRO, 2007).	43
Figura 2.8 - Tipos de geopolímero em função da relação Si/Al (KOMNITSAS, 2007).	50
Figura 2.9 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre: a) argamassa geopolimérica (GPM) e substrato (PCC); b) argamassa comercial (RM) e substrato (PHOO-NGERNKHAM et al., 2015).	57
Figura 2.10 - MEV: (a) Aderência entre o material de reparo geopolimérico e o substrato de argamassa de cimento Portland; (b) Géis típicos dos geopolímeros (DUAN <i>et al.</i> , 2016).	58
Figura 2.11 - Esquema do corpo de prova para o ensaio de tirante, dimensões em mm (FRANÇA, 2004).	59
Figura 2.12 - Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos (ABNT NBR 12142, 2010).	62
Figura 2.13 - Configuração do corpo de prova e do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (AFNOR NF P18-851, 1992). Esquema sem escala. Dimensões em mm.	63
Figura 2.14 - Tipos de rupturas possíveis (AFNOR NF P18-851, 1992).	64
Figura 2.15 - Imagens obtidas por MEV da interface aço-pasta: a) cimento Portland; b) cimento geopolimérico (DIAS, 2001).	66
Figura 2.16 - Confecção das diferentes vigas de Ranjbar <i>et al.</i> (2016).	72
Figura 2.17 - Configuração das vigas confeccionadas por Ranjbar <i>et al.</i> (2016).	72
Figura 3.1 - Massa específica da areia obtida por picnometria.	78

Figura 3.2 - Massa específica da brita 0 obtida por picnometria.	79
Figura 3.3 - Equipamento Shimadzu EDX- 720 com tubo de 3 kW e alvo de ródio. .	82
Figura 3.4 - Ensaio de tração direta: a) barra de aço CA-60; b) barra de aço CA-25.	84
Figura 3.5 - Barras de aço após a ruptura: (a) CA-60; e (b) CA-25.....	86
Figura 3.6 - Difratorômetro de raios X da marca Shimadzu, modelo XRD-7000.	91
Figura 3.7 - Equipamento RB 3000 da empresa BP Engenharia.	93
Figura 3.8- (a) Microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu, modelo SSX- 550; (b) amostras antes da metalização; (c) amostras após metalização.	94
Figura 3.9 – Micrografias do metacaulim.	95
Figura 3.10 - Organograma do programa experimental.	96
Figura 3.11 - Sistema de reparo no banzo tracionado da viga.	97
Figura 3.12 - Planta da viga sem aço (dimensões em mm).	97
Figura 3.13 - Esquema dos apoios, das cargas concentradas e dimensões das vigas sem armadura para os ensaios de tração na flexão a quatro pontos (dimensões em mm da vista frontal).	97
Figura 3.14 - Diagramas de esforços: (a) cortante; (b) momento fletor (dimensões em metros).	98
Figura 3.15 - Detalhamento da armadura 1: barras de aço longitudinais (dimensões em mm).	99
Figura 3.16 - Detalhamento da armadura 2: barras de aço longitudinais (dimensões em mm).	100
Figura 3.17 - Detalhamento da armadura transversal utilizada nas vigas (dimensões em mm).	100
Figura 3.18 - Planta da viga (dimensões em mm).	100
Figura 3.19 - Detalhes da viga: (a) vista lateral; (b) corte A-A' (dimensões em mm).	100
Figura 3.20 - Esquema das vigas utilizadas nos ensaios de tração na flexão a quatro pontos (dimensões em mm).	101
Figura 3.21 - Armaduras prontas para uso: (a) armadura 1 com armadura de flexão CA-60; (b) armadura 2 com armadura de flexão CA-25.	101
Figura 3.22 - Extensômetros: (a) PA-06-250TG-120-L; (b) PA-06-250BA-120-L; (c) PA-06-800BA-120-L.	103

Figura 3.23 - LVDT utilizado para medição dos deslocamentos verticais nas vigas.	103
Figura 3.24 - Multímetro da marca Icel, modelo IK 1500.....	104
Figura 3.25 - Condicionador Lynx ADS 2000 de 16 bits: (a) frente; (b) traseira.	104
Figura 3.26 - Fôrma para vigas: (a) esquema com dimensões em mm; (b) fôrma pronta para uso.	106
Figura 3.27 - Detalhes da fôrma para vigas com dimensões em mm: (a) corte A-A'; (b) corte B-B'.....	106
Figura 3.28 - Fôrma para corpos de prova mistos: (a) esquema com dimensões em mm; (b) fôrma pronta para uso.....	107
Figura 3.29 - Detalhes da fôrma com dimensões em mm: (a) corte A-A'; (b) corte B-B'.	107
Figura 3.30 - Fôrma para tirantes com aço CA-60: (a) esquema com dimensões em mm; (b) fôrma pronta para uso.....	108
Figura 3.31 - Detalhes da fôrma para tirantes para o aço CA-60, com dimensões em mm: (a) corte A-A'; (b) corte B-B'.	108
Figura 3.32 - Fôrma para tirantes com aço CA-25: (a) esquema com dimensões em mm; (b) fôrma pronta para uso.....	109
Figura 3.33 - Detalhes da fôrma para tirantes para o CA-25, com dimensões em mm: (a) corte A-A'; (b) corte B-B'.	109
Figura 3.34 - Fôrmas para tirantes com as barras de aço inseridas e fixadas: (a) CA-60; (b) CA-25.....	110
Figura 3.35 - Prisma trapezoidal de isopor para realização do entalhe nas vigas que receberam reparo.....	110
Figura 3.36 - Armaduras com extensômetros: (a) CA-60; (b) CA-25.	111
Figura 3.37 - Detalhe das fitas adesivas coladas para vedar a região de aplicação das argamassas de reparo.	111
Figura 3.38 - Fôrmas das vigas prontas para receber o concreto.	111
Figura 3.39 - Etapas da concretagem: (a) etapa 1; (b) etapa 2; (c) etapa 3; (d) aspecto final do concreto recém-misturado e logo após ser retirado da betoneira.....	112
Figura 3.40 - Ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme preconiza a ABNT NBR NM 67 (1998).....	113

Figura 3.41 - Moldagem do concreto: (a) corpos de prova de tirantes, mistos e vigas; (b) aspecto das vigas logo após a primeira concretagem; (c) mesa vibratória.....	113
Figura 3.42 - Corpos de prova submersos em água saturada de hidróxido de cálcio: (a) vigas; (b) cilíndricos e mistos; (c) tirantes.	114
Figura 3.43 - (a) fôrma pronta para concretagem das vigas; (b) aspecto físico das vigas logo após a moldagem na segunda concretagem.....	114
Figura 3.44 - Misturador planetário para confecção das argamassas de reparo.....	116
Figura 3.45 - Aparência dos corpos de prova de tirantes e cilíndricos, logo após a moldagem.....	116
Figura 3.46 - Etapa A de preparo da AGT1.....	121
Figura 3.47 - Etapa B de preparo da AGT1.....	121
Figura 3.48 - Etapa C de preparo da AGT1.	121
Figura 3.49 - Etapa D de preparo da AGT1.	122
Figura 3.50 - Etapa E de preparo da AGT1.....	122
Figura 3.51 - Etapa A de preparo da AGT2.....	123
Figura 3.52 - Etapa B de preparo da AGT2.....	123
Figura 3.53 - Etapa C de preparo da AGT2.	124
Figura 3.54 - Etapas D e E de preparo da AGT2.	124
Figura 3.55 - Prensa utilizada na caracterização mecânica do concreto do substrato e das argamassas de reparo.....	125
Figura 3.56 - Corpo de prova cilíndrico no ensaio de compressão axial: a) concreto; b) ACQT; c) AGT1.	126
Figura 3.57- Corpo de prova cilíndrico de concreto instrumentado com dois extensômetros do tipo roseta.	126
Figura 3.58 - Disposição do corpo de prova para o ensaio de tração por compressão diametral, segundo a ABNT NBR 7222 (2011).....	128
Figura 3.59 - (a) corpo de prova na prensa para o ensaio da ABNT NBR 7222 (2011); (b) ruptura do corpo de prova.....	128
Figura 3.60 – Micrografias da ACQT.	130
Figura 3.61 – Micrografias da ACQU.	130
Figura 3.62 – Micrografias da AGT1.	130
Figura 3.63 - Micrografias da AGT2.	131
Figura 3.64 –Micrografia da interface AGT1/substrato.	131

Figura 3.65 – Micrografia da interface ACQT/agregado graúdo.....	131
Figura 3.66 - Configurações dos corpos de prova para determinação da resistência de aderência à tração na flexão (dimensões em mm).....	133
Figura 3.67 - Corpos de prova para ensaio de resistência de aderência à tração na flexão.....	133
Figura 3.68- Confeção dos corpos de prova mistos da série A.	134
Figura 3.69 - Partes de concreto dos corpos de prova mistos preparados para receberem a camada fina da ACQT e AGT1.....	134
Figura 3.70 - Configuração do ensaio de resistência de aderência à tração na flexão.	135
Figura 3.71- Tipos de corpos de prova de tirantes.	138
Figura 3.72 - Tirantes: (a) pintados; (b) configurados para o ensaio de tração direta.	139
Figura 3.73 - Fissuras sendo realçadas no tirante após o ensaio de tração direta (tirante).....	139
Figura 3.74 - Tirantes da AGT1 pré-fissurados.	140
Figura 3.75 - Corpos de prova com AGT2.	141
Figura 3.76 - Exemplos de tirantes com AGT2.....	141
Figura 3.77 - Esquema dos apoios e das cargas concentradas para os ensaios de tração na flexão a quatro pontos (dimensões em mm).	142
Figura 3.78 - Preparação das vigas: (a) sem o molde de isopor; (b) restos de isopor sendo retirados; (c) superfície limpa e preparada; (d) tábuas fixadas com grampos de aço.	143
Figura 3.79 - a) Rugosímetro Mitutoyo SJ-201; b) medição da rugosidade da superfície do substrato das vigas.	144
Figura 3.80 - Vigas reparadas com AGT1.....	145
Figura 3.81 - Vigas reparadas com ACQT.	146
Figura 3.82 - Posicionamento do <i>LVDT</i> nas vigas (dimensões em mm).....	147
Figura 3.83 - Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência nas vigas (dimensões em mm).....	147
Figura 3.84 - Configuração utilizada para: (a) apoios; (b) carregamento.	147
Figura 3.85 - Pontos de aplicação das cargas e pontos de apoio no ensaio.	148
Figura 3.86 - Viga da série D com reparo de ACQT descolado.	149

Figura 3.87 - (a) superfície com apicoamento; (b) superfície sem apicoamento.	149
Figura 3.88 - (a) Vigas da série D; (b) vigas das séries E, F, H e I.	150
Figura 4.1- Modo de ruptura dos corpos de prova mistos.	161
Figura 4.2 - Corpo de prova misto para ensaio de resistência à tração na flexão (KUDLANVEC JUNIOR <i>et al.</i> , 2016).	162
Figura 4.3 - Vigas da série A: monolíticas, sem aço, com ruptura do tipo M.	177
Figura 4.4 - Vigas da série G: reparadas com AGT1, sem aço, com ruptura do tipo M.	177
Figura 4.5 - Detalhe da superfície de ruptura da série G.	178
Figura 4.6 - Vigas da série D: reparadas com ACQT e ACQU, sem aço, com ruptura do tipo I-1.	179
Figura 4.7 - Modo de ruptura das vigas de Mazza (2010): (a) viga de referência com ruptura tipo M; (b) viga reparada com graute comercial com ruptura tipo I-2; (c) viga reparada com argamassa geopolimérica com ruptura tipo M.	180
Figura 4.8 - Vigas da série B após ruptura.	190
Figura 4.9 - Vigas da série E após ruptura.	190
Figura 4.10 - Vigas da série H após ruptura.	191
Figura 4.11 - Vigas da série C após colapso.	200
Figura 4.12 - Vigas da série F após colapso.	201
Figura 4.13 - Vigas da série I após colapso.	201
Figura 4.14 - (a) Momento da ruptura da viga I2; (b) deformação excessiva do aço após a ruptura da viga I2.	202

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATD	Análise térmica diferencial
BET	Superfície específica B.E.T. (Brunauer, Emmet e Teller)
CEB	<i>Comité Euro-Internationale du Béton</i>
CPIIE-32	Cimento Portland composto com adição de escória de alto-forno, classe 32 MPa
CPV-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPi	Corpo de prova de índice $i = 1,2,3, \dots, n$
CV	Coeficiente de variação
DRX	Difratometria de raios X
EDX	Espectrometria de fluorescência de raios X
EPS	<i>Poliestireno expandido</i> (isopor)
FIP	<i>Federation Internationale de la Precontrainte</i>
GPa	Giga Pascal
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kN	kilo Newton
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados da UENF
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil da UENF
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
NM	Norma Mercosul
PVA	Acetato de Polivinila
RILEM	<i>Reunion Internationale des Laboratoires D'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions</i>
S	Desvio padrão
TG	Termogravimetria
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas minúsculas

a	vão de cisalhamento
b_w	largura da seção da viga
c	cobrimento da armadura em relação à face do elemento
d	altura útil da seção, igual à distância do bordo comprimido ao centroide da seção da armadura longitudinal de tração
d'	cobrimento estrutural da viga
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 à compressão do concreto
f_{cm}	resistência média à compressão do concreto
f_{ct}	resistência do concreto à tração direta
$f_{ct,m}$	resistência média à tração do concreto
$f_{ct,f}$	resistência à tração na flexão do concreto
$f_{ct,sp}$	resistência do concreto à tração indireta
$f_{ct,spm}$	resistência média do concreto à tração indireta
f_{st}	resistência à tração do aço de armadura passiva
f_y	resistência ao escoamento do aço
h	altura da viga
s	espaçamento entre os estribos (centro a centro)
x	altura da linha neutra
z	braço de alavanca

Letras romanas maiúsculas

A_c	área da seção transversal de concreto
A_s	área da seção transversal da armadura longitudinal de tração
A_{sw}	área seção transversal da armadura transversal
$A_{sw, min}$	área de armadura transversal mínima
A_s'	área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão

E_c	módulo de elasticidade do concreto
E_s	módulo de deformação do aço
I_c	momento de inércia da seção de concreto
M	momento fletor
M_r	momento fletor de fissuração
M_u	momento fletor último
P_r	carga de fissuração
$P_{u,teor}$	carga última teórica
$P_{u,exp}$	carga última experimental

Letras gregas

γ_c	coeficiente de ponderação da resistência do concreto
γ_s	coeficiente de ponderação da resistência do aço
ε_y	deformação específica de escoamento do aço
ε_y^*	deformação específica de escoamento do aço para o diagrama bilinear de tensões
ε_u	deformação específica do aço na ruptura
ε_c	deformação do concreto
ε_{ct}	deformação transversal do concreto
ν	coeficiente de Poisson
ρ	taxa geométrica de armadura longitudinal de tração
ρ_{sw}	taxa geométrica de armadura transversal
ρ_{min}	taxa geométrica mínima de armadura longitudinal das vigas
σ	tensão normal
σ_c	tensão longitudinal de compressão do concreto
ϕ	diâmetro das barras da armadura
η	coeficiente de conformação superficial (adimensional);

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas típicas para argamassas de reparo (modificada de MORGAN, 1996).....	47
Tabela 2.2 - Cronologia de alguns estudos sobre materiais geopoliméricos no Brasil.	52
Tabela 2.3 - Coeficiente de conformação superficial mínimo (η) para fios e barras de aço.	61
Tabela 2.4 - Nomenclatura dos concretos produzidos por Soares (2006).	67
Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas do concreto convencional e geopolimérico (RANJBAR <i>et al.</i> , 2016).	71
Tabela 3.1 - Descrição dos tipos de corpos de prova usados nesta pesquisa.	77
Tabela 3.2 - Características químicas e físicas do Cimento CPIIE-32. Dados do fabricante com limites de especificação de acordo com a ABNT NBR 11578 (1991).	80
Tabela 3.3 - Características químicas e físicas do Cimento CPV-ARI. Dados do fabricante com limites de especificação de acordo com a ABNT NBR 5733 (1991).	81
Tabela 3.4 - Composição química do cimento CPIIE-32.....	81
Tabela 3.5 - Composição química do cimento CPV-ARI.....	82
Tabela 3.6 - Características do superplastificante PLASTOL 5035 da Viapol.....	83
Tabela 3.7 - Propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova das barras de aço.	86
Tabela 3.8 - Composição química da argamassa comercial de reparo.....	88
Tabela 3.9 - Propriedades químicas e físicas do Metacaulim.	89
Tabela 3.10 - Composição química do metacaulim.....	90
Tabela 3.11 - Diâmetros D10, D50 e D90 do metacaulim.	92
Tabela 3.12 - Propriedades físicas e químicas do silicato de sódio alcalino comercial. Dados fornecidos pelo fabricante.	95
Tabela 3.13 - Tipos de aço e comprimentos utilizados nas armaduras.....	101
Tabela 3.14 - Dimensões das vigas e detalhes das armaduras.	102
Tabela 3.15 - Composição do concreto, em kg/m ³ (SMIDERLE, 2016).	105
Tabela 3.16 - Relações molares das matérias-primas usadas na AGT1 e AGT2 (GOLIATH, 2017; ROCHA, 2017).	119
Tabela 3.17 - Composição da AGT1 e AGT2, em kg/m ³	119

Tabela 3.18 - Etapas da produção da AGT1, de acordo com Goliath (2017).....	120
Tabela 3.19 - Etapas da produção da AGT2, de acordo com Rocha (2017).....	123
Tabela 3.20 - Séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova mistos.	133
Tabela 3.21 - Dimensões dos tirantes, em mm.	137
Tabela 3.22- Séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova de tirantes.	137
Tabela 3.23 – Novas séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova de tirantes.	141
Tabela 3.24 - Rugosidade da superfície do substrato das vigas e dos corpos de prova mistos.	144
Tabela 3.25 - Séries, nomenclaturas e características das vigas.....	145
Tabela 3.26 - Atualização das séries, nomenclaturas e características de todas as vigas.	151
Tabela 4.1 - Valores da resistência à compressão axial e à tração indireta do concreto.	153
Tabela 4.2 - Valores da resistência à compressão axial e à tração indireta da argamassa comercial.	154
Tabela 4.3 - Valores da resistência à compressão axial e à tração indireta das argamassas geopoliméricas confeccionadas nesta pesquisa.	155
Tabela 4.4 - Resumo das propriedades mecânicas (f_{cm} e $f_{ct,sp}$) dos materiais utilizados nesta pesquisa.	157
Tabela 4.5 - Resumo das propriedades mecânicas (E , $\sigma_{ct,G}$) dos materiais utilizados nesta pesquisa.	158
Tabela 4.6 - Critérios de trabalhabilidade utilizados para argamassas geopoliméricas (GHOSH, 2012).....	158
Tabela 4.7 - Índice de consistência das argamassas deste trabalho.	159
Tabela 4.8- Resultados das séries CCQ e CCG.	159
Tabela 4.9 - Resultados das séries CQ e CG.	160
Tabela 4.10 - Resistências mecânicas das argamassas usadas por Kudlanvec Junior et al. (2016),	162
Tabela 4.11 - Resistências de aderência normalizadas (KUDLANVEC JUNIOR et al., 2016).	162

Tabela 4.12 - Tensões de aderência, calculadas segundo Castro (2000), ABNT NBR 6118 (2014) e Silva (2015); e seus valores normalizados.....	165
Tabela 4.13 - Valores de carga máxima e deslocamento vertical máximo das vigas (Mazza, 2010).	171
Tabela 4.14 - Flechas e deformações das vigas das séries B, E e H à 60% da carga de ruptura.	202
Tabela 4.15 - Flechas e deformações das vigas das séries C, F e I à 60% da carga de ruptura.	202

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Curvas tensão média de aderência do CCP (concreto com cimento Portland) e do CCG (concreto com cimento geopolimérico) em função do deslizamento relativo para barras lisas de aço (DIAS, 2001).	65
Gráfico 2.2 - Curvas da força média de arrancamento do CCG e do CCP em função do deslizamento relativo para comprimentos de ancoragem iguais a $5x d_s$, $4x d_s$ e $2,5x d_s$. (SOARES, 2006).	68
Gráfico 2.3 - Detalhe das curvas tensão média de aderência do CCG e do CCP em função do deslizamento relativo até 0,2 mm para comprimentos de ancoragem iguais a $5x d_s$, $4x d_s$ e $2,5x d_s$ (SOARES, 2006).	69
Gráfico 2.4 - Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das vigas ensaiadas à tração na flexão (MAZZA, 2010).	70
Gráfico 2.5 - Curvas carga <i>versus</i> flecha de vigas de concreto armado reforçadas com GPC e OPC multicamadas (RANJBAR <i>et al.</i> , 2016).	74
Gráfico 3.1 - Curva granulométrica da areia.	78
Gráfico 3.2 - Curva granulométrica da brita 0.	79
Gráfico 3.3 - Curva tensão <i>versus</i> deformação para o corpo de prova 1 do aço CA-25.	85
Gráfico 3.4 - Curva tensão <i>versus</i> deformação para o corpo de prova 2 do aço CA-60.	85
Gráfico 3.5 - Difratograma de raios X do metacaulim.	91
Gráfico 3.6 - Distribuição granulométrica do metacaulim.	92
Gráfico 3.7 - Curva de termogravimetria (TG) e de análise termodiferencial (ATD) do metacaulim.	93
Gráfico 4.1 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação do concreto convencional (substrato).	153
Gráfico 4.2 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação da ACQT.	154
Gráfico 4.3 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação da ACQU.	155
Gráfico 4.4 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação da AGT1.	156
Gráfico 4.5 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação da AGT2.	156
Gráfico 4.6 - Evolução da resistência à compressão da AGT1 em função do tempo (adaptado de GOLIATH, 2017).	157
Gráfico 4.7 - Médias das tensões normalizadas $f_{ct, fm}/f_{cm}$	160

Gráfico 4.8 - Valores do coeficiente de conformação superficial para os corpos de prova de todas as séries.	164
Gráfico 4.9 - Valores das cargas de ruptura teóricas e experimentais das vigas das séries A, D e G.	168
Gráfico 4.10 - Relação $P_{u,exp}/P_{u,teor}$ das vigas das séries A, D e G.	169
Gráfico 4.11 - Curvas carga <i>versus</i> flecha das vigas A1, D1, D2, D3 e G1.	170
Gráfico 4.12 - Valores médios das flechas máximas das vigas das séries A e G; e valores das flechas das vigas D1, D2 e D3.	170
Gráfico 4.13 - Curvas carga <i>versus</i> deformação na zona de compressão das vigas A1, D2 e G1.	172
Gráfico 4.14 - Valores das deformações máximas (na zona de compressão) das vigas A1, D2 e G1.	172
Gráfico 4.15 - Curvas carga <i>versus</i> deformação na zona de tração das vigas A1, D2 e G1.	173
Gráfico 4.16 - Valores das deformações máximas (na zona de tração) das vigas A1, D2 e G1.	173
Gráfico 4.17 - Localização da linha neutra das vigas A1, D2 e G1 para carga última.	174
Gráfico 4.18 - Momento de fissuração teórico e experimental das vigas das séries A, e G e das vigas D1, D2 e D3.	176
Gráfico 4.19 - Valores das cargas de ruptura teóricas e experimentais das vigas das séries B, E e H.	181
Gráfico 4.20 - Relação $P_{u,exp}/P_{u,teor}$ das vigas das séries B, E e H.	182
Gráfico 4.21- Curvas carga <i>versus</i> flecha das vigas das séries B, E e H.	182
Gráfico 4.22 - Valores médios das flechas máximas das vigas da série B; e valores das flechas das vigas das séries E e H.	183
Gráfico 4.23 - Índice de ductilidade 1 das vigas das séries B, E e H.	184
Gráfico 4.24 - Índice de ductilidade 2 das vigas das séries B, E e H.	184
Gráfico 4.25 - Curvas carga <i>versus</i> deformação na zona de compressão das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.	185
Gráfico 4.26 - Valores das deformações máximas (na zona de compressão) das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.	185

Gráfico 4.27 – Curvas carga <i>versus</i> deformação na armadura de tração das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.	186
Gráfico 4.28 - Valores das deformações máximas (na armadura de tração) das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.	186
Gráfico 4.29 - Localização da linha neutra das vigas B1, E1 e E3 para as cargas últimas.	187
Gráfico 4.30 - Localização da linha neutra das vigas B1, H1 e H3 para as cargas últimas.	188
Gráfico 4.31 - Momentos de fissuração teóricos e experimentais.	189
Gráfico 4.32 - Cargas de ruptura teóricas e experimentais.	192
Gráfico 4.33 - Relação $P_{u,exp}/P_{u,teor}$ das séries C, F e I.	193
Gráfico 4.34 - Curvas carga <i>versus</i> flecha das vigas das séries C, F e I.	193
Gráfico 4.35 - Valores médios das flechas máximas das vigas da série C; e valores das flechas das vigas das séries F e I.	194
Gráfico 4.36 - Índice de ductilidade 1 das vigas das séries C, F e I.	194
Gráfico 4.37 - Índice de ductilidade 2 das vigas das séries C, F e I.	195
Gráfico 4.38 - Curvas carga <i>versus</i> deformação na zona de compressão das vigas C1, F1, F3, I1 e I3.	195
Gráfico 4.39 - Valores das deformações máximas (na zona de compressão) das vigas C1, F1, F3, I1 e I3.	196
Gráfico 4.40 - Curvas carga <i>versus</i> deformação na armadura de tração das vigas C1, F1, F3, I1 e I3.	196
Gráfico 4.41 - Valores das deformações máximas na armadura de tração das vigas C1, F1, F3, I1 e I3.	197
Gráfico 4.42 - Localização da linha neutra das vigas C1, F1 e F3 para as cargas últimas.	198
Gráfico 4.43 - Localização da linha neutra das vigas C1, I1 e I3 para as cargas últimas.	198
Gráfico 4.44 - Relação entre os momentos de fissuração experimentais e teóricos das séries C, F e I.	200
Gráfico 4.45 - Resistências à tração na flexão das vigas das séries E, H, F e I.	204

Gráfico 4.46 - Resistências à tração na flexão das vigas das séries E, H, F e I normalizadas em função do diâmetro das barras de aço das vigas de concreto armado.

.....204

RESUMO

Em diversas pesquisas na área de engenharia civil o reparo estrutural em vigas de concreto é executado com diferentes tipos de argamassas. O geopolímero, um polímero inorgânico amorfo, possui aplicações já estudadas nesta área. Este material possui propriedades físicas, químicas e mecânicas que permitem sua utilização como material de reparo. A aderência é uma propriedade muito importante para que uma argamassa seja considerada adequada para recuperar e/ou reforçar estruturas de concreto. Por isso, o conhecimento desta propriedade junto ao concreto convencional tem grande relevância na determinação da carga última, das deflexões e das deformações da estrutura recuperada e/ou reforçada. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficácia de uma argamassa geopolimérica como material para recuperação de vigas de concreto convencional, de forma que se restaure o caráter monolítico e a capacidade portante da estrutura. Para tanto, um programa experimental foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro com o objetivo de avaliar a aderência entre uma argamassa comercial e outra geopolimérica na recuperação de vigas de concreto convencional. Os resultados mostraram que a aderência entre o concreto do substrato e a argamassa geopolimérica foi 21% superior à argamassa comercial. As maiores deflexões ocorreram para os corpos de prova reparados com argamassa geopolimérica, devido ao baixo módulo de elasticidade longitudinal deste material de reparo. As vigas recuperadas com argamassa geopolimérica apresentaram-se monolíticas, ao contrário das recuperadas com argamassa comercial, que apresentaram descolamento da interface substrato/reparo. Logo, é possível concluir que a argamassa geopolimérica confeccionada neste estudo pode ser utilizada como material alternativo para reparo de vigas de concreto convencional, devido à aderência satisfatória ao concreto do substrato, à carga de ruptura próxima à da viga monolítica de referência e à melhor qualidade em relação à argamassa comercial, de acordo com os parâmetros estudados nesta pesquisa.

Palavras-chave: geopolímero, aderência, reparo, concreto armado.

ABSTRACT

In several studies in the civil engineering area, structural repair in concrete beams is performed with different types of mortars. The geopolymer, an amorphous inorganic polymer, has applications already studied in this area. This material has physical, chemical and mechanical properties that allow its use as repair material. Adherence is a very important property for a mortar to be considered adequate to recover and / or reinforce concrete structures. Therefore, the knowledge of this property with conventional concrete has great relevance in determining the ultimate load, deflections and deformations of the recovered structure. Thus, the objective of this work is to evaluate the effectiveness of a geopolymer mortar as a material for the recovery of conventional concrete beams, in order to restore the monolithic character and the bearing capacity of the structure. To do so, an experimental program was carried out at the Civil Engineering Laboratory of the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro with the objective of evaluating the adhesion between a commercial mortar and another geopolymer in the recovery of conventional concrete beams. The results showed that the adhesion between the concrete of the substrate and the geopolymer mortar was 21% higher than the commercial mortar. The greatest deflections occurred for the specimens repaired with geopolymer mortar, due to the low modulus of elasticity of this repair material. The beams recovered with geopolymer mortar were monolithic, unlike those recovered with commercial mortar, which showed substrate / repair interface detachment. Therefore, it is possible to conclude that the geopolymer mortar made in this study can be used as an alternative material for repair of conventional concrete beams due to the satisfactory adhesion to concrete of the substrate, the bursting load close to the monolithic reference beam and to the best quality in relation to the commercial mortar, according to the parameters studied in this research.

Keywords: geopolymer, adhesion, repair, reinforced concrete.

1. INTRODUÇÃO

O reparo e/ou reforço de estruturas de concreto é utilizado na correção de falhas na concepção ou execução de projeto, desgaste natural, intempéries ambientais, surgimento de patologias, variações térmicas no concreto e por diversos outros motivos que podem levar as estruturas ao não atendimento dos limites de segurança (estado limite último), estéticos e/ou de higiene (estado limite de serviço).

Conceitua-se reparo da estrutura como a correção localizada de problemas patológicos, sem a finalidade de aumentar a capacidade portante dessa estrutura, caso contrário, é denominado de reforço.

Reparos e reforços estruturais são serviços de intervenção muito utilizados na construção civil, devido ao alto custo envolvido no projeto destas estruturas para serem simplesmente inutilizadas ou destruídas.

Há diferentes soluções convencionais de reparo em vigas de concreto armado, que apresentam resultados confiáveis, entre as quais: adição ou substituição na face tracionada da viga de um novo concreto ou argamassa com ou sem novas barras de aço longitudinais e/ou transversais; uso de argamassa convencional com adesivo PVA (acetato de polivinila) ou com adesivo acrílico; uso de resina quando há necessidade de liberação rápida da estrutura; entre outras.

Em diversas pesquisas na área de engenharia civil o reparo e/ou reforço estrutural em vigas de concreto armado é analisado com o uso de argamassas, concretos e outros materiais. O geopolímero, um polímero inorgânico de microestrutura entre amorfa e semicristalina, já possui aplicações estudadas nesta área. Este material possui propriedades físicas, químicas e mecânicas que permitem sua utilização como material de reparo e/ou reforço.

Os estudos no campo das tecnologias de reparo e/ou reforço têm objetivado, prioritariamente, a melhoria das propriedades dos materiais de recuperação com relação à compatibilidade estrutural e de deformações.

Para uma argamassa ser adequada para reparar estruturas, como uma viga de concreto armado, é importante que possua baixa retração, boa trabalhabilidade e boa aderência ao substrato¹, sendo este um dos parâmetros de desempenho mais

¹ O termo substrato, neste trabalho, refere-se à superfície de concreto convencional constituído de cimento Portland, brita, areia e água.

importantes. Por isso o conhecimento do comportamento desta propriedade junto ao concreto convencional e o aço tem grande relevância para se determinar a capacidade de carga última, flechas e deformações da estrutura reparada.

Segundo Costa (2014), a aderência depende da proximidade e da área de contato entre as superfícies. Nos materiais de base cimentícia ocorre naqueles que dependem do contato entre a matriz (cimento, água, aditivos e outros finos) e outras fases sólidas (agregados, fibras, cerâmicas de revestimento, alvenarias, armaduras).

Alguns resultados de pesquisas experimentais (DUAN *et al.*, 2016; RANJBAR *et al.*, 2016; ZHANG *et al.* 2015) mostram que a aderência é um dos principais indicadores de qualidade do desempenho de sistemas multifásicos, afetando o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto (zona de transição agregado-matriz); revestimentos de argamassa (interface argamassa-elementos de alvenaria); de reparo (interface material de reparo-concreto convencional); compósitos (interface fibra-matriz), entre outros. Embora envolva materiais e processos de produção diferentes, Costa (2014) afirma que todos estes casos implicam na formação de uma interface, cujas interações ocorrem após o contato da matriz cimentícia, ainda no estado plástico, com o substrato, e vão se modificando ao longo do tempo devido à cinética de hidratação dos ligantes e absorção do substrato.

Apesar de ter sido alvo de inúmeros estudos, os parâmetros que determinam a eficácia de um material de reparo ainda não são bem compreendidos, tornando difícil estabelecer critérios para escolher um material adequado para fazê-lo. Até o momento, as pesquisas dão mais ênfase a materiais com matriz à base de cimento Portland e epóxi. Pouco tem sido explorado no que se refere às características de aderência dos geopolímeros, que podem ser mais relevantes que a compatibilidade de propriedades como módulo de elasticidade, resistência à tração e características superficiais do substrato (rugosidade, porosidade/absorção de água). Um alto índice de manifestações patológicas ocorre em sistemas recuperados com baixa aderência, mesmo que outras propriedades sejam similares ao substrato.

Embora alguns trabalhos tenham sido realizados (DUAN *et al.*, 2016; PHOONGERNKHAM *et al.*, 2015; ALANAZI *et al.*, 2016), as técnicas e relatórios sobre a obtenção de um material geopolimérico para reparo de estruturas ainda são muito escassos.

Segundo Ranjbar *et al.* (2016), a principal questão da utilização do uso de

geopolímeros é a conformidade do procedimento de projeto com os padrões atuais, que consideram principalmente as propriedades físicas e químicas específicas dos produtos de cimento Portland. No entanto, os pesquisadores afirmam que os concretos alcalinos são perfeitamente adequados para serem regulados por meio de uma abordagem baseada em desempenho, de acordo com a norma ASTM C1157 (2017), que mostra o potencial de desenvolvimento de sistemas futuros de aglutinantes não convencionais.

Deste modo, esta pesquisa visa à utilização de argamassas geopoliméricas como alternativa inovadora de material para reparar vigas de concreto armado, aproveitando-se que as características adesivas são apropriadas para esta aplicação. Vigas reabilitadas com argamassas geopoliméricas foram analisadas e comparadas com vigas de referência, sem reparo, e com reparo usando uma argamassa industrializada à base de cimento Portland modificada com polímeros.

Neste contexto, este trabalho pretende colaborar com o preenchimento desta lacuna, subsidiando o entendimento da importância da aderência na recuperação de um elemento estrutural de concreto convencional, bem como da utilização de normas brasileiras para avaliar o potencial de materiais geopoliméricos em reparo de estruturas como alternativa aos produtos tradicionais de cimento Portland.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a eficácia de uma argamassa geopolimérica como material para recuperação de vigas de concreto armado convencional, de forma que se restaure o caráter monolítico e a capacidade portante da estrutura.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- fabricação de argamassas geopoliméricas para reparo;
- avaliação de propriedades mecânicas de argamassas geopoliméricas;
- avaliação dos efeitos causados pela substituição do concreto convencional por argamassas de reparo na zona de tração de vigas;

- avaliação do desempenho quanto à aderência e compatibilidade das argamassas geopoliméricas aplicadas ao substrato;
- estudo comparativo entre argamassas geopoliméricas e outra comercial de reparo estrutural;
- estudo da aderência das argamassas geopoliméricas e comercial com barras de aço nervuradas e lisas.

1.3. Resumo dos capítulos

O Capítulo 1 faz a introdução ao tema e destaca a relevância do desenvolvimento do trabalho e seus objetivos.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre materiais de reparo convencionais e não convencionais; versa sobre materiais geopoliméricos e suas características físicas, químicas e mecânicas; conceitos e ensaios de aderência; e resultados de pesquisas experimentais sobre aderência dos geopolímeros encontrados na literatura.

O Capítulo 3 relata o desenvolvimento do programa experimental. Envolve desde a caracterização química, física e mecânica dos materiais, dimensionamento e características geométricas das vigas estudadas nesta tese, até a realização dos ensaios de aderência entre argamassas de reparo ao substrato; argamassas de reparo às barras de aço; e o desempenho mecânico de vigas de concreto armado recuperadas com argamassas de reparo.

No Capítulo 4 apresenta-se a análise dos resultados obtidos no programa experimental.

As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros são feitas no Capítulo 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aborda os seguintes assuntos:

- requisitos para utilização de materiais em reparo de estruturas;
- aderência;
- materiais convencionais para reparo de estruturas de concreto armado;
- materiais não convencionais para reparo de estruturas de concreto;
- exemplos de pesquisas envolvendo aderência entre concreto convencional, argamassas de reparo e barras de aço específico para concreto armado.

2.1. Recuperação de estruturas de concreto

A necessidade de reparar ou reforçar uma determinada estrutura, restaurando sua segurança e aumentando sua durabilidade (vida útil), tem sido cada vez mais comum por uma série de razões: estruturas mais esbeltas, solicitações mais intensas, ambientes mais agressivos, consciência e maior conhecimento dos responsáveis pela manutenção das estruturas, recuperação ou aumento do valor do imóvel, inviabilidade de demolição e reconstrução, mudança de uso da construção e outros (HELENE, 1992).

Uma estrutura pode apresentar-se doente em vários graus e, quando isto ocorre, é necessário intervir para que a sua integridade seja garantida. Quando os serviços a serem executados nesta intervenção não implicarem introdução de materiais com a finalidade de aumentar e sim de reconstituir a capacidade portante da estrutura, chamamos a eles de recuperação ou de reparo da estrutura, sendo chamado de reforço em caso contrário (SOUZA e RIPPER, 1998).

Podem ser utilizados vários tipos e processos de recuperação das estruturas de concreto armado. Grantham (2011) indica que os processos de recuperação estrutural podem ser denominados de tradicionais e não tradicionais. Aqueles que envolvem técnicas de demolição do concreto afetado, remoção mecânica do concreto degradado e recomposição do concreto demolido são chamados de tradicionais. Já os processos não tradicionais são compostos por técnicas químicas e eletroquímicas que visam atenuar ou até interromper o mecanismo de degradação.

A associação de um novo material a um concreto preexistente produz um

composto com dois materiais que possuem diferentes propriedades (mecânicas e/ou físicas), levando a um problema de compatibilidade entre eles. De acordo com Emmons e Vaysburd (1994), a compatibilidade é vista como o equilíbrio existente entre as propriedades físicas, químicas e eletroquímicas de um material de reparo e o substrato. Por conta dessa incompatibilidade, a interface entre os materiais é a zona inerentemente mais fraca nos sistemas de reparo (VAYSBURD e EMMONS, 2006).

A qualidade da interface entre os materiais (de reparo e substrato) é um dos principais parâmetros para o desempenho adequado desses sistemas (EMMONS e VAYSBURD, 1994). Após a colocação do novo material sobre o substrato, a restrição do material de reparo, causado pelo concreto, geralmente induz altas tensões de tração e de cisalhamento nos sistemas de reabilitação, que podem levar ao descolamento das interfaces (ZHOU *et al.*, 2008). Conseqüentemente, é necessária uma resistência de aderência suficiente para suportar as tensões nas interfaces induzidas pelo ambiente e/ou cargas mecânicas. Visto isso, a escolha adequada dos materiais para reparo é de extrema importância para garantir o desempenho do reparo.

2.2. Requisitos para os materiais serem utilizados em reparos de estruturas

Para que um reparo seja durável e eficiente, deve ser compatível com a peça estrutural a ser reparada (RIBEIRO, 2009). Segundo Emmons e Vaysburd (1994), a compatibilidade entre o reparo e o substrato pode ser definida como o equilíbrio das propriedades físicas, químicas, eletroquímicas e dimensionais entre o reparo e o substrato. Deve permitir que o reparo suporte todas as tensões causadas pelas variações de volume e aos efeitos químicos e eletroquímicos, sem deteriorar-se, num meio específico, em um determinado período de tempo.

Segundo Ribeiro (2009), os materiais de reparo devem possuir os seguintes requisitos:

- compatibilidade estrutural: engloba fatores físicos como aderência, resistência à compressão, deformação lenta e módulo de elasticidade similar ao do substrato;
- compatibilidade de deformações: os reparos devem ter baixa retração por secagem e ter coeficiente de dilatação térmica compatível com o substrato;

- compatibilidade à agressividade ambiental: a baixa porosidade e a estabilidade química são importantes para que o reparo resista a microclimas agressivos;
- compatibilidade eletroquímica: o reparo deve provocar o mínimo de desequilíbrio de potencial eletroquímico na armadura, em decorrência de diferenças entre os meios proporcionados pelo reparo e o concreto da estrutura

Além disso, a influência dos parâmetros externos, tais como ambiente, conformação da superfície do substrato, condições de umidade, cargas aplicadas e exposição a substâncias químicas, também deve ser observada antes de escolher o material de reparo (MORGAN,1996).

Com relação ao reparo de estruturas, Moreno e Selmo (2007) definem que aderência é um termo genérico usado para descrever tanto a resistência mecânica como a extensão do espalhamento ou contato entre a argamassa de reparo no estado endurecido e o substrato poroso. A aderência é a propriedade, no sistema de reparo, responsável pelas restrições às deformações, sendo o mecanismo que permite a transferência de tensões na interface, fazendo com que, no sistema reparo/substrato, a estrutura apresente deformações homogêneas e compatíveis.

Moreno e Selmo (2007) citam que, ao se analisar o mecanismo de aderência entre duas superfícies, é importante observar que esse mecanismo se desenvolve em duas etapas distintas, consecutivas e intrinsecamente correlacionadas. A primeira ocorre ainda no estado fresco, é a adesão inicial, que acontece quando a argamassa, ainda no estado plástico, entra em contato com o substrato poroso; a segunda etapa se processa com o endurecimento da argamassa, definida como aderência propriamente dita.

Para Moreno e Selmo (2007) a aderência é uma propriedade muito importante para qualquer sistema de reparo/reforço, pois a deficiência dessa propriedade compromete todo o sistema de restauro, tornando os reparos vulneráveis à permeabilidade, o que facilita o ingresso de agentes agressivos à estrutura. Se a ligação entre o concreto antigo e o material de reparo for bem feita, o reparo torna-se parte integrante da estrutura. Porém, o concreto antigo deve oferecer condições favoráveis para o recebimento desse reparo.

A aderência é uma das questões mais importantes na aplicação de materiais de reparo às estruturas existentes de concreto armado (SATOH e YAMADA, 2016). Por isso, as definições e mecanismos de aderência são discutidos nos itens a seguir.

2.2.1. Aderência

Aderência é a propriedade resultante das ligações que ocorrem na interface entre duas superfícies e é responsável pela solidariedade entre elas. Wu (1982) define aderência como o estado em que duas fases se mantêm unidas por contato interfacial, de forma que forças mecânicas ou trabalho possam ser transferidos por meio dessa interface.

Segundo Ollivier *et al.* (1995), a aderência é regida pelo contato entre superfícies: quanto maior a proximidade destas, mais intensas as forças intermoleculares responsáveis por tal propriedade. Nos sistemas cimentícios, a interface substrato-matriz cimentícia é o elo fraco por ser mais porosa que a própria matriz. Tal interface pode ser melhorada pela redução do teor de água, pela compactação, pela adição de partículas finas ou pelo grau de hidratação.

Pereira (2003) define aderência, em nível microscópico, como o efeito aglutinador de diferentes materiais na transformação destes em um material diferente, com propriedades distintas daquelas que lhe deram origem.

2.2.1.1. Mecanismos de aderência

Independentemente da interface formada e por quais materiais ela é constituída, a formação da aderência abrange muitos fenômenos, de modo que a elaboração de uma teoria única que explique os mecanismos químicos e físicos da aderência torna-se difícil devido à natureza e à interdisciplinaridade (COSTA, 2014). Vários trabalhos (COSTA, 2014; PEREIRA, 2003; FUSCO, 1995; ELIGEHAUSEN *et al.*, 1983; ACI COMMITTEE 408, 1991) citam que a aderência resulta de três tipos de ligações: ligações químicas, ancoragem mecânica e forças de atração (atrito); podendo esses ocorrerem de forma isolada ou simultânea conforme os constituintes das fases envolvidas.

O mecanismo de adesão em reparos estruturais está relacionado com as forças químicas que são responsáveis pela ancoragem entre a matriz reativa do material novo e o substrato. Esta ancoragem é fornecida pela formação de estruturas sílico-calcário-hidratadas da matriz que penetra nos poros do substrato (RASHID *et al.*,

2015). Para Costa (2014), a intensidade dessas ligações está diretamente relacionada ao contato substrato-matriz, sendo este influenciado pelas características superficiais do substrato, topografia (rugosidade e porosidade) e presença de contaminantes, pelas características reológicas e geométricas da matriz cimentícia, pela energia de aplicação da matriz sobre o substrato e pelas condições ambientais.

De acordo com Vaz (2013), a interface de ligação entre duas superfícies de matrizes cimentícias de idades diferentes é onde, sob esforços cortantes, ocorre o mecanismo de transferência de tensões pela superfície de contato. Esse tipo de interface ocorre em elementos formados por parte pré-fabricada e parte concretada no local e elementos reparados e/ou reforçados. O mecanismo de transferência na ligação, por meio da superfície de contato, pode ser dividido em três parcelas: adesão, mecânica e por atrito. A primeira parcela é a inicialmente mobilizada e se limita a baixas solicitações, pois ela é destruída se houver deslizamento da ordem de aproximadamente 0,05 mm ou mesmo menor (FIB, 2012). Uma vez rompida a adesão, ao menor deslizamento relativo, aparece uma resistência por atrito entre as superfícies de contato, desde que existam tensões normais à interface, e estas tensões podem advir de forças externas ou da reação da armadura transversal à interface quando solicitada à tração. Fatores relevantes na resistência por atrito são a rugosidade e a limpeza da superfície do concreto antigo quando da concretagem do novo.

Os itens a seguir descrevem os principais mecanismos de aderência.

2.2.1.1.1. Aderência por adesão (ligações químicas)

Reinhart (1954), citado por Costa (2014), afirma que a aderência é de natureza predominantemente química, resultante das forças de atração moleculares entre as fases: ligações primárias (iônicas; covalentes e metálicas) e secundárias (forças intermoleculares, também denominadas forças de van der Waals). A ocorrência de ligações primárias na interface substrato-matriz cimentícia é pouco descrita na literatura pela dificuldade de comprovação. Geralmente, são constatadas pelas alterações morfológicas dos produtos hidratados na interface, principalmente pela quantidade e orientação de cristais de hidróxido de cálcio em matrizes produzidas com agregados reativos ou polímeros (MONTEIRO e MEHTA, 1986).

De uma forma mais simplista, Brisotto (2011), Fusco (1995), Fernandes (2000) e França (2004) explicam que esta parcela é caracterizada por uma resistência de adesão R_{b1} , como mostra a Figura 2.1, e pode ser constatada por meio da separação de um bloco concretado sobre uma chapa metálica. Neste caso, verifica-se somente a existência da ligação por adesão. A aderência por adesão ou aderência química ocorre em função de ligações físicas e químicas na interface das barras com a pasta, geradas durante as reações de pega do cimento. Conforme Eligehausen *et al.* (1983), a aderência fornecida pela adesão é muito baixa, apresentando valores em torno de 0,5 a 1,0 N/mm². Para pequenos deslocamentos relativos entre a barra e a massa de concreto que a envolve essa ligação é destruída.

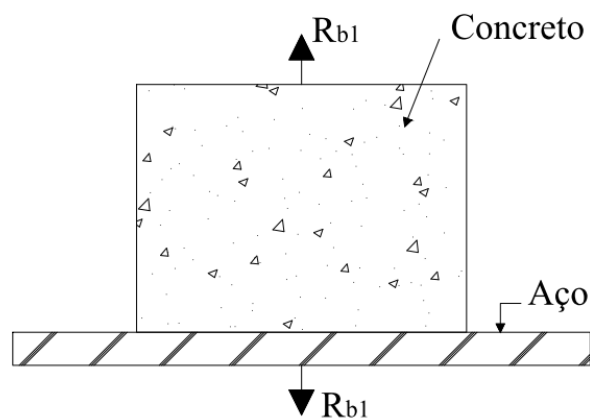


Figura 2.1 - Aderência por adesão (FUSCO, 1995).

Segundo Costa (2014), numa superfície topográfica idealizada, perfeitamente lisa, tal como mostra a Figura 2.2a, a aderência é essencialmente química, não havendo parcela mecânica, pois não há qualquer tipo de penetração da matriz no substrato. Isso também ocorre em algumas superfícies topográficas irregulares, se os esforços aplicados forem perfeitamente normais ao plano, tais como os exemplos mostrados nas Figuras 2.2b e 2.2c. Nestes dois casos, o aumento da aderência pode ser atribuído simplesmente ao acréscimo de área de contato interfacial, pois se não houvesse ligações químicas, haveria apenas o encaixe entre as fases. De fato, o travamento mecânico só irá ocorrer se o substrato apresentar irregularidades que permitam a ancoragem do adesivo, tal como exibem as Figuras 2.2d e 2.2e. Na prática, nenhuma superfície é perfeitamente plana e irá depender da escala de observação: em baixa ampliação a superfície é plana, mas quando a ampliação é aumentada verificam-se alterações na topografia da mesma: rugosidade e poros

(COSTA, 2014). O próximo tópico explica a influência da parcela do intertravamento mecânico na aderência total.

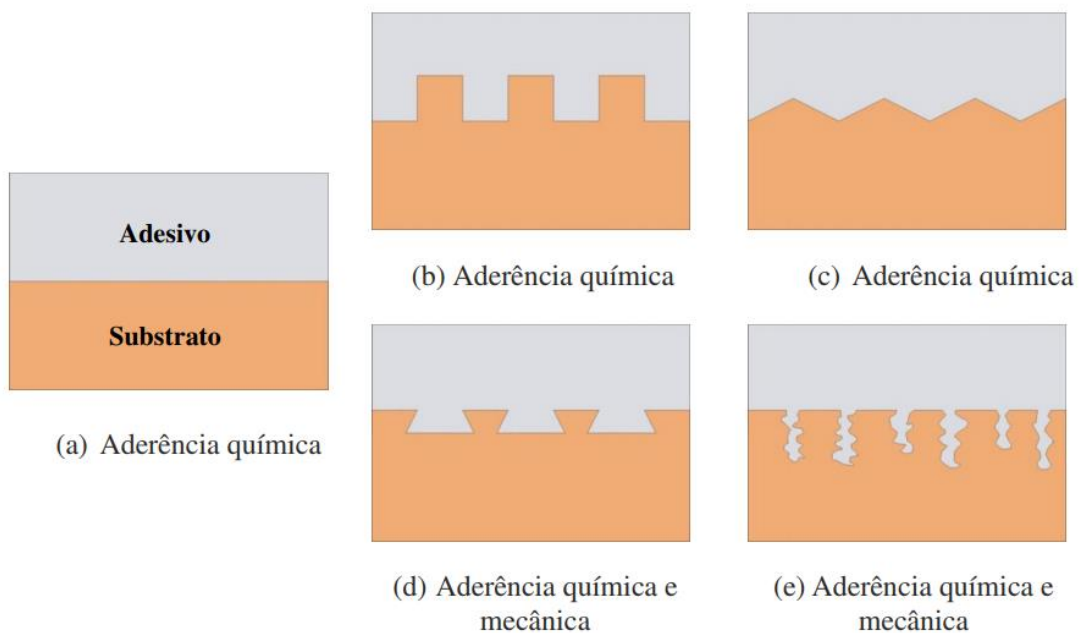


Figura 2.2 - Representação esquemática dos mecanismos de aderência adesivo-substrato (COSTA, 2014).

2.2.1.1.2. Aderência mecânica

Segundo Costa (2014), apesar de existir sólida base científica demonstrando a natureza química da aderência, a contribuição do intertravamento mecânico não pode ser totalmente afastada. A ocorrência desse mecanismo depende da estrutura física da superfície do substrato e da capacidade de molhamento do produto aplicado sobre o substrato (neste caso, o produto aplicado precisa ser necessariamente líquido) ainda no estado fresco. Esse deve ser capaz de penetrar nas irregularidades superficiais (poros e rugosidade) exercendo a ação de ancoragem após solidificação.

Carasek e Djanikian (1997), no que se refere à tecnologia de argamassas, dizem que, ao entrar em contato com o substrato, parte da água utilizada no amassamento das argamassas é absorvida. Sendo ela rica em constituintes do aglomerante, esses constituintes em dissolução ou em estado coloidal penetram pelos poros, cavidades ou entre as rugosidades do substrato, precipitando-se. Esses precipitados intracapilares exercem uma ação de ancoragem das argamassas ao substrato. Sendo assim, observa-se uma aderência essencialmente mecânica, em

que o embricamento mecânico é o grande responsável pela ligação promovida entre as duas superfícies, mesmo sabendo da existência das forças intermoleculares, consideradas desprezíveis no caso da aderência entre argamassas e concreto.

Segundo Recum *et al.* (1996), a topografia define a morfologia de uma superfície, sendo essa dividida entre rugosidade e textura. A rugosidade é caracterizada por alterações da topografia da superfície, incluindo picos e vales com tamanhos e distribuição aleatória. Pode ser resultado da estrutura cristalina do material, do processo de fabricação ou acabamento superficial, incluindo: gravação; polimento ou jateamento de areia. Textura é qualquer configuração da morfologia da superfície com dimensões e distribuições definidas. Os pesquisadores assumem que a porosidade pode ser considerada um caso especial de textura, consistindo de poros individuais ou interconectados na estrutura do material.

A aderência mecânica ocorre por meio do engrenamento (encavilhamento) proporcionado pelo contato entre as duas superfícies de concreto quando ocorre o deslizamento relativo entre as partes. Em superfícies rugosas, a ação mecânica é garantida pelo agregado graúdo que atravessa a interface de deslizamento (engrenamento entre agregados). Algumas vezes são utilizados “dentes de concreto” na ligação (VAZ, 2013).

Nos estudos da aderência entre a matriz cimentícia e o aço, Fusco (1995) afirma que a aderência mecânica é devida à conformação superficial das barras. Nas barras de alta aderência (Figura 2.3), as saliências mobilizam forças localizadas, aumentando significativamente a aderência. A Figura 2.4 mostra que mesmo uma barra lisa pode apresentar aderência mecânica, em função da rugosidade superficial, devido à corrosão e ao processo de fabricação, gerando um denteamento da superfície. Para efeito de comparação, são apresentadas superfícies microscópicas de: barra de aço com corrosão, barra de aço recém laminada e fio de aço obtido por laminação a quente e posterior encruamento a frio por estiramento (Figura 2.4). Nota-se que essas superfícies estão muito longe de serem efetivamente lisas.

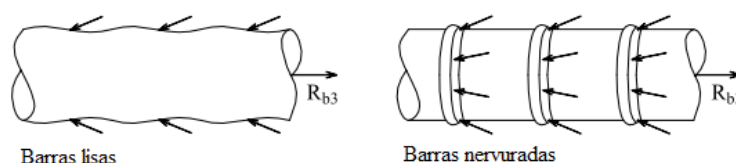


Figura 2.3 - Aderência mecânica em barras de aço nervuradas (FUSCO, 1995).

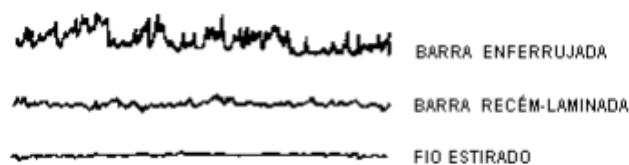


Figura 2.4 - Rugosidade superficial de barras e fios lisos de aço (FUSCO, 1995).

2.2.1.1.3. Aderência por atrito

Fusco (1995), Barbosa (2001), França (2004) e Brisotto (2011) explicam o esquema de arrancamento de uma barra de aço em um bloco de concreto (Figura 2.5). Verifica-se que a força de arrancamento R_{b2} é maior do que a força R_{b1} mobilizada pela adesão (Figura 2.1). Esse acréscimo é devido ao atrito entre a barra de aço e o concreto. O atrito manifesta-se quando há tendência ao deslocamento relativo entre os materiais. Esse mecanismo depende da rugosidade superficial da barra e da pressão transversal (P_t) exercida pelo concreto sobre a barra de aço, em virtude da retração. Em barras curvas ou em regiões de apoio de vigas em pilares aparecem acréscimos dessas pressões de contato, que favorecem a aderência por atrito. O coeficiente de atrito entre o aço e o concreto é alto, em função da rugosidade da superfície das barras de aço. Na Figura 2.5 a oposição à ação R_{b2} é constituída pela resultante das tensões de aderência (τ_b) distribuídas ao longo da barra de aço.

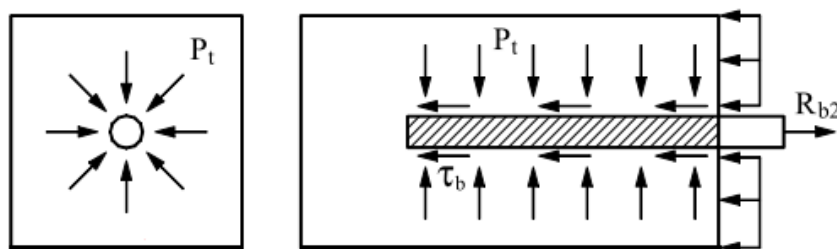


Figura 2.5 - Aderência por atrito (FUSCO, 1995).

Brisotto (2011) destaca que alguns pesquisadores, como Lutz e Gergeley (1967), consideram que esta parcela da aderência só existe para barras lisas. Eles argumentam que para barras nervuradas esta parcela não se desenvolve devido à presença das nervuras, que são imediatamente solicitadas quando a adesão é

perdida. Entretanto, a maioria dos pesquisadores admite que esta parcela exista, pelo menos teoricamente, para todas as configurações superficiais das barras de aço.

Segundo França (2004), nas barras lisas ocorre ruptura por arrancamento e a aderência ocorre principalmente devido à adesão química entre a pasta de cimento e a barra de aço. Quando a adesão química é rompida, surge uma resistência ao deslizamento devido ao atrito. Quando esta resistência se esgota, o fendilhamento não é generalizado, mas a barra é arrancada deixando um orifício quase intacto no interior do concreto (Figura 2.6).

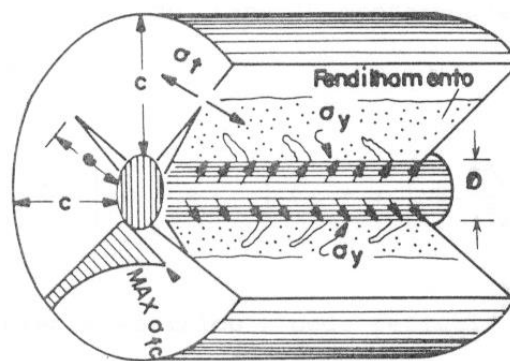


Figura 2.6 - Diagrama esquemático da deformação do concreto ao redor da barra de aço após a formação das fissuras internas causadas por tensões principais de tração (GOTO, 1971).

2.2.1.2. Tensão de aderência

A premissa básica para o bom desempenho de peças de concreto armado é a existência da aderência entre o aço e o concreto, a qual permite que ambos os materiais resistam solidariamente aos esforços a que forem submetidos. É esta propriedade que possibilita a transferência de esforços entre os materiais e a compatibilidade de deformações entre eles e, ainda, serve para impedir o escorregamento da armadura nos segmentos entre fissuras, limitando a abertura dessas (SILVA, 2015; BRISOTTO, 2011; ROSSI, 2002; BARBOSA, 2001; FERNANDES, 2000; DUCATTI, 1993). Segundo Dumêt e Pinheiro (2007), essa transferência de esforços é garantida pela aderência existente entre o aço e o concreto. Fernandes (2000) destaca que uma das principais contribuições da aderência para o concreto armado é garantir uma boa capacidade de utilização da estrutura, por meio da limitação da abertura de fissuras e uma melhor distribuição

dessas ao longo da peça, podendo evitar flechas excessivas e rupturas localizadas.

De acordo com Leonhardt e Monnig (1977), a aderência em peças de concreto armado surge sempre que houver variação de tensões em determinado trecho das barras de aço. As principais causas dessas variações de tensões são: ações externas, fissuras, forças de ancoragem nas extremidades das barras, variações de temperatura, retração do concreto e deformação lenta, entre outras.

O modelo do comportamento da aderência entre o concreto e o aço é representado pela relação entre a tensão de aderência e o deslizamento, em que a tensão de aderência corresponde à tensão de cisalhamento na interface entre a barra de aço e o concreto, e o deslizamento é o deslocamento relativo entre a armadura e o concreto, ocorrido pela diferença entre as deformações específicas do aço e do concreto (DUCATTI, 1993).

Segundo Brisotto (2011), Barbosa (2001) e Fernandes (2000), a tensão de aderência pode ser definida como sendo a relação entre a força atuante na barra de aço e a superfície dessa barra aderente ao concreto. Dumêt e Pinheiro (2007) descrevem o mecanismo de desenvolvimento da tensão de aderência a partir das equações de equilíbrio abaixo (Figura 2.7).

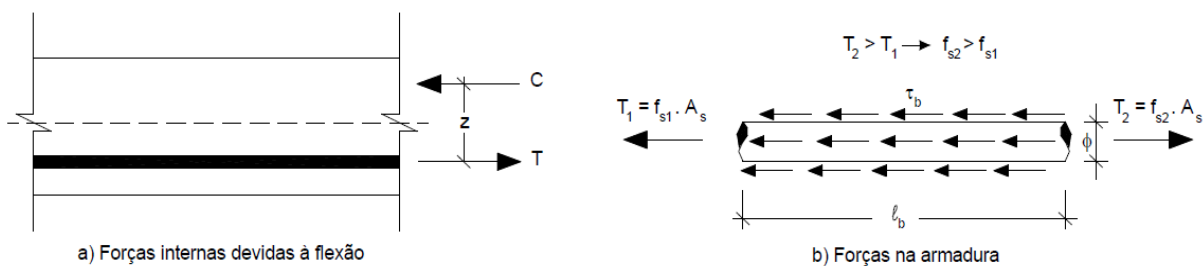


Figura 2.7 - Surgimento da tensão de aderência (DUMÊT e PINHEIRO, 2007).

Para que a armadura não deslize, é necessário que apareça uma força de aderência (F_{ader}) que equilibre a diferença ($T_2 - T_1$). Montando-se a equação de equilíbrio para as forças horizontais, tem-se:

$$T_2 = T_1 + F_{ader}$$

$$F_{ader} = \tau_b \cdot A_{lat}$$

$$A_{lat} = \pi \cdot \phi \cdot l_b$$

$$\begin{aligned}
A_s &= \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \\
f_{s2} \cdot A_s &= f_{s1} \cdot A_s + \tau_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot l_b \\
\Delta f_s = f_{s2} - f_{s1} &= \frac{4 \cdot \pi \cdot \phi \cdot l_b \cdot \tau_b}{\pi \cdot \phi^2} = \frac{4 \cdot l_b \cdot \tau_b}{\phi} \\
\tau_b &= \frac{\Delta f_s \cdot \phi}{4 \cdot l_b}
\end{aligned} \tag{1}$$

onde,

A_{lat} = área de atuação de τ_b ;

A_s = área da seção transversal da armadura;

C = forças de compressão;

F_{ader} = força de aderência;

f_{si} = tensão na armadura;

l_b = comprimento da ancoragem reta;

T_i = forças de tração;

τ_b = tensão de aderência;

z = braço de alavanca interno;

ϕ = diâmetro da barra (armadura).

Se a armadura estiver submetida à tensão constante ($\Delta f_s = 0$), a peça já se encontra em equilíbrio, não havendo necessidade da atuação da força de aderência. Porém, sempre que houver a variação de tensão ($\Delta f_s \neq 0$), precisa-se da força de aderência para que a armadura não deslize em relação ao concreto e possa ser feita a transferência dos esforços (DUMÊT e PINHEIRO, 2007).

A tensão de aderência entre o reparo e o substrato pode ser avaliada por meio de métodos que introduzam um ou mais esforços solicitantes à interface entre os dois materiais. A zona de transição é o elo mais frágil em um sistema de reparo e, quando sob carga, a fratura tende a ocorrer nesta região, independentemente das condições de temperatura e umidade (RASHID *et al.*, 2015). A hidratação do cimento e a microestrutura têm influência significativa na tensão de aderência. A perda de água da matriz, decorrente da absorção pelo substrato, resulta em redução da porosidade e, conseqüentemente maior resistência de aderência na interface (ZHOU *et al.*, 2016).

2.3. Materiais utilizados em reparo de estruturas de concreto

Reparos em concretos deteriorados são essenciais, não apenas para garantir a vida útil das estruturas, mas também para garantir a segurança e a capacidade de serviço. A seleção de materiais de reparo adequados para o concreto requer compreensão da compatibilidade entre o substrato e os materiais de reparo, bem como do comportamento dos materiais em condições de exposição (LEE *et al.*, 2007).

Existem diversos materiais no mercado que podem ser usados em reparo e/ou reforço de estruturas de concreto, a depender do tipo e extensão da recuperação pretendida. Cánovas (1994) e Ribeiro (2009) classificam esses materiais em três grandes grupos:

- a. materiais de base inorgânica: à base de materiais inorgânicos tradicionais (fundamentalmente o aglomerante é o cimento Portland, como é o caso do concreto convencional) ou não tradicionais (como é o caso da argamassa geopolimérica);
- b. materiais de base orgânica: à base de materiais como resinas epoxídicas, poliésteres e poliuretanos;
- c. materiais de base mista: a partir da mistura de dois materiais classificados anteriormente.

Helene (1992) sugere que a escolha dos materiais e técnicas de correção estejam coerentes com o diagnóstico e as exigências de funcionamento, citando, como exemplo, casos onde os elementos estruturais tenham necessidade de ser colocados sob carregamento após algumas horas de execução da correção, provavelmente será necessário o uso de sistemas de base epóxi ou poliéster. Havendo prazos mais dilatados, ou seja, dias, pode ser conveniente o uso de argamassas ou grautes de base mineral. Em casos de condições normais de solicitação, ou seja, pelo prazo superior ou igual a vinte e oito dias para submeter a estrutura ao carregamento, os materiais podem ser argamassas e concretos adequadamente dosados. Souza e Ripper (1998) sugerem que um bom princípio, em termos de qualidade e economia, é o de repor concreto são, onde era suposto que este assim existisse.

Os materiais de reparo, em geral, são classificados como: materiais com função estrutural e materiais sem função estrutural. Os primeiros irão participar ativamente da nova capacidade estrutural que o elemento irá adquirir após o reparo. Dos sem

função estrutural, exige-se apenas estabilidade e capacidade de proteção das armaduras.

2.3.1. Materiais convencionais para reparo de estruturas de concreto

Os materiais mais utilizados em reparos de estruturas de concreto convencional são: argamassas, grautes e concretos. As suas principais características são apresentadas a seguir.

2.3.1.1. Argamassas

Mazza (2010) afirma que o reparo com argamassas, tanto para áreas com superfícies pequenas quanto grandes, não deve atingir profundidade maior que 5,0 centímetros. Elas, geralmente, são utilizadas para o enchimento de falhas e regularização de elementos estruturais. Os tipos de argamassa para esta finalidade são: de cimento e areia; seca (“farofa”); poliméricas, com adição de resina sintética polimérica; epoxídica, aquela em que o aglomerante é uma resina epoxídica; entre outras.

A compatibilidade estrutural e mecânica entre as argamassas de reparo e o substrato foi analisada por Morgan (1996), definindo dois tipos de reparo: não estrutural, em que a capacidade de suporte de carga não é uma consideração importante para a reparação; e o estrutural, em que a adesão do reparo é necessária para o desempenho da estrutura requerida pelo concreto removido. Os requisitos para reparos estruturais são diferentes e mais complexos do que para não estruturais. Alguns requisitos para a compatibilidade dos materiais de reparo são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas típicas para argamassas de reparo (modificada de MORGAN, 1996).

Propriedades	Argamassas de reparo à base de:		
	Cimento Portland	Cimento Portland e polímeros	Resina epóxi
Resistência à compressão (MPa)	20,0 – 70,0	10,0 – 60,0	55,0 – 110,0
Resistência à tração (MPa)	1,5 – 3,5	2,0 – 8,0	9,0 – 29,0
Módulo de elasticidade (GPa)	20,0 – 30,0	1,0 – 30,0	0,5 – 20,0

2.3.1.2. Grautes

Segundo Helene (1992), o graute é um material fluido e autoadensável no estado recém-misturado, formulado para preencher cavidades e, subsequentemente, tornar-se aderente, resistente e sem retração no estado endurecido. Pode ser classificado em:

- grautes de base mineral: são constituídos de cimento Portland CP 32, CP 40 ou ARI, agregados selecionados de granulometria adequada, aditivos expansivos (visando compensar a retração) e aditivos superplastificantes (para proporcionar alta fluidez ao produto e aumentar a aderência do material ao substrato). Os grautes podem receber adições de polímeros, que têm como função: reduzir a permeabilidade e melhorar a aderência ao substrato.
- grautes de base orgânica: os mais utilizados são à base de resina, combinados com endurecedores à base de aminas e poliamidas, com agregados de granulometria adequada. Normalmente, possuem elevada resistência mecânica e química, tendo sua aplicação favorecida em ambientes de alta agressividade.

Os grautes têm como principal atrativo a fácil aplicação, a elevada resistência mecânica e a ausência de retração. São recomendados para reparos em geral, inclusive subaquáticos, reforços estruturais, preenchimento de cavidades, bases de equipamentos, ancoragem de chumbadores e injeção de fissuras. São autonivelantes, com elevada fluidez, não retráteis, apresentando altas resistências iniciais e finais, e com demais especificações estabelecidas pelos fabricantes. Apesar do custo elevado, são indicados para casos de alta solicitação mecânica, elevada agressão química e

necessidade de entrada rápida em carga (REIS, 2001).

2.3.1.3. Concretos

Os reparos em que se utiliza concreto convencional consistem na substituição do concreto defeituoso ou deteriorado por outro de boa qualidade e que tenha a maior compatibilidade possível com o concreto antigo.

O concreto convencional deve ter dosagem que considere as diferenças de retração entre o concreto a ser aplicado e o concreto existente na peça a recuperar. Os traços muito ricos em cimento devem ser evitados, pois apresentam grande retração. Aditivos plastificantes, superplastificantes e expansores devem ser empregados de forma a permitir adequação às necessidades do serviço (REIS, 2001).

Segundo Fusco (1995), o concreto de reposição deverá ter resistência no mínimo igual à do concreto existente na estrutura, possuir granulometria e diâmetro máximo dos agregados compatíveis com o serviço, além de apresentar trabalhabilidade conveniente, a qual sempre poderá ser melhorada com o uso de aditivos fluidificantes.

Esta técnica é usualmente aplicada aos casos de preenchimento de vazios ou de ninhos de agregados nos elementos estruturais de estruturas recém-construídas, ou ainda em estruturas deterioradas, desde que a extensão das falhas ou danos atravesse a seção do elemento, ou pelo menos se estendam para além das armaduras (ALTUN, 2004; VAZ, 2013; GUERRANTE, 2013).

2.3.2. Materiais não convencionais para reparo de estruturas de concreto

Nos últimos anos, foram realizados diversos estudos sobre materiais e tecnologias de reparo a fim de aumentar a vida útil das estruturas do concreto. Liu *et al.* (2008) usou microconcreto composto de cimento, areia, pó de quartzo, microssílica, superplastificante e água como material de reparo para rachaduras e poros em concreto. O microconcreto como material de reparo também foi considerado por Dawood e Ramli (2014) como promissor. Qiao *et al.* (2010) demonstraram que a argamassa produzida com cimento de fosfato de magnésio apresentou desempenho superior à argamassa comum de cimento Portland e poderia ser utilizada em reparos

e manutenção de concretos. Qian *et al.* (2014) também avaliaram a aderência de argamassas produzidas com cimento de fosfato de magnésio como materiais de reparo. Petcherdchoo (2015) concluiu que a aumento da quantidade de cinzas volantes em concreto de reparo pode estender a vida útil das estruturas de concreto expostas a cloretos. Kobayashi *et al.* (2010) considerou o compósito com cimento de alto desempenho reforçado com fibra de aço como material de reparo e efetivamente suprimiu a penetração de cloreto e impediu a corrosão da armadura. Wu *et al.* (2015) propuseram um material de reparo de fissuras à base de polímero e concluíram que o material possuía grande potencial para reparar fissuras de concreto.

No entanto, os relatos se concentram principalmente em materiais de reparo baseados em cimento Portland e o principal problema resolvido foi a aderência entre o substrato e material de reparo, que foi melhorado por aspectos de densificação da microestrutura, refinamento dos poros, ajuste das condições de cura e proporções de mistura ou utilização de aditivos minerais (DUAN *et al.*, 2016).

O avanço tecnológico com a utilização de materiais não convencionais aponta a necessidade de aprofundamento de estudos no que concerne à terminologia, requisitos, métodos de ensaio e procedimentos para projeto e execução. BEBER (2003) menciona algumas opções de tecnologias que podem ser aplicadas no reforço e/ou reparo de estruturas. Entre as principais estão: técnica de reforço ou reparo que envolve a aplicação de materiais compósitos, mais especificamente os compósitos de fibra de carbono que, diferentemente do aço, não são afetados pela corrosão eletroquímica e resistem aos efeitos corrosivos de ácidos, álcalis e outros agentes agressivos.

Outro material que pode ser utilizado em reparo de estruturas de concreto armado são os materiais geopoliméricos. Os geopolímeros são materiais pertencentes à família de aglomerantes minerais, com estrutura que consiste de um polímero Si-O-Al semelhante à encontrada nas zeólitas (DAVIDOVITS, 1979). A conceituação e as propriedades dos geopolímeros são descritas nos itens a seguir.

2.3.2.1. Geopolímeros

Na década de 80, o pesquisador Joseph Davidovits apresentou a tecnologia da geopolimerização como um processo ecológico e inovador para a produção de

materiais com potencial para substituir aqueles fabricados com cimento Portland, com propriedades mecânicas e durabilidade superiores (ABDULKAREEM *et al.*, 2014). A síntese dos geopolímeros baseia-se na ativação alcalina de algum material aluminossilicato (rico em Si e Al) amorfo com uma solução ativadora alcalina (silicatos e/ou hidróxidos) em uma temperatura relativamente baixa (HARDJITO e RANGAN, 2005).

O mecanismo de reação do geopolímero ou geopolimerização se dá pelo fenômeno exotérmico, devido à policondensação. Envolve a dissolução inicial, em que a solução alcalina não só hidrolisa a superfície do mineral, mas também dissolve uma pequena quantidade de Al e Si. Estes reagem com os íons silicatos já dissolvidos e polimerizam, por reações de condensação, formando um gel que é transformado na estrutura final (VAN JAARVELD *et al.*, 1998). O material formado pode ser usado como aglutinante para ligar diversos tipos de agregados e formar argamassas ou concretos. Alguns estudos relatam que os geopolímeros têm elevada resistência mecânica inicial, baixa permeabilidade, excelente resistência a produtos químicos e capacidade para imobilizar íons de metais pesados em sua estrutura (LI *et al.*, 2004; WALLAH e RANGAN, 2006; GOURLEY e JOHNSON, 2005).

Os geopolímeros são também conhecidos por polissialatos (grande cadeia molecular constituída de silício, oxigênio e alumínio), sendo sialato uma abreviação para sílico-óxido-aluminato. Os polissialatos podem ser distinguidos em: PS → poli(sialato), PSS → poli(sialato-siloxo) e PSDS → poli(sialato-disiloxo), a depender da relação Si/Al, como mostra a Figura 2.8 (KOMNITSAS *et al.*, 2007).



Figura 2.8 - Tipos de geopolímero em função da relação Si/Al (KOMNITSAS, 2007).

Segundo Davidovits (1991), os geopolímeros não têm composição estequiométrica definida e compreendem estruturas amorfas a semicristalinas, sendo sua fórmula empírica descrita conforme a Equação 2:



onde, M é um íon positivo (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^+ , Ba^+ , NH_4^+ , H_3O^+), n significa o grau de policondensação, w possui um valor em torno de 7 e “-“ indica a presença de uma ligação (DAVIDOVITS, 1991). O z é 1, 2 ou 3 em função da relação Si/Al.

O geopolímero adquiriu posição significativa na indústria da construção e um grande número de pesquisadores estuda sua utilização como material de reparo em elementos de concreto (LASKAR e TALUKDAR, 2017). Barros *et al.* (2012) afirma que os geopolímeros são materiais alternativos que podem ser produzidos com resíduos industriais, mantendo propriedades termomecânicas eficientes, o que permite seu uso tanto em estruturas como em compósitos.

No Brasil, desde a década de 90, vários pesquisadores estudam estes materiais nas mais diversas aplicações, como pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Cronologia de alguns estudos sobre materiais geopoliméricos no Brasil.

Autor	Ano	Descrição
Da Costa	1996	Resistência de materiais compósitos ao impacto balístico
Barbosa	1999	Síntese e caracterização de polissialatos
Silva	2000	Reforço e fratura em compósitos de matriz álcali-ativada
Thomaz	2000	Concreto geopolimérico
Dias	2001	Cimentos geopoliméricos: estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura
Cuiabano	2002	Efeito da temperatura nas propriedades do cimento geopolimérico
Lima	2004	Caracterização micro e nanoestrutural de compósitos geopoliméricos metacauliníticos
Santana	2004	Estudo da aderência entre concretos de diferentes idades
Souza	2005	Geopolímeros à base de resíduos industriais
Pereira	2006	Concreto de cimento geopolimérico reforçado com fibras de aço para pavimentação
Silva	2006	Comportamento do concreto geopolimérico para pavimento sob carregamento cíclico
Soares	2006	Aço-concreto geopolimérico: correlação entre tensão de aderência e comprimento de ancoragem
Pinto	2007	Ativação de pastas geopoliméricas com tetraborato de sódio e látex não iônico para cimentação de poços de petróleo
Bigno	2008	Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais
Skaf	2008	Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos
Mauri	2009	Estudo da degradação de argamassa geopolimérica por sulfato de cálcio, de sódio e de magnésio
Melo	2011	Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos
Boca Santa	2012	Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel
Nagem	2013	Geopolímero a partir de resíduos oriundos da indústria de alumínio para reutilização e coprocessamento
Felizardo <i>et al.</i>	2016	Desenvolvimento de geopolímeros de baixa condutividade térmica
Goliath	2017	Comportamento de colunas curtas reforçadas com compósitos de resina geopolimérica e fibras de carbono
Rocha	2017	Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação da temperatura

2.3.2.1.1. Precursores e ativadores

Na produção dos geopolímeros são utilizados basicamente um precursor (fonte de aluminossilicato) e uma solução ativadora alcalina. O precursor deve apresentar uma quantidade considerável de material amorfo e o ativador um pH alto suficiente para dissolver a parcela amorfa do precursor (LONGHI, 2015). Em geral, são utilizados como fonte de aluminossilicatos argilas calcinadas (metacaulinita), cinzas volantes e escórias diversas. Já como ativador, uma solução composta por silicatos e/ou hidróxidos de Na⁺, K⁺ e Ca⁺.

Na ativação de materiais aluminossilicatos, como a metacaulinita, a natureza da solução ativadora desempenha papel fundamental na determinação do desempenho mecânico. A concentração de NaOH na fase aquosa do sistema geopolimérico atua no processo de dissolução e na ligação de partículas sólidas da estrutura final (SOMNA *et al.*, 2011).

2.3.2.1.2. Resistência à compressão dos geopolímeros

A resistência à compressão dos geopolímeros é indicador de um processo de geopolimerização bem-sucedido (PROVIS *et al.*, 2005). Os geopolímeros são materiais que podem alcançar ganhos elevados de resistência nas primeiras idades (SHAO *et al.*, 2015). Mehta e Siddique (2017) afirmaram que os concretos geopoliméricos atingem aos 3 dias 92% e aos 7 dias 97% da resistência à compressão aos 28 dias. Ranjbar *et al.* (2016) sugerem que os geopolímeros tem grande potencial na indústria de pré-moldados, devido a sua alta resistência inicial.

2.3.2.1.3. Trabalhabilidade dos geopolímeros

Estudos realizados por Torgal (2007) e Ranjbar *et al.* (2016) apontaram baixa trabalhabilidade apresentada pelos geopolímeros, atribuída principalmente à sua alta viscosidade.

Trindade (2017) obteve argamassas geopoliméricas com boas consistências quando comparados com as sugestões apresentadas na literatura com relação à trabalhabilidade de geopolímeros. As matrizes constituídas por sílica ativa e escória

de alto-forno foram consideradas de alta trabalhabilidade, enquanto a matriz composta 100% por metacaulinita apresentou consistência entre rígida e moderada. Foi observado que, à medida que se diminui a proporção de metacaulinita com relação à sílica ativa e/ou escória de alto-forno, a matriz passa a necessitar de um volume maior de água na solução ativadora, tornando a mistura mais fluida. Outro fator importante a ser considerado é que a metacaulinita também tem o poder de incorporar grande quantidade de água presente na mistura.

Yaseri *et al.* (2017) afirmam que a trabalhabilidade dos geopolímeros é muito dependente das características das matérias-primas, como, por exemplo, a forma das partículas do precursor. A estrutura em forma de placas do metacaulim provoca redução da fluidez, que conduz a uma fricção interpartículas (HEAH *et al.*, 2008). Além disso, a utilização de soluções ativadoras multicompostas (NaOH + Na₂SiO₃) elevam a viscosidade em comparação com solução do tipo NaOH (NEMATOLLAHI e SANJAYAN, 2014), sendo também uma característica determinante.

2.3.2.1.4. Tempo de pega dos geopolímeros

A relação SiO₂/Al₂O₃ tem influência no tempo de pega; quanto maior a razão, maior o tempo de pega. Este fato sugere que o teor de hidróxido de sódio tenha uma influência crucial neste parâmetro. Isso porque, com aumento da relação SiO₂/Al₂O₃, há redução do teor de álcali na solução ativadora. Isto implica dizer que o tempo de pega é principalmente controlado pela concentração do álcali e, em segundo lugar, pelo teor de sílica solúvel ou água (BALCZÁR, 2015).

2.3.2.1.5. Microestrutura dos geopolímeros

O desenvolvimento da microestrutura de geopolímeros depende das características da matéria-prima e parâmetros do processo, especialmente concentração alcalina e temperatura de cura (NATH e SARKER, 2016).

Análises por microscopia eletrônica de varredura revelaram que o cimento geopolimérico possui microestrutura mais compacta em relação ao cimento Portland. Esta menor porosidade melhora não somente as propriedades mecânicas, mas também a durabilidade do material. O cimento geopolimérico também apresentou uma

rede de poros capilares bem descontínua, o que proporciona maior resistência à penetração de agentes externos, que são a base dos fenômenos de hidrólise, de lixiviação ou de expansão, que prejudicam o concreto exposto a determinados tipos de ambientes agressivos (DIAS, 2001).

2.3.2.1.6. Geopolímeros e elevadas temperaturas

Os geopolímeros têm sido alvo de diversas pesquisas nos últimos anos devido à sua excelente resistência ao fogo, estabilidade térmica e baixa retração (SHAO *et al.*, 2015).

Zhang *et al.* (2015) estudaram a resistência de aderência de geopolímeros a elevadas temperaturas numa faixa de temperatura de 20 a 300°C. Os resultados da pesquisa mostraram que os geopolímeros apresentaram resistência de aderência ligeiramente menor que a resina epóxi à temperatura ambiente. No entanto, alcançaram resistências de aderência muito superiores na faixa de 100 a 300°C.

Rocha (2017) estudou o comportamento mecânico residual de argamassas geopoliméricas produzidas com metacaulinita e uma ampla combinação de silicatos e hidróxidos de sódio e potássio, quando expostas a elevadas temperaturas. O comportamento mecânico residual foi bastante influenciado pela microestrutura. As argamassas com microestrutura mais densas (aquelas produzidas com silicato de potássio) apresentaram menores perdas de resistência mecânica e de módulo de elasticidade longitudinal. Todas as argamassas sofreram grandes perdas de massa entre 100 e 300°C, devido à perda de água livre presente nos poros, água combinada quimicamente e dos grupos hidroxila. As argamassas que tiveram o pior desempenho mecânico foram as que tiveram as maiores perdas de massa.

2.3.2.1.7. Geopolímeros e aderência

Alguns estudos têm analisado a possibilidade de utilização de geopolímeros como um material alternativo para reparo de estruturas, por meio de ensaios como cisalhamento direto e inclinado e *pullout*, a fim de avaliar a aderência com o material de substrato e o aço. Dias (2001) verificou a tensão de aderência entre barras lisas de aço e concretos geopoliméricos. A tensão média de aderência obtida a partir de

ensaios de arrancamento de barras lisas de aço embutidas em blocos de concreto de cimento geopolimérico foi 515% (quinhentos e quinze por cento) superior àquela apresentada pelo concreto de cimento Portland.

Soares (2006), correlacionou a tensão de aderência de barras nervuradas de aço com o comprimento de ancoragem em concretos de cimento Portland e geopolimérico. Pela excelente aderência do geopolímero ao aço, o autor concluiu que é possível reduzir à metade o comprimento de ancoragem para o concreto geopolimérico em relação ao convencional.

Heah *et al.* (2008) estudaram a resistência de aderência entre uma argamassa utilizada como substrato e o geopolímero. Foram utilizados corpos de prova prismáticos de argamassa unidos por geopolímeros e por uma argamassa de cimento Portland. Os resultados mostraram que o geopolímero apresentou resistência de aderência superior à da argamassa de cimento Portland.

Pacheco-Torgal *et al.* (2008) determinaram a resistência de aderência entre um substrato de concreto e uma argamassa geopolimérica produzida com resíduo de mina de tungstênio contendo hidróxido de cálcio. Foi observado que as argamassas geopoliméricas tinham resistência de aderência superior, mesmo nas idades iniciais, em comparação com os produtos de reparo comercial.

O estudo de Mazza (2010) teve como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico e a aderência entre um concreto convencional e argamassas de reparo. Para isso realizou ensaios de tração na flexão em vigas maciças de concreto com entalhe trapezoidal preenchido com dois tipos de argamassas geopoliméricas e um graute comercial. As argamassas geopoliméricas A100 e A150 possuíam resistência à compressão de 26,4 e 34,3 MPa, respectivamente. Enquanto que o graute comercial possuía 30,1 MPa. Os resultados apontaram desempenho mecânico mais satisfatório das vigas reconstituídas com as argamassas geopoliméricas devida à melhor aderência destes materiais ao concreto convencional.

Songpiriyakij *et al.* (2011) avaliaram a resistência de aderência entre o aço e o substrato usando uma pasta de geopolímero como ponte de aderência. Relataram que as resistências de aderência das pastas geopoliméricas produzidas com cinza da casca do arroz e microssílica foram aproximadamente 1,5 vezes maiores que as de materiais epoxídicos. Portanto, estes autores concluíram que a resistência de

aderência de materiais geopoliméricos é suficientemente alta e estes podem ser usados como material alternativo em reparo de estruturas.

Zhang *et al.* (2015) mencionam que a aderência dos geopolímeros é altamente dependente dos seus materiais constituintes, fabricação e condições de cura. Embora o efeito desses parâmetros na resistência de aderência à temperatura ambiente seja indiretamente considerado em poucos estudos.

Phoo-ngernkham *et al.* (2015) investigaram a utilização de argamassas geopoliméricas (GPM) com elevados teores de cálcio, produzidas com cinzas volante e cimento Portland, para uso como material de reparo de concreto convencional de cimento Portland (PCC). A resistência de aderência ao cisalhamento entre o substrato (PCC) e a argamassa de reparo e a resistência à flexão foram utilizadas para avaliar o desempenho da GPM e de cinco argamassas comerciais (RM). Os resultados dos ensaios indicaram que o uso das GPM proporcionou resistência à flexão e de aderência ao cisalhamento suficientemente alta em comparação com as RM, sugerindo que possam ser usadas como produto alternativo para reparo de concreto. Além disso, os resultados de microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura indicaram que a zona de interface entre o concreto e as GPM foi mais homogênea e mais densa que a entre o concreto e as RM (Figura 2.9). Os resultados mostraram que o desempenho das GPM contendo cimento Portland e altas concentrações de cálcio foi ao menos igual ao material comercial, de acordo com os ensaios de aderência ao cisalhamento e de flexão em vigas entalhadas.

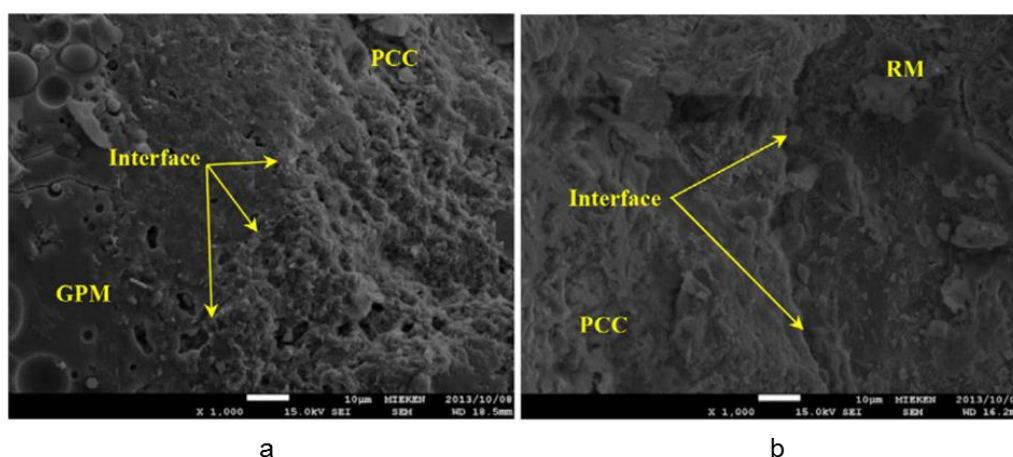


Figura 2.9 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre: a) argamassa geopolimérica (GPM) e substrato (PCC); b) argamassa comercial (RM) e substrato (PHOO-NGERNKHAM *et al.*, 2015).

Duan *et al.* (2016) desenvolveram um material geopolimérico para reparo de concreto de pavimentação ou como revestimento para proteção de concreto em ambiente marinho. A fim de investigar a aderência entre o material de reparo e o substrato de argamassa de cimento Portland, análises por MEV foram realizadas (Figura 2.10). A micrografia revela a microestrutura densa do material de reparo geopolimérico e a zona de interface entre os dois materiais (Figura 2.10a), o que levou à alta resistência à compressão do material de reparo devido aos géis típicos dos geopolímeros (Figura 2.10b).

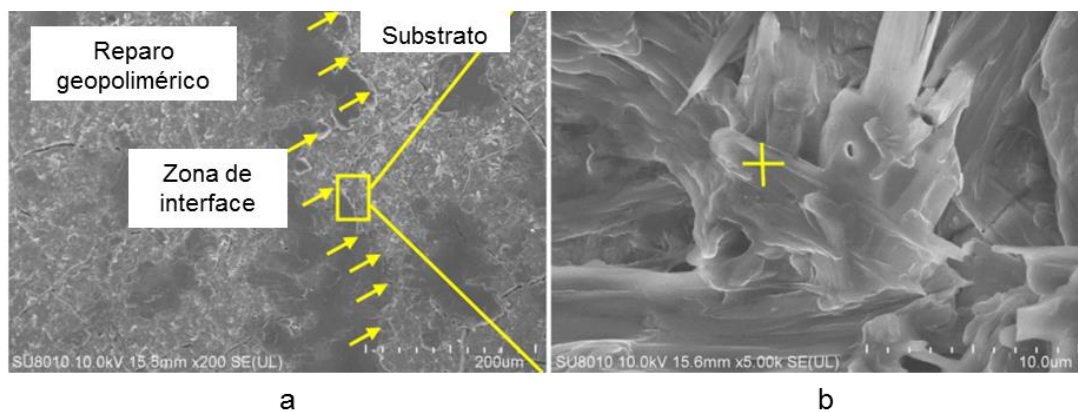


Figura 2.10 - MEV: (a) Aderência entre o material de reparo geopolimérico e o substrato de argamassa de cimento Portland; (b) Géis típicos dos geopolímeros (DUAN *et al.*, 2016).

2.4. Ensaios experimentais para determinação da aderência

Existem vários ensaios experimentais que permitem avaliar e/ou determinar a resistência de aderência entre o concreto e o aço; e entre o concreto (substrato) e o material de reparo. Nesta tese foram adotados alguns destes em função da simplicidade de execução e do baixo custo, dentre eles: ensaio de tirante de concreto (ABNT NBR 7477, 1982), ensaio de resistência à tração na flexão (ABNT NBR 12142, 2010) e ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (AFNOR NF P18-851, 1992). Os ensaios são descritos nos itens a seguir.

2.4.1. Ensaio de conformação superficial ou ensaio de tirante de concreto

Este ensaio consiste em exercer um esforço de tração nos extremos de uma barra embutida no centro de um corpo de prova prismático de concreto (Figura 2.11),

com objetivo de avaliar a aderência entre o concreto e o aço. Em geral, este ensaio é usado para se estudar a fissuração, simular a zona de transição entre duas fissuras de flexão e determinar o coeficiente de conformação superficial da barra (BARBOSA, 1998; BARBOSA, 2001; FRANÇA, 2004; OLIVEIRA, 2006; COSTA, 2012; SOUZA, 2015; SILVA, 2015).

De acordo com ABNT NBR 7477 (1982), a determinação do coeficiente de conformação superficial é feita por meio de ensaio de fissuração em tirantes de concreto, armados com uma única barra ou fio. Enquanto barras lisas apresentam fissuras de maior abertura e mais afastadas entre si, barras nervuradas apresentam fissuras mais próximas e com menor abertura.

O afastamento (e_i) entre as fissuras permite a determinação do coeficiente de conformação superficial por meio da Equação 3, conforme ABNT NBR 7477 (1982).

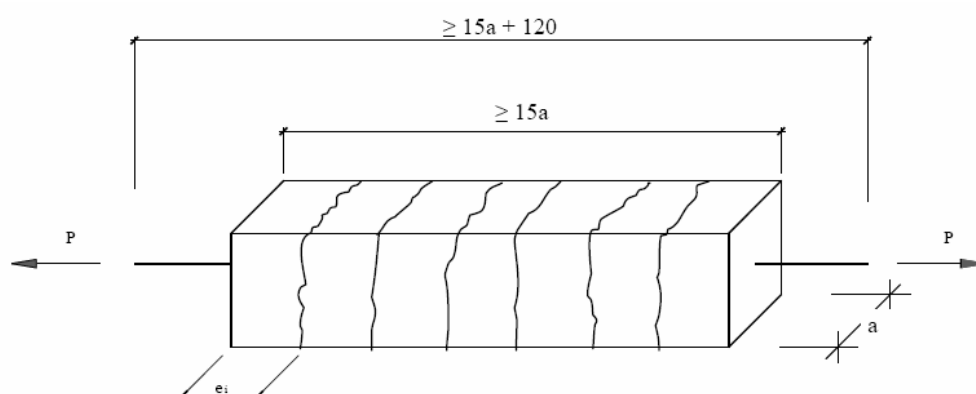


Figura 2.11 - Esquema do corpo de prova para o ensaio de tirante, dimensões em mm (FRANÇA, 2004).

$$\eta = \frac{2,25 \cdot a}{\Delta l_{m\u00e9dio}} \quad (3)$$

onde,

η = coeficiente de conformação superficial (adimensional);

a = lado da seção do tirante;

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

n = n\u00famero de fissuras.

Castro (2000), citado por Barbosa (2001), Oliveira (2006), Fran\u00e7a (2004) e Beiral (2012), formulou um modelo muito referenciado em trabalhos cient\u00edficos no

Brasil. A partir do cálculo do espaçamento médio entre as fissuras obtidas no ensaio de tirante, determina-se a tensão média de aderência das barras ou fios de aço em concretos de diferentes classes de resistência aplicando-se a Equação 4.

$$\tau_m = 0,375 \cdot \frac{f_{ct} \cdot \phi}{\Delta l_{m\u00e9dio} \cdot \rho} \quad (4)$$

onde,

τ_m = tensão média de aderência (MPa);

$f_{ct} = 0,9 \times f_{ct,sp}$ (resistência à tração simples do concreto, em MPa);

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração indireta, medida no ensaio de tração por compressão diametral;

$\Delta l_{m\u00e9dio}$ = distância média entre fissuras (mm);

ϕ = diâmetro da barra (mm);

$\rho = A_s / A_c$;

A_s = área de aço da seção transversal (mm²);

A_c = área de concreto da seção transversal (mm²).

A ABNT NBR 6118 (2014) prescreve a seguinte equação (Equação 5) de resistência de aderência de cálculo entre aço e concreto na ancoragem de armaduras passivas:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (5)$$

sendo,

f_{bd} = 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;

$\eta_3 = (132 - \phi)/100$, para $\phi \geq 32$ mm;

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

Para a ABNT NBR 6118 (2014), a capacidade aderente entre o aço e o concreto está relacionada ao coeficiente η_1 . A norma considera em boa situação quanto à aderência os trechos das barras que estejam em uma das seguintes posições: a) com inclinação maior que 45° sobre a horizontal; b) horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, desde que: para elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima; para elementos estruturais com $h \geq 60$ cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

Uma adaptação da ABNT NBR 6118 (2014) foi proposta por Silva (2015), que utilizou ensaios de tirantes para avaliar a aderência do concreto ao aço CA-50 por meio da Equação 6.

$$f_{bd} = \eta f_{ctd} \quad (6)$$

sendo,

f_{bd} = resistência de aderência;

η = coeficiente de conformação superficial;

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

A ABNT NBR 7480 (2007) faz exigências para valores mínimos de coeficientes de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Esses valores são mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Coeficiente de conformação superficial mínimo (η) para fios e barras de aço.

Categoria	Coeficiente de conformação superficial mínimo (η)	
	$\phi < 10 \text{ mm}$	$\phi \geq 10 \text{ mm}$
CA25	1,0	1,0
CA50	1,0	1,5
CA60	1,0	1,5

2.4.2. Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos

Para a realização deste ensaio, prescrito na norma ABNT NBR 12142 (2010), um corpo de prova de seção prismática é submetido à flexão com carregamentos em duas seções simétricas, até à ruptura (Figura 2.12). O ensaio também é conhecido por “carregamento nos terços”, pelo fato das seções carregadas se encontrarem nos terços do vão. O cálculo da resistência à tração na flexão é feito em função da localização da ruptura obtida.

O ensaio de tração na flexão é recomendado em estudos de vigas reforçadas por entalhes na base (GAVA *et al.*, 2004). Mazza (2010) utilizou este ensaio para analisar a aderência de argamassas de reparo ao substrato de concreto em vigas entalhadas no terço médio. O entalhe na viga cria uma menor seção transversal, induzindo o surgimento de fissuras nessa região. Essa configuração de ensaio induz o surgimento de uma única fissura em local pré-definido (GEOPALARATNAM e GETTU, 1995 *apud* GAVA *et al.*, 2004).

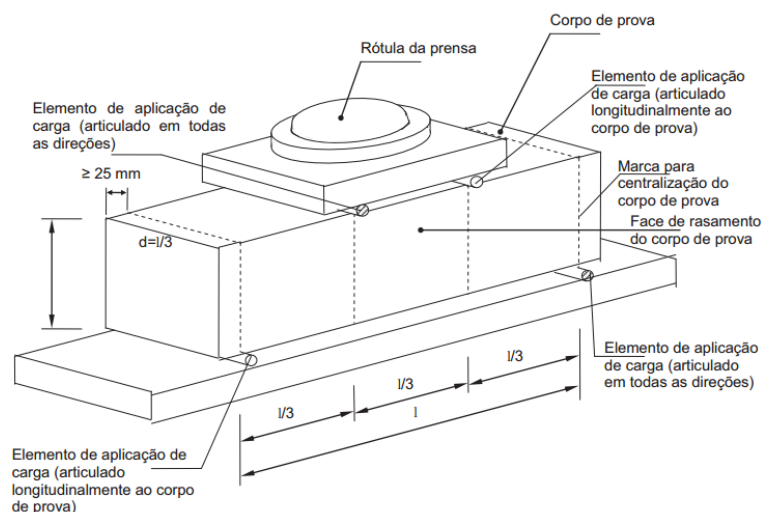


Figura 2.12 - Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos (ABNT NBR 12142, 2010).

2.4.3. Ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão

A AFNOR NF P18-851 (1992) estabelece um ensaio em que uma argamassa de reparo é aplicada em um entalhe trapezoidal, localizado na base de um prisma de

concreto (substrato). A configuração do ensaio está esquematizada na Figura 2.13.

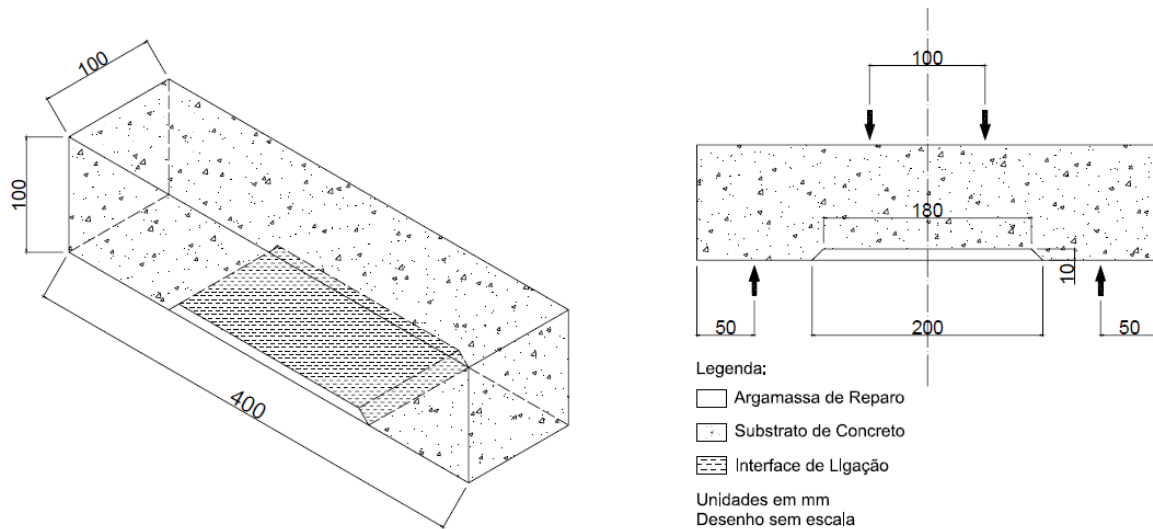


Figura 2.13 - Configuração do corpo de prova e do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (AFNOR NF P18-851, 1992). Esquema sem escala. Dimensões em mm.

Este ensaio é executado com a aplicação da carga por meio de dois cutelos superiores distantes 100 mm entre si e apoiado em outros dois cutelos distantes 300 mm entre si. A face reconstituída deve ser voltada para baixo, como preconiza a AFNOR NF P18-851 (1992). As vigas são analisadas no trecho entre as cargas, onde ocorre flexão pura.

Neste ensaio, o tipo de ruptura (Figura 2.14) é o parâmetro utilizado para a interpretação dos resultados. São cinco formas diferentes de ruptura, a saber:

- tipo C: ruptura apenas do concreto, sem comprometimento do sistema de reparo;
- tipo M: rompimento do reparo e propagação da fissura para o prisma de concreto, agindo de forma monolítica, ou seja, com a argamassa rompendo por tração na extremidade inferior da seção, com posterior propagação da fissura para o concreto;
- tipos I-1 e I-2: desprendimento da parte inclinada do reparo e desenvolvimento da fissura para o concreto. Nesses casos a ruptura se dá na região inclinada da reentrância, com conseqüente propagação da fissura para o concreto a partir da interface em sua região horizontal;
- tipo D: desprendimento do reparo e subsequente rompimento do concreto.

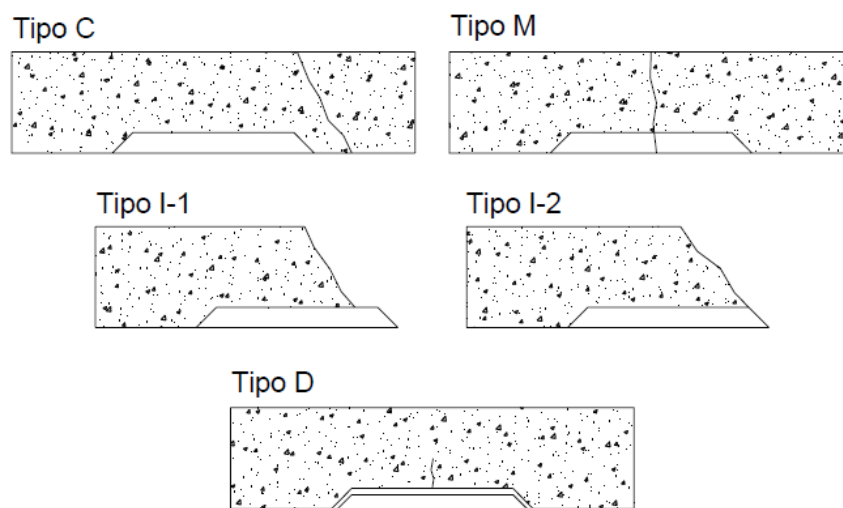


Figura 2.14 - Tipos de rupturas possíveis (AFNOR NF P18-851, 1992).

Moreno e Selmo (2007) consideram que a região horizontal centralizada da interface entre a superfície do concreto e a argamassa de reparo recebe um esforço de cisalhamento puro gerado pelo carregamento, enquanto que nas duas faces inclinadas da reentrância os esforços de cisalhamento e de tração são combinados.

Segundo Mazza (2010), caso o material de reparo tenha aderência muito baixa, destacando-se facilmente do concreto, a resistência da peça não será influenciada e apenas o concreto irá suportar a carga aplicada, rompendo a partir da fibra inferior do concreto, após o desprendimento do material de reparo. No caso da argamassa de reparo possuir aderência considerável, o concreto é favorecido e a peça pode suportar maiores solicitações. No entanto, como existem dois materiais distintos, com propriedades diferenciadas e também submetidos a esforços distintos, a argamassa com resistência à tração superior à do concreto pode aumentar a capacidade de suporte ou, caso contrário, reduzi-la, quando comparado com valores obtidos em corpos de prova compostos apenas de concreto.

2.5. Trabalhos anteriores sobre aderência

Neste item destacam-se alguns resultados experimentais de pesquisas com materiais geopoliméricos. Os trabalhos de Dias (2001), Soares (2006) e Mazza (2010) foram escolhidos por se tratarem de estudos relacionados à aderência de barras de aço lisas, nervuradas e reparo de vigas de concreto sem aço com geopolímeros,

respectivamente, como abordado nesta tese. E o trabalho de Ranjbar *et al.* (2016), por ser um estudo com vigas de concreto armado reparadas na zona de tração com concreto geopolimérico.

2.5.1. Dias (2001)

Dias (2001) verificou a tensão de aderência entre barras lisas de aço e concretos fabricados com cimento geopolimérico. O concreto utilizado tinha resistência à compressão igual a 50,6 MPa. Concretos fabricados com cimento Portland também foram usados como referência e apresentavam resistência à compressão igual a 32,5 MPa. A tensão média de aderência obtida a partir de ensaios de arrancamento de barras lisas de aço embutidas em blocos de concreto de cimento geopolimérico foi 515% (quinhentos e quinze por cento) superior àquela apresentada pelo concreto de cimento Portland comum, como mostra o Gráfico 2.1.

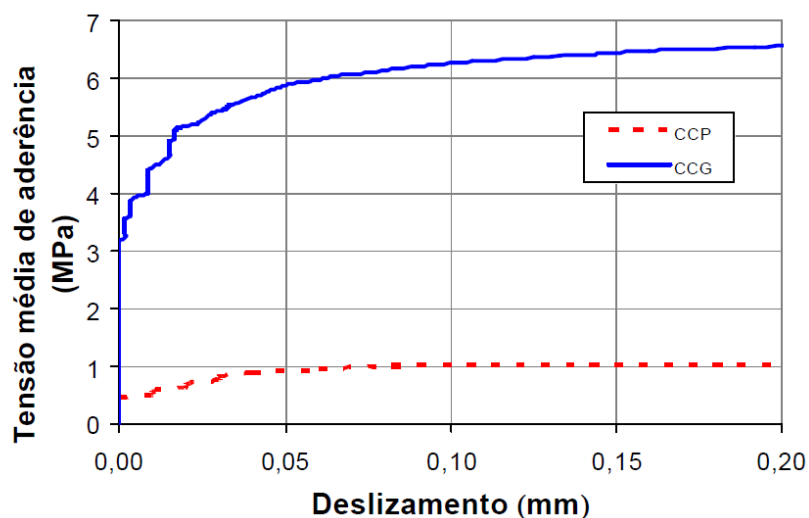


Gráfico 2.1 - Curvas tensão média de aderência do CCP (concreto com cimento Portland) e do CCG (concreto com cimento geopolimérico) em função do deslizamento relativo para barras lisas de aço (DIAS, 2001).

Técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 2.15), espectroscopia por dispersão de energia (EDS), calorimetria diferencial por varredura (DSC) e varredura em linha (LINESCAN) mostraram que a zona de transição aço-matriz do cimento geopolimérico possui propriedades físicas, bem como composição

química, bem diferente da zona de transição aço-matriz de cimento Portland. A zona de transição aço-matriz de cimento Portland apresentou-se mais fraca do que o restante da matriz, pois era mais rica em CH, Ca(OH)_2 (portlandita, fase menos resistente do cimento Portland) e pobre em C-S-H, silicato de cálcio hidratado (fase mais resistente do cimento Portland). Esta região também se apresentou mais porosa que o restante da matriz, com a matriz de cimento Portland conseguindo somente aderir em parte da superfície da barra de aço, diminuindo, assim, a capacidade de transferência de tensão.

Já a zona de transição aço-matriz de cimento geopolimérico apresentou porosidade semelhante ao restante da matriz, desenvolvendo desta maneira boa adesão por atrito ao aço, devido à sua maior área de contato. A ausência de cristais fracos de CH nos cimentos geopoliméricos também contribuiu para a elevada resistência da ligação aço-matriz.

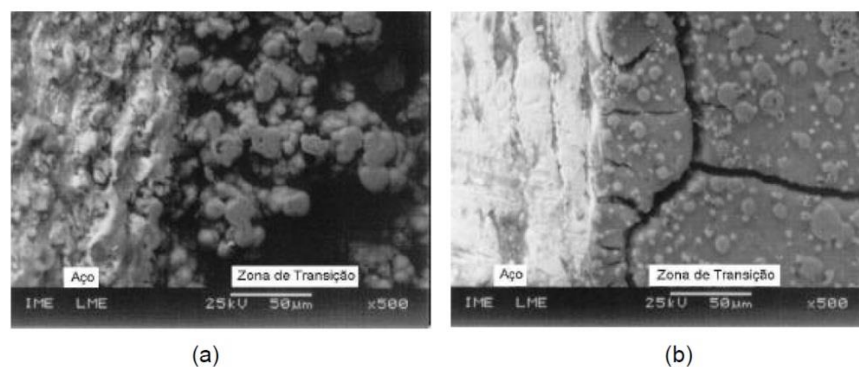


Figura 2.15 - Imagens obtidas por MEV da interface aço-pasta: a) cimento Portland; b) cimento geopolimérico (DIAS, 2001).

2.5.2. Soares (2006)

Soares (2006), em sua investigação experimental sobre aço e concreto geopolimérico, correlacionou a tensão de aderência de barras nervuradas de aço com o comprimento de ancoragem em concretos de cimento Portland e geopolimérico. O estudo propôs a obtenção de um comprimento de ancoragem suficiente para as barras de aço, de modo que as duas matrizes (geopolimérica e de cimento Portland) alcançassem níveis de carga (força de arrancamento) semelhantes. A nomenclatura utilizada para os concretos é mostrada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Nomenclatura dos concretos produzidos por Soares (2006).

Nomenclatura	Concreto
CCP	Concreto de cimento Portland
CCG	Concreto de cimento geopolimérico
P50	Concreto de cimento Portland com comprimento de ancoragem $5 \times d_s^*$
G50	Concreto geopolimérico com comprimento de ancoragem $5 \times d_s^*$
G40	Concreto geopolimérico com comprimento de ancoragem $4 \times d_s^*$
G25	Concreto geopolimérico com comprimento de ancoragem $2,5 \times d_s^*$

d_s = diâmetro nominal da barra, sem considerar a altura das nervuras.

Após os ensaios dos concretos com comprimento de ancoragem igual a $5 \times d_s$ (G50 e P50) terem sido efetuados, os resultados apontaram que o concreto de cimento geopolimérico (CCG) possuía maior tensão de aderência que o concreto de cimento Portland (CCP). Sendo assim, foram feitas reduções no comprimento de ancoragem do CCG até que o ensaio de aderência registrasse força de arrancamento (F) satisfatória para o deslizamento relativo igual a 0,1 mm, de acordo com o CEB/FIB MODEL CODE (1982). Duas séries de concretagens foram realizadas: na primeira o comprimento de ancoragem foi reduzido de $5 \times d_s$ (50 mm) para $4 \times d_s$ (40 mm) e na segunda para $2,5 \times d_s$ (25 mm).

Todos os concretos ensaiados apresentaram o mesmo comportamento no estado último de perda de aderência aço-concreto, que foi o deslizamento livre das barras de aço sem que houvesse a ruptura do bloco de concreto. Esse é um exemplo típico de ruptura na qual ainda há atuação de certa carga sob deformação crescente, mesmo após se ter atingido o estado último.

A força máxima de arrancamento das barras de aço em relação ao bloco de concreto G50 superou em 17% àquele obtido para o P50, revelando seu melhor desempenho (Gráfico 2.2). Com isso, pode-se observar que o início do deslizamento para os G50, P50, G40 e G25 ocorreu para forças médias de arrancamento iguais a 2,4 kN, 1,6 kN, 2,1 kN e 1,8 kN, respectivamente, ou seja, todos os CCG iniciaram seus deslizamentos relativos para forças de arrancamento superiores àquela apresentada pelo CCP.

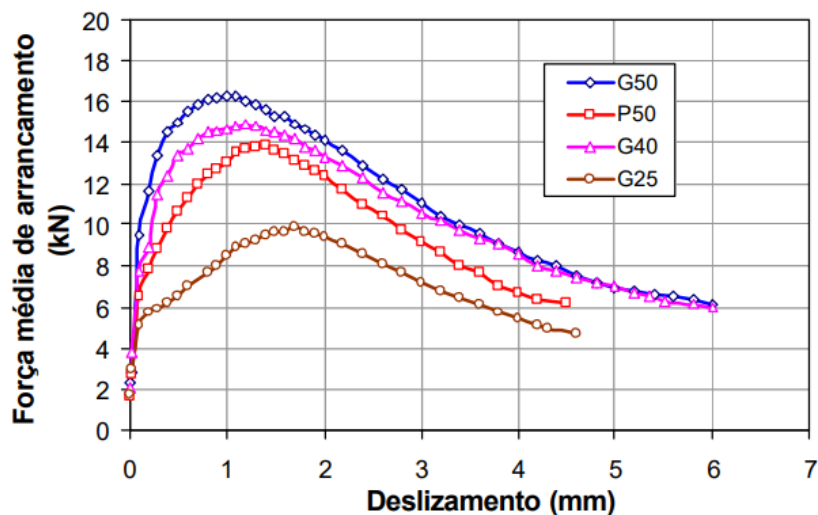


Gráfico 2.2 - Curvas da força média de arrancamento do CCG e do CCP em função do deslizamento relativo para comprimentos de ancoragem iguais a $5xds$, $4xds$ e $2,5 xds$. (SOARES, 2006).

As curvas médias de tensão de aderência (τ_b) *versus* deslizamento relativo mostraram que o início do deslizamento da barra de aço em relação ao bloco de concreto para o G50 ocorreu para uma tensão de aderência 44% superior a do P50 (1,5 e 1,0MPa). Para os demais concretos (G40 e G25) as barras iniciaram os deslizamentos relativos para as tensões de aderência iguais a 1,7 MPa e 2,3 MPa, respectivamente. O Gráfico 2.3 mostra os detalhes das tensões médias de aderência para os deslizamentos iniciais, até 0,2 mm. Com isso foi possível constatar que tanto para os deslizamentos relativos iniciais quanto para o deslizamento igual a 0,1 mm as curvas com comprimentos de ancoragem menores (G40 e G25) também apresentaram tensões de aderência superiores.

O trabalho de Soares (2006) concluiu que é possível reduzir à metade o comprimento de ancoragem para o CCG em relação ao CCP. Neste caso, têm-se economia, já que o aço é comprado por peso.

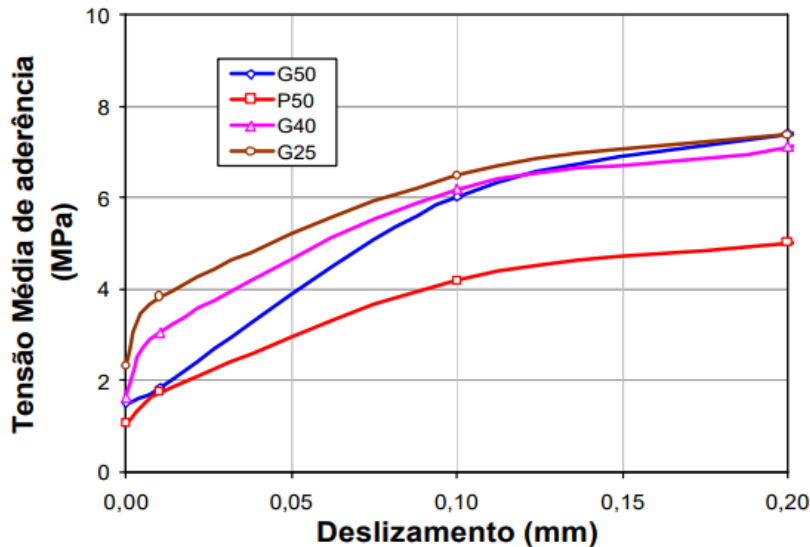


Gráfico 2.3 - Detalhe das curvas tensão média de aderência do CCG e do CCP em função do deslizamento relativo até 0,2 mm para comprimentos de ancoragem iguais a 5xds, 4xds e 2,5xds (SOARES, 2006).

2.5.3. Mazza (2010)

O estudo de Mazza (2010) teve como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico e a aderência entre um concreto convencional e argamassas de reparo. Para isso realizou ensaios de tração na flexão em vigas maciças de concreto com entalhe trapezoidal preenchido com dois tipos de argamassas geopoliméricas e um graute comercial. As argamassas geopoliméricas A100 e A150 possuíam resistência à compressão de 26,4 e 34,3 MPa, respectivamente. Enquanto que o graute comercial possuía 30,1 MPa.

Com os ensaios de tração na flexão obteve-se a curva carga *versus* deslocamento das vigas (Gráfico 2.4). Observa-se que o comportamento de cada sistema de reparo, independentemente da argamassa utilizada, é similar até a carga de aproximadamente 12,0 kN (força de fissuração do concreto). Até essa carga, cada sistema (substrato/reparo) permaneceu íntegro. Após a fissuração do concreto ficou bastante nítido o aumento da capacidade resistente nas vigas reparadas/reforçadas em relação à viga monolítica (sem reparo/reforço). O aumento da carga de ruptura nas vigas com entalhes foi atribuído, portanto, ao uso das diferentes argamassas de reparo.

O entalhe nas vigas preenchidas com as argamassas de reparo diminuiu a

rigidez do sistema, mesmo aumentando a capacidade resistente das peças. Isso reduz do sistema a susceptibilidade de surgimento de uma ruína frágil e indesejável, por possibilitar o aumento do aproveitamento das propriedades resistentes à tração do sistema concreto-argamassas de reparo.

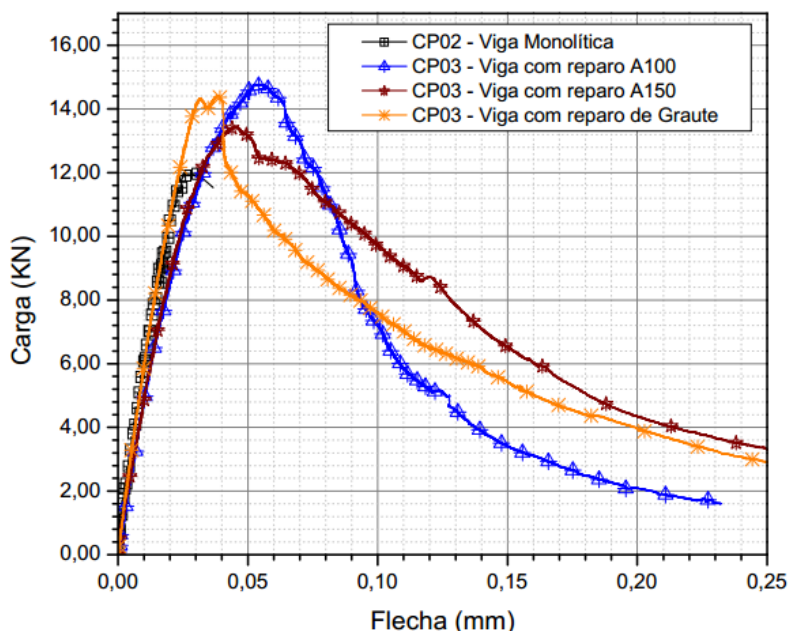


Gráfico 2.4 - Curvas carga *versus* deslocamento das vigas ensaiadas à tração na flexão (MAZZA, 2010).

Pode-se dizer que, para o sistema adotado (reparo no entalhe), a contribuição das argamassas promoveu ganhos de resistência, indicando ter havido reforço na capacidade portante das vigas. A viga com reparo geopolimérico A100 mostrou-se superior às demais em relação à capacidade de deformação antes da ruína. Essa viga superou a monolítica em 112%; já a viga reparada com o geopolímero A150 superou a monolítica em 80%. Quanto à viga reparada com graute comercial, a deformação foi inferior às vigas com reparo geopolimérico; porém, ainda assim, superou a viga monolítica em 56%. Logo, as argamassas geopoliméricas mostraram maior capacidade de deformação em relação à referência, sendo mais satisfatórias que o graute comercial. A presença do entalhe na face inferior das vigas causa a concentração de tensões nessa região (que é de máximo esforço de tração) e, com isso, tende a provocar alterações significativas nos valores de carga de ruptura das vigas com carga inferior às cargas de ruptura da viga monolítica. Porém, para todos

os deslocamentos verticais obtidos, as cargas dessas vigas reparadas foram sempre maiores que às da referência, o que demonstra que a presença do reparo no entalhe, mesmo provocando uma elevada concentração de tensões na região próxima a eles, contribuiu com um incremento de resistência, aumentando a capacidade portante da estrutura.

A flecha da viga com reparo geopolimérico A100 foi 33% maior do que a flecha da viga referencial. A viga reparada com geopolímero A150 apresentou flecha menos pronunciada do que a viga com A100, porém mais pronunciada do que a flecha da viga sem reparo, ou seja, 29% superior à flecha da viga monolítica. O comportamento da viga reparada com graute comercial foi semelhante ao da viga monolítica de concreto. As argamassas de reparo com geopolímero apresentaram-se com as maiores flechas, ou seja, com menor rigidez em relação à viga monolítica e à reparada com graute comercial. Isso demonstra o bom desempenho que essas argamassas obtiveram em relação à aderência, bem como em relação à capacidade de servir como material de reforço de estruturas.

2.5.4. Ranjbar *et al.* (2016)

Ranjbar *et al.* (2016) investigaram o desempenho de vigas de concreto armado com cimento Portland comum (OPC) e com cimento geopolimérico (GPC) e os efeitos causados pela substituição do GPC na zona de tração (em multicamadas) em vigas de concreto convencional como forma de promover um reparo. As propriedades avaliadas foram: flecha, tenacidade e tipo de ruptura. O concreto geopolimérico foi substituído na zona de tração (Figura 2.16) devido à sua alta resistência inicial, que o torna um produto com grande potencial de utilização na indústria de pré-moldados.

A Tabela 2.5 apresenta as propriedades mecânicas do concreto convencional e do concreto geopolimérico utilizados no trabalho de Ranjbar *et al.* (2016). Destacam-se os valores aproximados da resistência à tração para os dois concretos.

Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas do concreto convencional e geopolimérico (RANJBAR *et al.*, 2016).

Concreto	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_c (GPa)
Geopolimérico	42,0 ± 3	5,2 ± 0,3	22,4 ± 1
Convencional	88,0 ± 5	5,5 ± 0,2	40,5 ± 2



Figura 2.16 - Confeção das diferentes vigas de Ranjbar *et al.* (2016).

As vigas foram confeccionadas com uma seção transversal retangular com 125 mm de largura, 200 mm de altura e comprimento de 1000 mm. A camada inferior das vigas foi fabricada com concreto geopolimérico com profundidade variando de 0, 50, 75, 100 e 200 mm nos corpos de prova B1, B2, B3, B4 e B5, respectivamente, e a camada superior foi preenchida com OPC. As vigas foram moldadas com duas barras de aço para armadura de flexão com diâmetro de 10 mm e tensão de escoamento de 670 MPa. Os detalhes das vigas são mostrados na Figura 2.17.

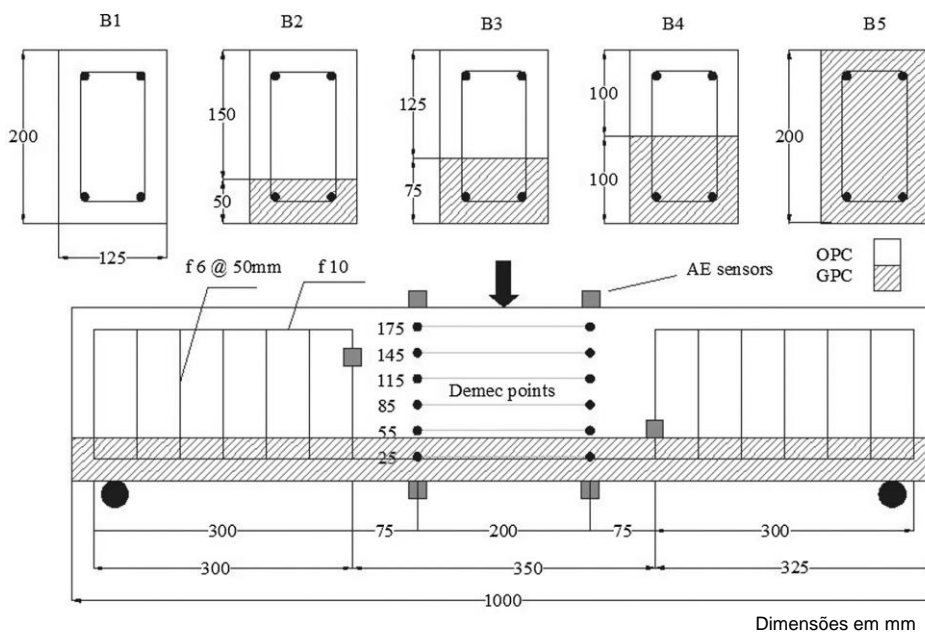


Figura 2.17 - Configuração das vigas confeccionadas por Ranjbar *et al.* (2016).

As vigas multicamadas foram analisadas por meio de ensaio de flexão a três pontos com taxa de carregamento igual a 0,5 mm/min, havendo interrupção no carregamento a cada 5 kN, durante 4 min, para registrar a propagação de fissuras e a posição da linha neutra. A carga foi aplicada continuamente até o colapso das vigas.

Em um ensaio de flexão as vigas de concreto armado podem ser caracterizadas em três diferentes estágios: elástico não fissurado, propagação de fissuras e deformação plástica. Após a primeira fissura, a viga mostra mudança visível na inclinação da curva carga-deflexão, que indica o início da fase inelástica. A fase inelástica das vigas deve-se a três principais efeitos mecânicos: fissuração do concreto, escoamento do aço e esmagamento de concreto (CHEN, 2007). As curvas de carga-deslocamento vertical das vigas são mostradas no Gráfico 2.5.

A deflexão de todas as vigas aumentou linearmente e foi proporcional à carga após o início da primeira fissura visível. Embora o GPC tenha resistência à compressão significativamente menor do que o OPC, a primeira fissura visível ocorreu praticamente com a mesma carga.

Isso pode ser atribuído às diferenças na característica dos materiais componentes das vigas. A relação resistência à tração/resistência à compressão é maior para o GPC que para o OPC (PROVIS, 2013; JANNIE *et al.*, 2013; GORLEY e JOHNSON, 2005). O início da fissuração intensa serviu de indicação da não linearidade em todas as vigas até o limite de escoamento do aço. Embora todas as vigas apresentassem tensão de escoamento do aço semelhante, exibiram comportamentos diferentes. O escoamento do aço da viga com GPC ocorreu gradualmente, enquanto que o da viga com OPC ocorreu bruscamente.

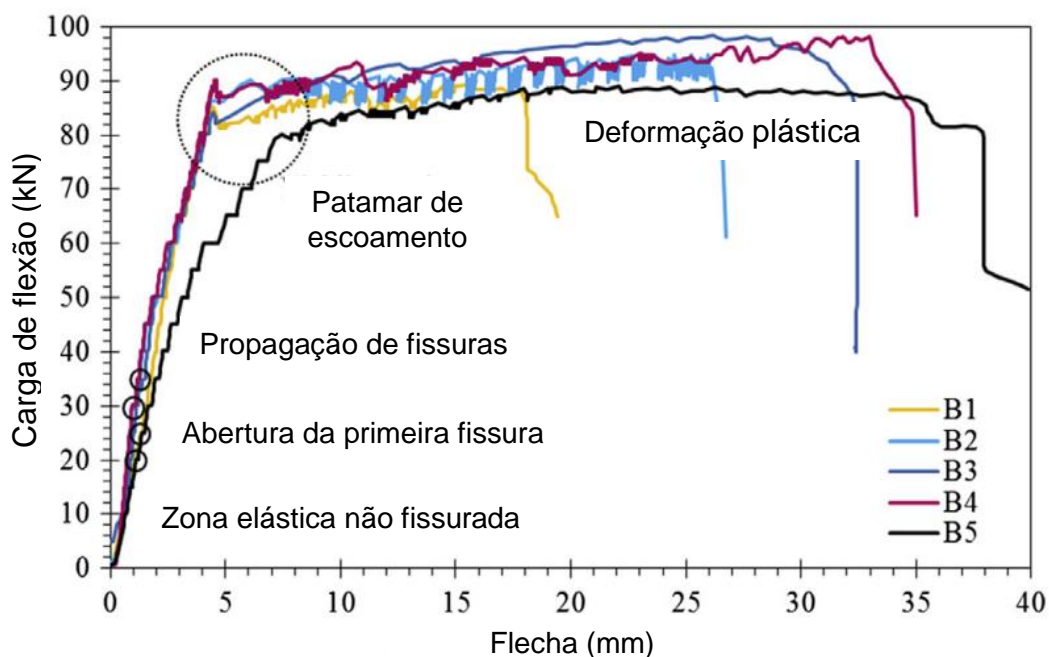


Gráfico 2.5 - Curvas carga *versus* flecha de vigas de concreto armado reforçadas com GPC e OPC multicamadas (RANJBAR *et al.*, 2016).

Ressalta-se que, apesar das vigas GPC e OPC terem aproximadamente a mesma capacidade de carga, a viga GPC teve deflexão cerca de duas vezes maior que a OPC no ponto de ruptura, embora a resistência à compressão do geopolímero fosse cerca da metade do concreto de cimento Portland. A maior deflexão da viga com GPC comparada com a OPC, para uma carga semelhante, também foi observada por Andalib *et al.* (2014).

Os pesquisadores destacam que as vigas compostas por dois tipos de concreto beneficiaram-se da ação conjunta do geopolímero com alta resistência à tração e do concreto convencional com alta resistência à compressão, levando ao retardamento da ocorrência da primeira fissura visível e da capacidade de carga ligeiramente maior. Isso ocorreu mesmo para as vigas compostas com uma camada de geopolímero na zona de tração, que apresentaram maiores deflexões que as vigas de concreto convencional de referência, sem aumento considerável na sua capacidade portante, ou seja, apresentaram maior ductilidade e tenacidade em relação às vigas com OPC.

2.6. Considerações finais

A decisão de reparar e/ou reforçar uma estrutura de concreto pode ser

motivada por diversas razões. Porém, para garantir que esse novo sistema seja eficiente e durável é necessário fazer a escolha adequada do material a ser utilizado, visando uma boa aderência entre o substrato e o reparo/reforço. Um dos principais parâmetros que influenciam a durabilidade e a eficiência do reparo/reforço é a aderência entre o novo material e o substrato. Sem o atendimento dessa propriedade o reparo/reforço torna-se vulnerável às intempéries, que podem comprometer todo o sistema.

Existem diversos materiais que podem ser utilizados como reparo/reforço. A escolha depende, principalmente, da aplicação e da resistência mecânica esperada. Geralmente, são usados materiais à base de cimento Portland ou algum polímero. Porém, o avanço tecnológico aponta para a necessidade de se desenvolver novos materiais que atendam aos requisitos necessários e que também possam apresentar um desempenho superior àqueles já consagrados. Um material relativamente novo que possui potencial para ser utilizado como material de reparo/reforço de estruturas é o geopolímero, que possui características adequadas para este tipo de aplicação, como, por exemplo, elevada resistência inicial e boa aderência ao concreto de cimento Portland e ao aço.

Os pesquisadores citados destacam que os resultados de aderência apresentados entre os materiais geopoliméricos e os substratos de concreto e/ou aço são promissores e que mais estudos devem ser realizados a fim de garantir confiabilidade na aplicação deste material na construção civil. Assim, os excelentes resultados constatados motivaram o estudo do comportamento da aderência entre os materiais geopoliméricos e os materiais convencionais de cimento Portland e o aço.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, um programa experimental foi executado para avaliar o desempenho de argamassas geopoliméricas utilizadas como material de reparo em vigas de concreto, aos 60 dias de idade. Todos os resultados obtidos permitiram avaliar o comportamento das vigas de concreto de cimento Portland sem e com reparo, usando uma argamassa comercial e duas geopoliméricas. As vigas foram igualmente armadas, para as mesmas condições de ensaio.

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Os ensaios foram feitos para se obter as características físicas, químicas e mecânicas dos materiais que serviram como parâmetros para avaliar a aderência entre a argamassa comercial e as duas geopoliméricas com o concreto convencional e o aço.

Os procedimentos adotados para a caracterização dos materiais, para as misturas e moldagens, assim como para todos os ensaios dos corpos de prova foram conforme as prescrições normativas e procedimentos usuais para materiais à base de cimento Portland. Desta forma, alguns resultados obtidos foram comparados com aqueles presentes na literatura nacional e internacional.

A quantidade de corpos de prova ensaiada teve como limitação o tempo ou os custos. Os ensaios foram adotados em função da facilidade de execução. Os dados experimentais foram tabulados e tratados estatisticamente, por meio de medidas de dispersão e tendência central: média aritmética, desvio-padrão (S) e coeficiente de variação (CV).

Os ensaios de aderência foram realizados com três tipos de corpos de prova diferentes, de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Descrição dos tipos de corpos de prova usados nesta pesquisa.

Tipo de corpo de prova	Descrição	Objetivo
Mistos	Corpos de prova prismáticos constituídos de metade de concreto convencional e a outra de argamassa de reparo. Ou de duas metades de concreto convencional coladas com as argamassas de reparo.	Avaliar a resistência de aderência entre o concreto convencional e as argamassas de reparo.
Tirantes	Corpos de prova prismáticos constituídos de concreto convencional ou argamassas de reparo com uma barra de aço no centro de massa.	Avaliar a resistência de aderência do concreto convencional ou das argamassas de reparo e o aço.
Vigas	Corpos de prova prismáticos de concreto convencional com e sem armadura, sem e com argamassas de reparo.	Avaliar o comportamento da aderência das argamassas de reparo frente ao concreto armado.

3.1. Materiais

Os materiais empregados na confecção dos corpos de prova foram: areia quartzosa, brita 0, cimento Portland CPIIE-32, CPV-ARI, aditivo superplastificante, barra de aço CA-25, barra de aço CA-60, metacaulinita, hidróxido de potássio, silicato de sódio alcalino comercial, água e argamassa comercial.

Neste Item são descritas as propriedades físicas e químicas (quando fornecidas pelos fabricantes) e os resultados dos ensaios de caracterização química e física das matérias-primas utilizadas na fabricação do concreto do substrato, da argamassa comercial e das argamassas geopoliméricas. Não foi feito nenhum ensaio de caracterização para o silicato de sódio alcalino e o hidróxido de potássio, componentes da solução ativadora dos geopolímeros utilizados nesta pesquisa, pois são produtos químicos de fabricação padronizada e, portanto, suas composições químicas e físicas podem ser usadas sem dispersão dos resultados.

3.1.1. Areia quartzosa

O agregado miúdo utilizado como material inerte foi uma areia quartzosa advinda do rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes-RJ, lavada e seca em

estufa durante 24 horas à temperatura de 110°C.

Utilizada na fabricação do concreto do substrato e nas argamassas geopoliméricas, as principais características deste agregado são descritas a seguir.

Conforme a ABNT NBR-NM 248 (2003), a dimensão máxima característica foi de 2,36 mm e o módulo de finura foi de 2,68. A massa específica de 2,65 g/cm³ foi obtida por picnometria (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Massa específica da areia obtida por picnometria.

A absorção de água foi de 5,1%, conforme ABNT NBR-NM 52 (2009). A composição granulométrica, conforme ABNT NBR-NM 248 (2003), é mostrada no Gráfico 3.1.

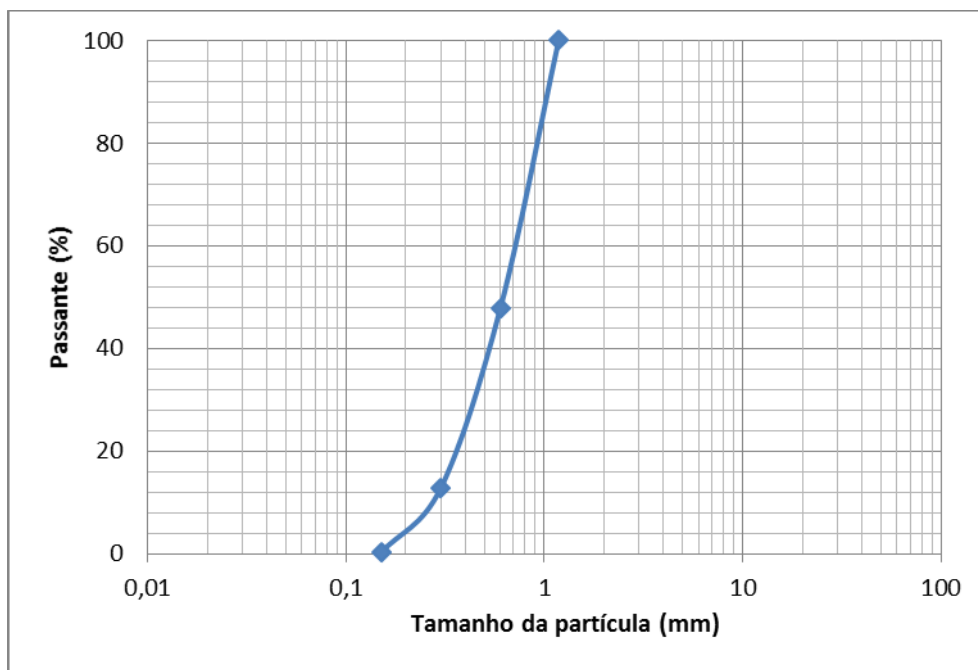


Gráfico 3.1 - Curva granulométrica da areia.

3.1.2. Brita 0

O agregado graúdo utilizado na fabricação do concreto do substrato foi a brita 0. De origem granítica, proveniente de jazidas localizadas no município de Campos dos Goytacazes-RJ, foi lavada e seca em estufa a 110°C por 24 horas; A brita 0 possui as características mostradas a seguir.

A massa específica foi obtida por picnometria (Figura 3.2). O valor encontrado foi de 2,72 g/cm³.



Figura 3.2 - Massa específica da brita 0 obtida por picnometria.

A massa unitária compactada foi de 1,35 e a composição granulométrica, conforme ABNT NBR-NM 248 (2003), é mostrada no Gráfico 3.2.

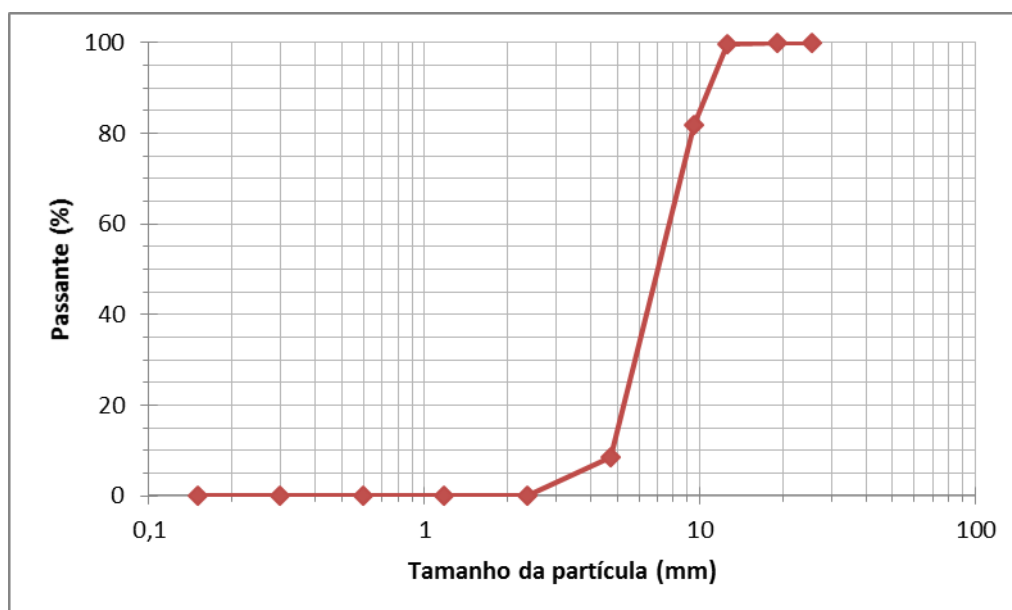


Gráfico 3.2 - Curva granulométrica da brita 0.

O módulo de finura foi 6,43 e a dimensão máxima característica foi de 9,5 mm, de acordo com a ABNT NBR-NM 248 (2003).

3.1.3. Cimento Portland

O cimento Portland utilizado como fonte de cálcio para a fabricação de uma das argamassas geopoliméricas confeccionadas neste trabalho foi o CPIIE-32 do fabricante Mauá. Ele tem em sua composição adição de escória de alto-forno, que substitui parte do clínquer (mineral artificial) usado na produção do cimento nacional. As características químicas e físicas foram fornecidas pelo fabricante e comparadas com as especificações técnicas da norma brasileira da ABNT NBR 11578 (1991), como mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características químicas e físicas do Cimento CPIIE-32. Dados do fabricante com limites de especificação de acordo com a ABNT NBR 11578 (1991).

Especificações	Resultado do ensaio	Limites - ABNT NBR 11578 (1991)
SiO ₂ (%)	20,1	-
Al ₂ O ₃ (%)	5,0	-
CaO (%)	59,5	-
Fe ₂ O ₃ (%)	3,7	-
MgO (%)	2,3	≤ 6,5
K ₂ O (%)	0,1	-
SO ₃ (%)	3,0	≤ 4,0
Cal livre (%)	1,1	-
Resíduo insolúvel (%)	1,2	≤ 2,5
Perda ao fogo (%)	4,8	≤ 6,5
Área específica BLAINE (m ² ×kg ⁻¹)	362,3	≥ 260
Área específica BET (m ² ×kg ⁻¹)	2.429,0	-
Massa específica (kg×m ⁻³)	3,09	-
Resíduo na peneira 200 (%)	3,0	-
Resíduo na peneira 325 (%)	-	-

O cimento utilizado para a fabricação dos corpos de prova do concreto convencional foi o CPV-ARI do fabricante Mizu. As características químicas e físicas

foram fornecidas pelo fabricante e comparadas com as especificações técnicas da norma brasileira da ABNT NBR 5733 (1991) como mostra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características químicas e físicas do Cimento CPV-ARI. Dados do fabricante com limites de especificação de acordo com a ABNT NBR 5733 (1991).

Especificações	Resultado do ensaio	Limites - ABNT NBR 5733 (1991)
SO ₃ (%)	2,87	≤ 4,0
Cal livre (%)	2,06	-
Resíduo insolúvel (%)	1,21	≤ 1,0
Perda ao fogo (%)	3,69	≤ 4,5
Área específica BLAINE (cm ² xg ⁻¹)	4.510,8	≥ 3.000
Resíduo na peneira 200 (%)	0,13	≤ 8,0
Resíduo na peneira 325 (%)	0,07	-

As Tabelas 3.4 e 3.5 mostram, respectivamente, a composição química dos cimentos CPIIE-32 e CPV-ARI. Os percentuais de óxidos foram obtidos por espectroscopia de fluorescência de raios X em um equipamento Shimadzu EDX- 720 com tubo de 3 kW e alvo de ródio. O equipamento está disponível no LECIV (Figura 3.3). O ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo com a ABNT NBR NM 18 (2012).

Tabela 3.4 - Composição química do cimento CPIIE-32.

Elementos	Resultados (%)	Limites - ABNT NBR 11578 (1991)
CaO	74,32	-
SiO ₂	14,88	-
Al ₂ O ₃	4,41	-
SO ₃	2,64	≤ 4,0
Fe ₂ O ₃	2,15	-
K ₂ O	0,97	-
TiO ₂	0,32	-
MnO	0,13	-
SrO	0,12	-
ZnO	0,04	-
ZrO ₂	0,01	-
Perda ao fogo	3,64	≤ 6,5

Tabela 3.5 - Composição química do cimento CPV-ARI.

Elementos	Resultados (%)	Limites - ABNT NBR 5733 (1991)
CaO	75,68	-
SiO ₂	13,35	-
Al ₂ O ₃	3,98	-
SO ₃	3,31	≤ 4,0
Fe ₂ O ₃	2,58	-
K ₂ O	0,62	-
TiO ₂	0,26	-
MnO	0,09	-
SrO	0,12	-
ZrO ₂	0,01	-
Perda ao fogo	2,93	≤ 4,5



Figura 3.3 - Equipamento Shimadzu EDX- 720 com tubo de 3 kW e alvo de ródio.

3.1.4. Água

Para mistura, do concreto, da argamassa comercial e das argamassas geopoliméricas foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento de água do município de Campos dos Goytacazes-RJ.

3.1.5. Superplastificante

Para o concreto de alta resistência do substrato foi utilizado superplastificante PLASTOL 5035 da Viapol.

De acordo com o fabricante, o produto é um aditivo para concreto, líquido, isento de cloretos, pronto para uso. Possui grande poder de dispersão, aumentando fortemente a trabalhabilidade sem alterar significativamente as características originais de pega do concreto. Suas características são mostradas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Características do superplastificante PLASTOL 5035 da Viapol.

Ação principal	Aditivo superplastificante tipo I – SP I A
Ação secundária	Redutor de água de amassamento (A/C)
Composição	Solução de policarboxilatos em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	Levemente amarelada
Massa específica	$\cong 1,0 \text{ g/cm}^3$
Teor de cloretos	Não contém cloretos

3.1.6. Barras de aço

Para as armaduras foram utilizadas barras de aço do fabricante Arcelormittal. As barras estavam de acordo com as especificações a ABNT NBR 7480 (2007): CA-25, barra lisa de diâmetro nominal de 6,3 mm, tensão de escoamento 250 MPa e massa nominal de 0,245 kg/m; e CA-60, barra nervurada de diâmetro nominal de 4,2 mm, tensão de escoamento 600 MPa e massa nominal de 0,109 kg/m. Tais especificações foram escolhidas mediante o cálculo das armaduras, que serão detalhadas no item 3.2, a fim de que a ruptura ocorresse na região de flexão pura das vigas.

Algumas propriedades físicas e mecânicas das barras de aço foram verificadas por meio do ensaio de tração direta em uma prensa universal da marca INSTRON (Figura 3.4), com capacidade máxima de carga de 100 kN e com velocidade de carregamento de 2 mm/min, de acordo com procedimentos da norma ABNT NBR ISO 6892-1 (2015). O equipamento está disponível no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF. Para isso foram confeccionados três corpos de prova de 300 mm de comprimento, para cada tipo de aço.

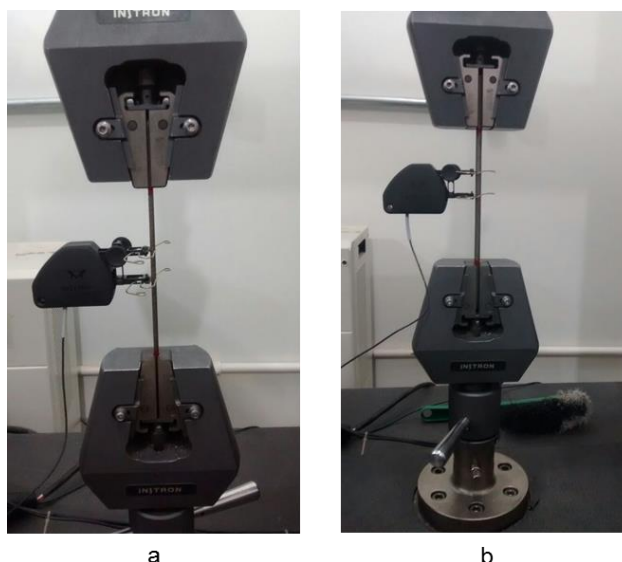


Figura 3.4 - Ensaio de tração direta: a) barra de aço CA-60; b) barra de aço CA-25.

Para aquisição das deformações ao longo do ensaio, os corpos de prova foram instrumentados com um *clip gage*, medidor de deformação. O Gráfico 3.3 mostra a curva tensão *versus* deformação do ensaio no corpo de prova 1 (CP1) do aço CA-25. O Gráfico 3.4 mostra a curva tensão *versus* deformação do ensaio no corpo de prova 2 do aço CA-60 (CP2). Os gráficos para as outras barras de aço encontram-se no Anexo A, sendo que alguns foram descartados por falhas na leitura do *clip gage*. A Figura 3.5 mostra duas barras de aço após ruptura.

Segundo a ABNT NBR 7480 (2007), a tensão de escoamento de barras de aço pode ser caracterizada por um patamar no diagrama tensão *versus* deformação.

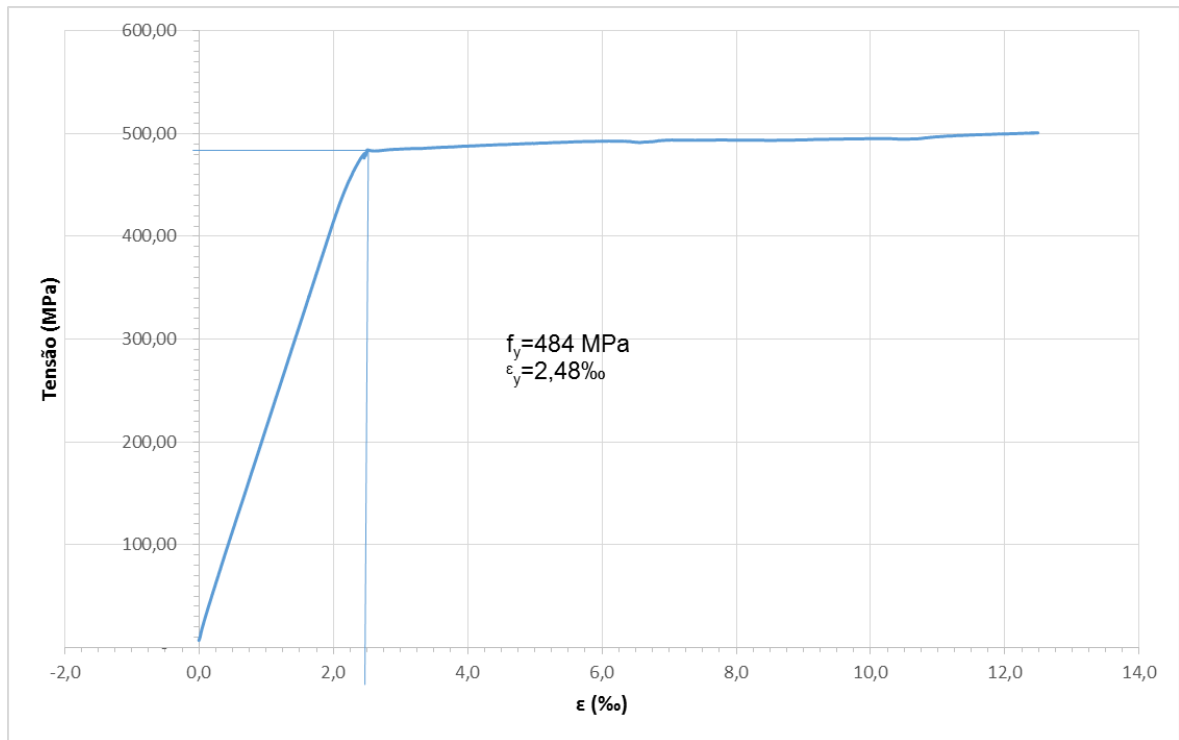


Gráfico 3.3 - Curva tensão versus deformação para o corpo de prova 1 do aço CA-25.

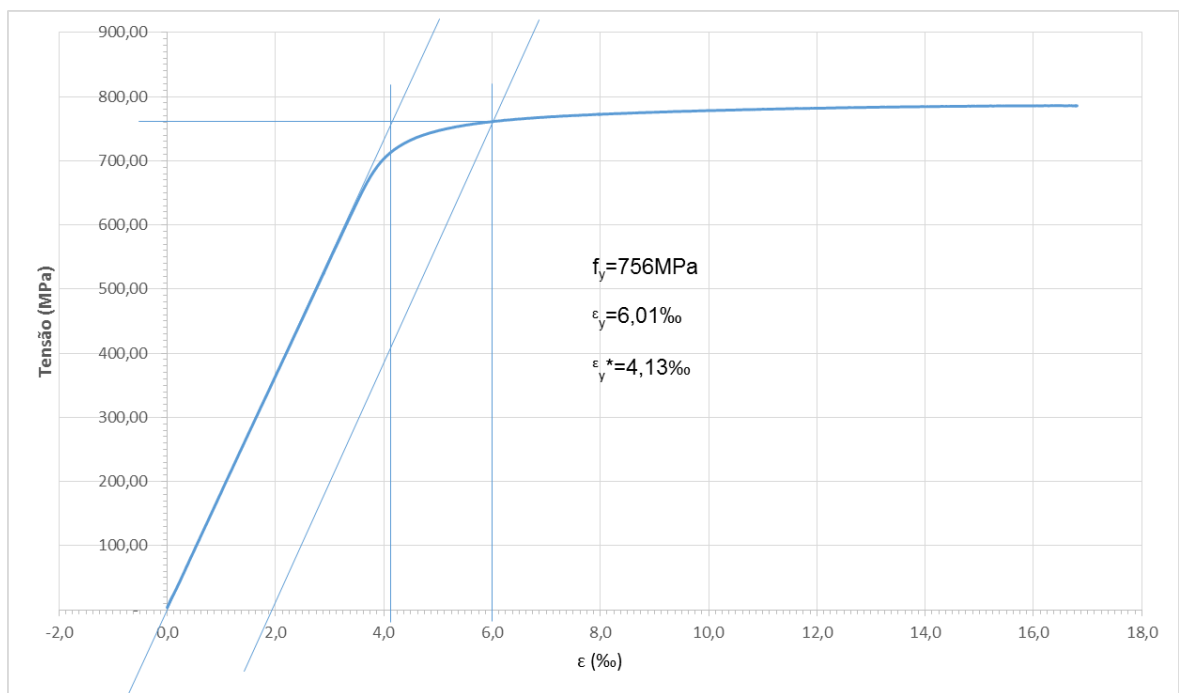


Gráfico 3.4 - Curva tensão versus deformação para o corpo de prova 2 do aço CA-60.

A Tabela 3.7 apresenta as propriedades físicas e mecânicas das barras de aço ensaiadas, média de dois corpos de prova.

Tabela 3.7 - Propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova das barras de aço.

Corpo de prova	Aço	ϕ (mm)	Área (mm ²)	f_y (MPa)	ϵ_y (‰)	ϵ_{y^*} (‰)	N_y (N)	E_s (GPa)
CP1	CA-25	6,3	31,17	484,0	2,48	-	15.086,3	180,0
CP4	CA-25	6,3	31,17	475,0	2,43	-	14.805,8	185,0
Média	-	-	-	479,5	2,46	-	14.946,0	182,5
S	-	-	-	4,50	0,02	-	140,27	2,50
CV	-	-	-	0,94	1,02	-	0,94	1,37
CP2	CA-60	4,2	13,85	747,0	5,94	3,94	10.345,9	220,0
CP4	CA-60	4,2	13,85	756,0	6,01	4,13	10.470,6	216,0
Média	-	-	-	751,5	5,98	4,04	10.408,3	218,0
S	-	-	-	4,50	0,03	0,10	62,33	2,00
CV	-	-	-	0,60	0,59	2,35	0,60	0,92

ϕ Diâmetro da barra de aço;

f_y Tensão de escoamento do aço;

ϵ_y Deformação de escoamento do aço;

ϵ_{y^*} Deformação de escoamento do aço para o diagrama bilinear de tensões;

N_y Carga em que ocorre o escoamento do aço;

E_s Módulo de elasticidade do aço.

Os diâmetros de 6,3 mm dos corpos de prova CA-25 e 4,2 mm dos corpos-de-prova de CA-60 foram verificados com um paquímetro.

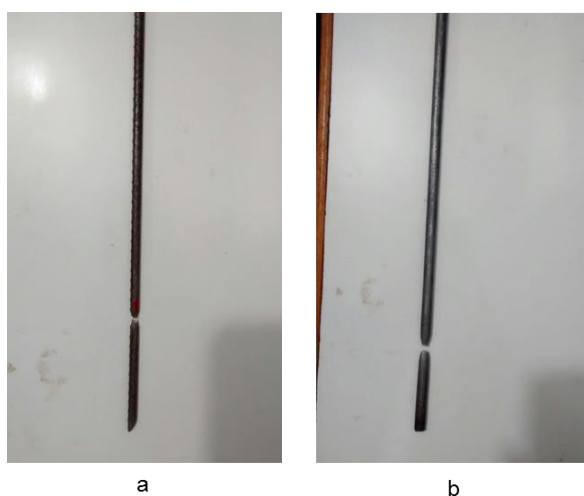


Figura 3.5 - Barras de aço após a ruptura: (a) CA-60; e (b) CA-25.

3.1.7. Argamassa comercial para reparo de peças de concreto

De acordo com a ficha técnica do fabricante Quartzolit, o produto Reparo Estrutural é um microconcreto pronto formulado à base de cimento Portland, agregados classificados, aditivos especiais, polímeros e inibidores de corrosão, que quando misturados resultam numa argamassa moldável de alta resistência mecânica, aderente ao concreto pronto e à estrutura já existente, impedindo a penetração de água e agentes agressivos.

Após a análise de diferentes produtos disponíveis no mercado nacional, este produto foi escolhido, pois, entre outros serviços (em sua ficha técnica), ele permite reparar pilares, vigas, lajes, varandas, escadas e elementos pré-moldados de concreto com admissão de espessuras de até 100 mm em pisos, paredes ou tetos, com resistência à compressão de 34 MPa aos 28 dias. Foram encontrados outros produtos com resistência superior, porém a espessura de aplicação era menor que a profundidade de 30 mm necessária para preencher o entalhe trapezoidal dimensionado no Item 3.2.1 deste trabalho. Em outras opções de argamassa comercial para reparo, a aplicação deve ser feita em camadas. Alguns fabricantes de argamassas de reparo recomendam ainda a aplicação de uma camada de resina epóxi para fazer a ponte de aderência entre o concreto antigo e a argamassa de reparo. O reparo estrutural do fabricante Quartzolit foi o material que mais se aproximou da forma adotada de aplicação das argamassas geopoliméricas, em única camada e com a profundidade do entalhe dos corpos de prova deste estudo, além de estar disponível no comércio local e ser utilizado em obras na região da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ.

O fabricante não forneceu as características físicas e químicas da argamassa comercial de reparo. No entanto, forneceu os resultados dos ensaios realizados pelo setor de qualidade da empresa (Anexo B). No próximo item é descrito o resultado da composição química obtida por EDX.

3.1.7.1. Composição química

A Tabela 3.8 mostra a composição química da argamassa comercial de reparo. Os percentuais de óxidos foram obtidos por EDX.

Tabela 3.8 - Composição química da argamassa comercial de reparo.

Elementos	Resultados (%)
CaO	74,81
SiO ₂	14,96
Al ₂ O ₃	4,07
SO ₃	2,92
Fe ₂ O ₃	2,13
K ₂ O	0,97
MnO	0,07
SrO	0,04
ZrO ₂	0,02

3.1.8. Metacaulim (Al₂O₃·2SiO₂)

Pozolanas provenientes da calcinação do caulim, os metacaulins são aluminossilicatos de estrutura desordenada necessária para a geopolimerização. O caulim é transformado em metacaulim por meio de um processo de calcinação entre 500 e 600°C. Durante este processo, ocorre a desidroxilação, ou seja, o caulim perde água de sua estrutura cristalina, dando origem a uma estrutura amorfa. Este material foi usado como precursor dos geopolímeros desta pesquisa.

Utilizou-se o produto Metacaulim HP ultra, metacaulim comercial da empresa Metacaulim do Brasil S/A. As propriedades físicas e químicas fornecidas pelo fabricante são mostradas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Propriedades químicas e físicas do Metacaulim.

Especificações	Resultado do ensaio	Limites - ABNT NBR 15894-1 (2010)
SiO ₂ (%)	55,0	44,0 a 65,0%
Al ₂ O ₃ (%)	38,0	21,0 a 46,0%
CaO (%)	0,1	CaO + MgO < 1,5%
MgO (%)	0,3	
TiO ₂ (%)	1,2	-
Fe ₂ O ₃ (%)	1,3	-
K ₂ O (%)	1,0	-
Na ₂ O (%)	0,2	≤ 0,5%
SO ₃ (%)	0,1	< 1,0%
Perda ao fogo (%)	1,5	< 4,0%
Área específica (BET, cm ² /g)	216.000	> 150.000
Massa específica (kg/dm ³)	2,6	-
Massa unitária (kg/dm ³)	0,7	-
Finura (< #325 - 44 μm)	0,1	< 10,0%

As propriedades físicas e químicas deste material foram obtidas pelos ensaios descritos a seguir.

3.1.8.1. Composição química

A Tabela 3.10 mostra a composição química do metacaulim. Os percentuais de óxidos foram obtidos por EDX. O ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo com a ABNT NBR NM 18 (2012).

Tabela 3.10 - Composição química do metacaulim.

Especificações	Resultados do ensaio (%)	Limites - ABNT NBR 15894-1 (2010)
SiO ₂	48,43	44,0 a 65,0%
Al ₂ O ₃	44,76	21,0 a 46,0%
K ₂ O	1,51	-
Fe ₂ O ₃	2,39	-
SO ₃	0,24	≤ 1,0 %
Na ₂ O	0,20	≤ 0,5%
TiO ₂	1,45	-
CaO	0,10	-
V ₂ O ₅	0,09	-
ZrO ₂	0,01	-
ZnO	0,01	-
SrO	0,01	-
Perda ao fogo	3,33	≤ 4,0%

3.1.8.2. Massa específica

A massa específica de 2,09 g/cm³ do metacaulim foi obtida por meio de frasco volumétrico de Le Chatelier, ensaio prescrito pela ABNT NBR NM 23 (2001).

3.1.8.3. Difração de raios X

O metacaulim utilizado neste trabalho era praticamente amorfo, conforme mostra o Gráfico 3.5. Este resultado foi obtido por meio de um difratômetro de raios X da marca Shimadzu, modelo XRD-7000 (Figura 3.6), com tubo de Cu-K α (40 kV/30 mA), coleta entre 5 e 80° (2 θ), velocidade do goniômetro de 0,02°/passo e tempo de contagem de 1s por passo. Os picos cristalinos observados, neste caso, correspondem ao quartzo, à illita, à muscovita e à caulinita. A presença destas fases cristalinas é comum neste material, e a presença de caulinita indica que a calcinação do fabricante não foi totalmente eficiente.



Figura 3.6 - Difratorômetro de raios X da marca Shimadzu, modelo XRD-7000.

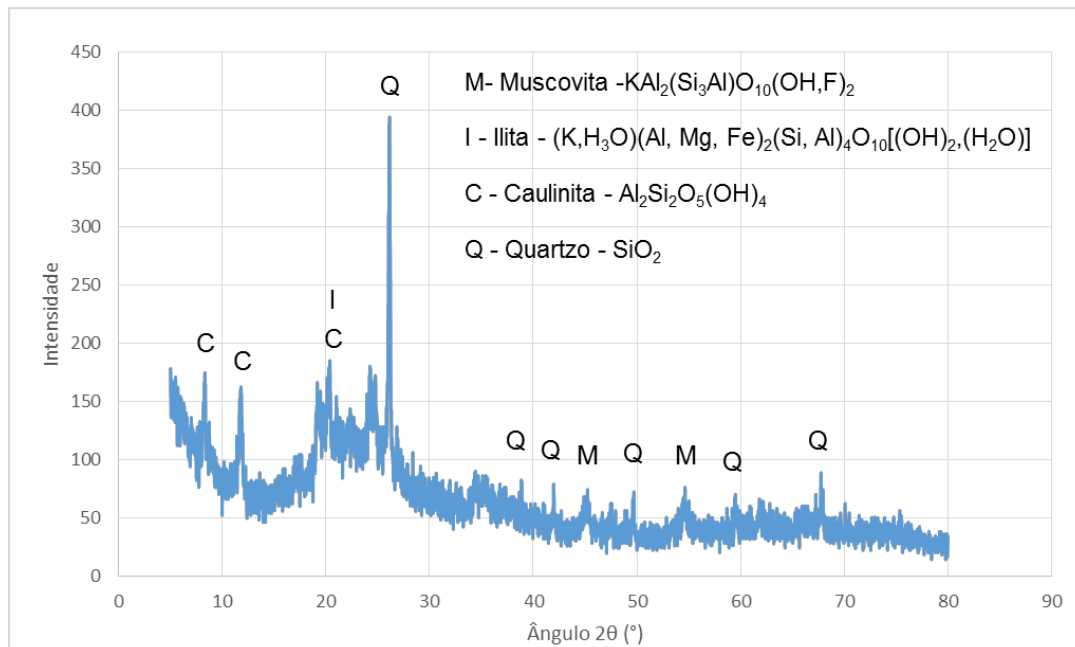


Gráfico 3.5 - Difratorograma de raios X do metacaulim.

3.1.8.4. Granulometria a laser

A distribuição granulométrica do metacaulim foi obtida por meio do ensaio de granulometria a laser, em um equipamento CILAS 1090. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-RIO. Para realização do ensaio, 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. O Gráfico 3.6 mostra a curva granulométrica deste material. Os tamanhos das partículas variam entre 0,3 μm e 85 μm . A Tabela 3.11 apresenta 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.

Tabela 3.11 - Diâmetros D10, D50 e D90 do metacaulim.

Diâmetro (%)	Diâmetro (μm)
D10	2,91
D50	19,20
D90	46,15

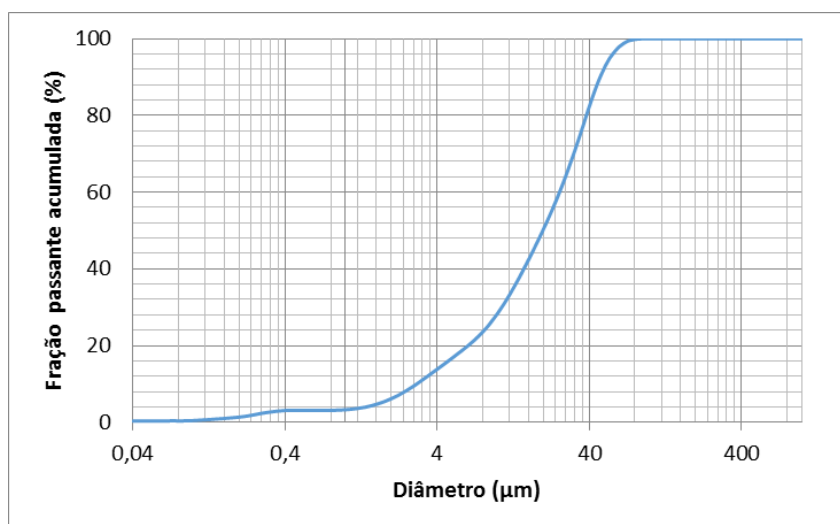


Gráfico 3.6 - Distribuição granulométrica do metacaulim.

3.1.8.5. Análises térmicas

Os ensaios térmicos foram realizados no LAMAV em um equipamento da empresa BP Engenharia, modelo RB 3000 (Figura 3.7). A temperatura do ensaio foi de 1000°C, com rampa de aquecimento de 12,5°C/min. Estes ensaios foram utilizados para avaliar a perda de massa do metacaulim em função do aumento de temperatura e sua estabilidade térmica. Para isso, o material foi macerado manualmente com auxílio de almofariz e pistilo de porcelana, até reduzi-lo a um pó muito fino. Dessa amostra foram retiradas aproximadamente 10 mg para serem colocadas no porta-amostra de alumina para execução do ensaio. Os resultados são apresentados no Gráfico 3.7.



Figura 3.7 - Equipamento RB 3000 da empresa BP Engenharia.

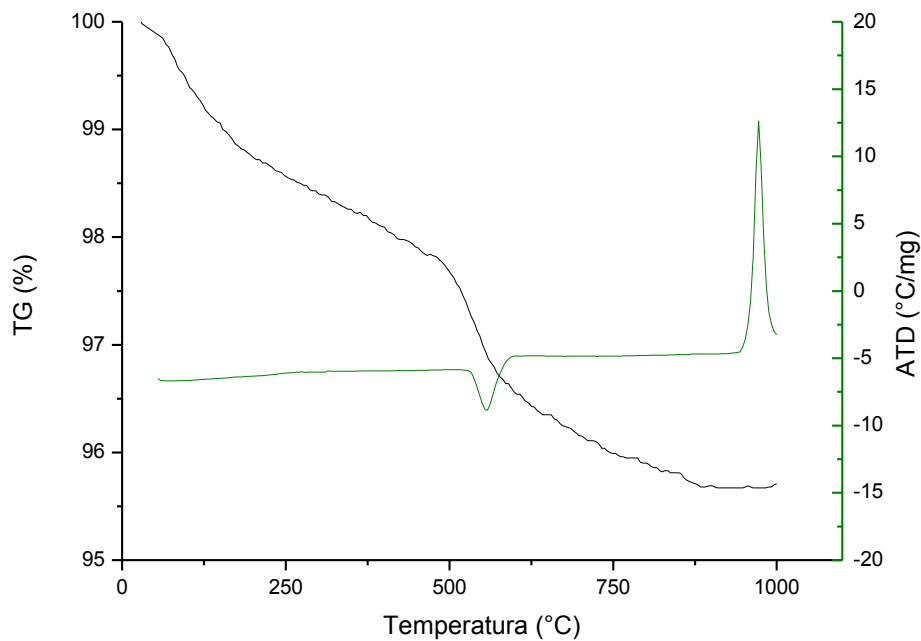


Gráfico 3.7 - Curva de termogravimetria (TG) e de análise termodiferencial (ATD) do metacaulim.

A partir da curva termogravimétrica foi possível obter a perda de massa do metacaulim comercial, que foi de 4,3%. Já a curva termodiferencial mostra que a calcinação do metacaulim foi incompleta, devido à presença do pico endotérmico entre 500 e 600°C, que está associado ao processo de desidroxilação da caulinita, como consequência da transformação da caulinita ainda existente no metacaulim. O pico exotérmico por volta de 950°C indica a recristalização da metacaulinita, típica da

nucleação da mulita. Os ensaios de termogravimetria (TG) e análise termodiferencial (ATD) confirmam os resultados obtidos por DRX em relação à calcinação deficiente do metacaulim comercial utilizado neste estudo.

3.1.8.6. Microscopia eletrônica de varredura

O equipamento usado para obtenção das micrografias que permitiram o estudo da morfologia das amostras de argamassas de reparo e do metacaulim foi um microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550, operando a 20 kV, disponível no LAMAV da UENF.

As amostras da superfície de fratura das argamassas (que possuíam tamanho inferior a 1 cm²) e do metacaulim, foram secas em estufa a 50°C por 48 horas e fixadas no suporte porta-amostras do MEV (*stub* de alumínio) por meio de uma fita adesiva dupla face de cobre (condutora elétrica), a fim de garantir que as amostras ficassem carregadas negativamente durante a varredura do feixe eletrônico. Como as amostras das argamassas possuíam superfície irregular, foi necessário utilizar uma cola condutora de prata que preenchesse os vazios entre a amostra e a fita adesiva de cobre para melhorar a condutividade. Por fim, foi feito o recobrimento das amostras com platina (processo de metalização) com uma camada de espessura adequada para a produção de elétrons secundários. O equipamento utilizado e as etapas de preparação das amostras são apresentados na Figura 3.8.

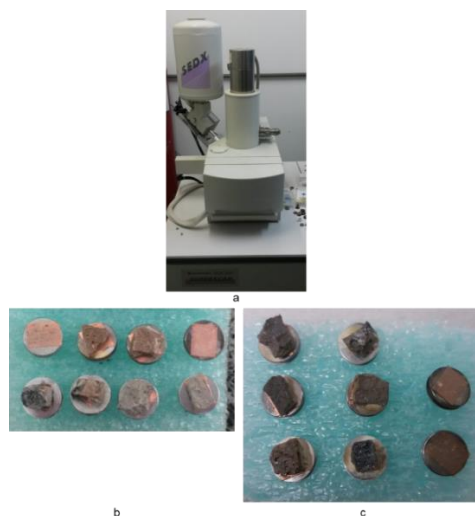


Figura 3.8- (a) Microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu, modelo SSX-550; (b) amostras antes da metalização; (c) amostras após metalização.

A Figura 3.9 mostra a morfologia lamelar do metacaulim. As micrografias apresentam estrutura das partículas deste material, majoritariamente desorganizada devido à desidroxilação do caulim, ou seja, não é possível observar as folhas tetraédricas e octaédricas características da caulinita in natura.

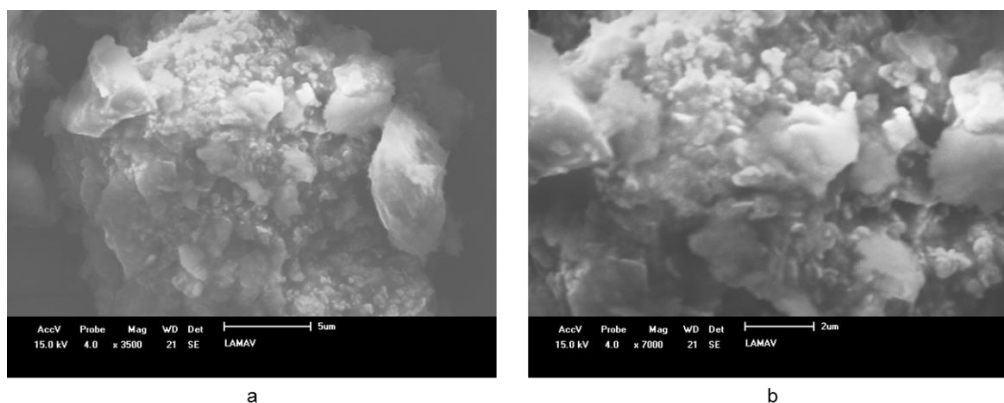


Figura 3.9 – Micrografias do metacaulim.

3.1.9. Silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3)

O silicato de sódio alcalino comercial (fornecido pela casa Wolff – Rio de Janeiro), um dos materiais ativadores na fabricação dos geopolímeros, teve as propriedades físicas e químicas informadas pelo fabricante (Tabela 3.12).

Tabela 3.12 - Propriedades físicas e químicas do silicato de sódio alcalino comercial. Dados fornecidos pelo fabricante.

Especificações	Limites	Resultado do ensaio
Massa específica (g/cm^3)	1,56 - 1,60	1,57
Na_2O (%)	14,50 - 15,30	14,70
SiO_2 (%)	32,00 - 33,00	32,20
H_2O (%)	-	53,1
Sólidos totais (%)	46,50 - 48,30	46,90
Relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (%)	2,10 - 2,25	2,19

3.1.10. Hidróxido de potássio (KOH)

Outro material ativador alcalino para fabricação dos geopolímeros foi o hidróxido de potássio comercial (fornecido pela casa Wolff – Rio de Janeiro), com

87,1% de óxido de potássio e 12,9% de água, conforme informado pelo fabricante.

3.2. Métodos

Após breve descrição dos materiais usados para confeccionar os corpos de prova desta pesquisa, um resumo da sequência experimental que foi executada é descrito no organograma mostrado na Figura 3.10.

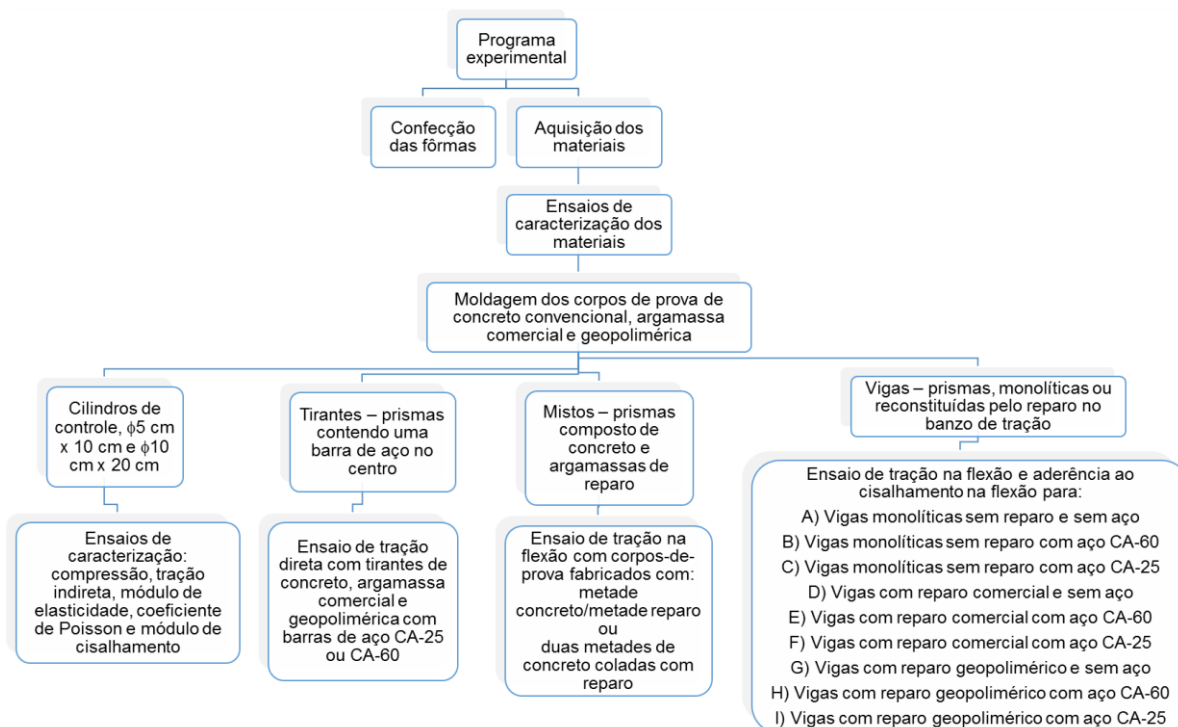


Figura 3.10 - Organograma do programa experimental.

3.2.1. Dimensionamento das vigas e cálculo das armaduras

Viga é um elemento estrutural em que o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal e a flexão é preponderante (ABNT NBR 6118, 2014).

Neste item detalha-se o dimensionamento da geometria das vigas ensaiadas neste trabalho, bem como das armaduras longitudinal e transversal nelas utilizadas. As vigas confeccionadas eram prismáticas de seção quadrada com largura e altura de 100 mm e comprimento de 650 mm. O dimensionamento foi feito para que o elemento estrutural tivesse 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 no banzo tracionado das vigas sem armadura (Figura 3.11).

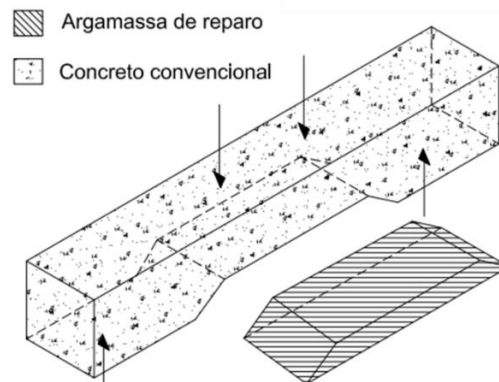


Figura 3.11 - Sistema de reparo no banzo tracionado da viga.

As dimensões da viga sem armadura, os detalhes do entalhe em forma de prisma trapezoidal, bem como as distâncias entre os apoios e cargas concentradas são mostrados nas Figuras 3.12 e 3.13.

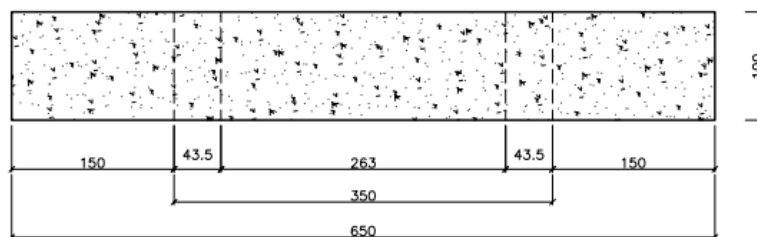


Figura 3.12 - Planta da viga sem aço (dimensões em mm).

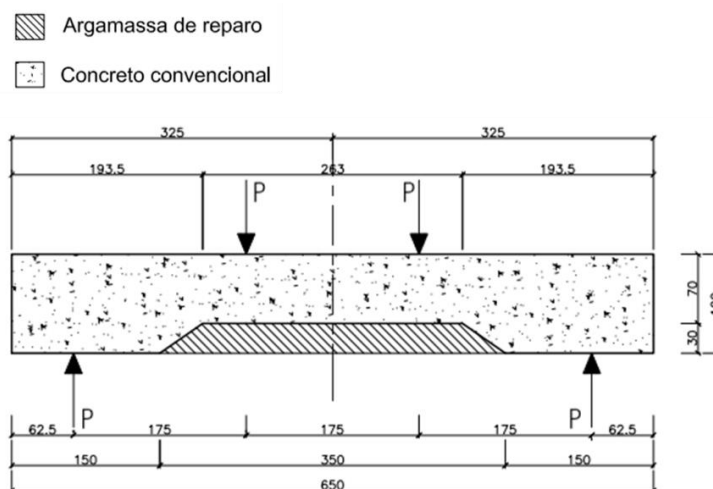


Figura 3.13 - Esquema dos apoios, das cargas concentradas e dimensões das vigas sem armadura para os ensaios de tração na flexão a quatro pontos (dimensões em mm da vista frontal).

Os diagramas de esforço cortante e de momento fletor são mostrados na Figura 3.14.

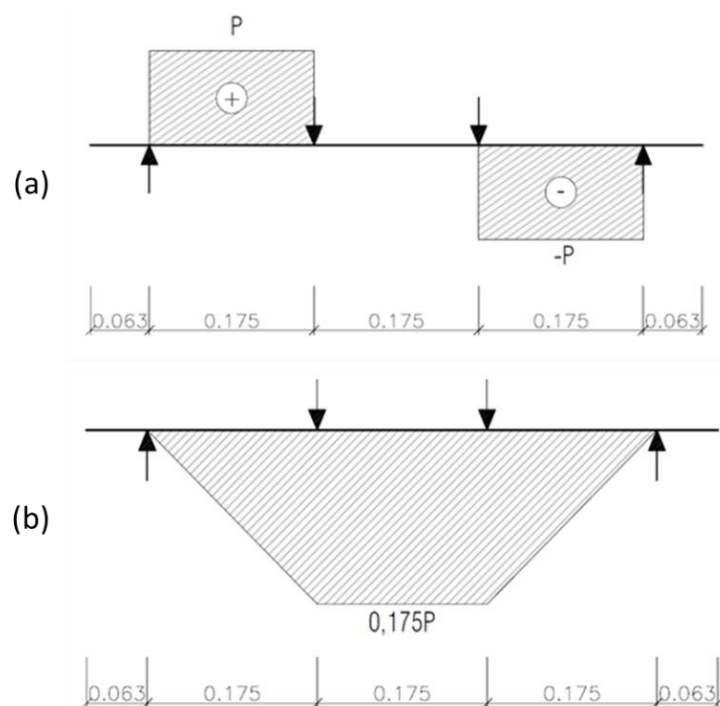


Figura 3.14 - Diagramas de esforços: (a) cortante; (b) momento fletor (dimensões em metros).

Após o dimensionamento da geometria da viga e do entalhe trapezoidal, foi feito o cálculo da armadura longitudinal de tração e da armadura transversal, para que no ensaio da ABNT NBR 12142 (2010) o corpo de prova tivesse ruptura à flexão e não pelo esforço cortante. O objetivo do colapso à flexão foi para avaliar a aderência do substrato às argamassas de reparo, localizado, quase que em sua totalidade, na região de flexão pura.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), nos projetos de estruturas de concreto armado deve ser utilizado aço classificado pela ABNT NBR 7480 (2007), com valor característico da resistência de escoamento nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60 e diâmetros nominais estabelecidos na norma.

Para pesquisar o comportamento das argamassas de reparo frente a dois tipos de aço, adotaram-se barras nervuradas e lisas como armadura de tração. Utilizou-se concreto com resistência próxima de 50 MPa. Os cálculos, para que as vigas (com geometria já determinada) tivessem ruptura na região de momento fletor máximo, direcionaram para o uso de um diâmetro de armadura de tração não comercializado

do tipo CA-50. Por isso optou-se por vigas com armadura de flexão utilizando barras de aço nervuradas do tipo CA-60, com diâmetro nominal de 4,2 mm como armadura 1 (Figura 3.15), utilizada nas vigas das séries B, E e H, e barras de aço lisas CA-25, com diâmetro de 6,3 mm como armadura 2 (Figura 3.16), utilizadas nas vigas das séries C, F e I. Na armadura de compressão das vigas foram utilizadas barras de aço nervuradas CA-60, com diâmetro de 4,2 mm. Todas as séries e características das vigas estão detalhadas no item 3.13.3.3 deste estudo.

Para evitar ruptura das vigas por cisalhamento, garantindo a ruptura na região de flexão pura, foram colocados dois estribos (além do construtivo) em todas as regiões de cisalhamento. Como um dos principais objetivos desta pesquisa foi o de avaliar a eficácia das argamassas de reparo, estes estribos foram posicionados em regiões fora dos entalhes. A Figura 3.17 mostra o detalhamento dos estribos utilizados nas vigas. A Tabela 3.13 mostra detalhes das armaduras utilizadas. A planta da viga com armadura longitudinal é mostrada na Figura 3.18. Os detalhes da vista lateral e corte A-A' são mostrados na Figura 3.19. A Figura 3.20 mostra o esquema das vigas com todas as dimensões. A Figura 3.21 mostra as armaduras prontas para uso.

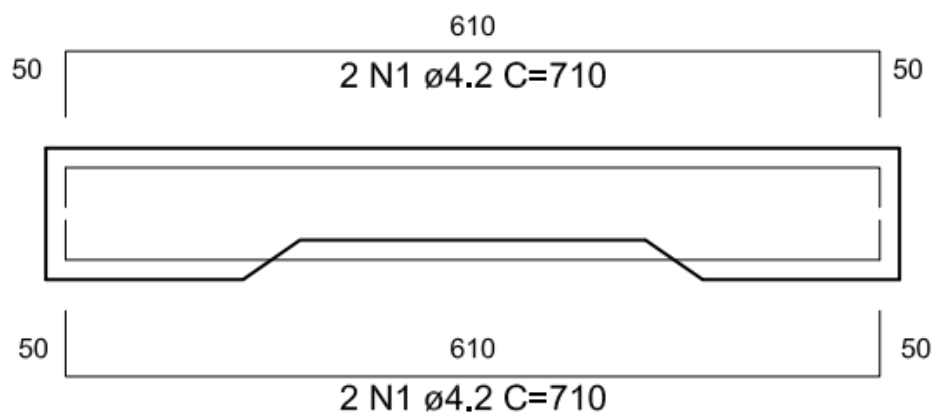


Figura 3.15 - Detalhamento da armadura 1: barras de aço longitudinais (dimensões em mm).

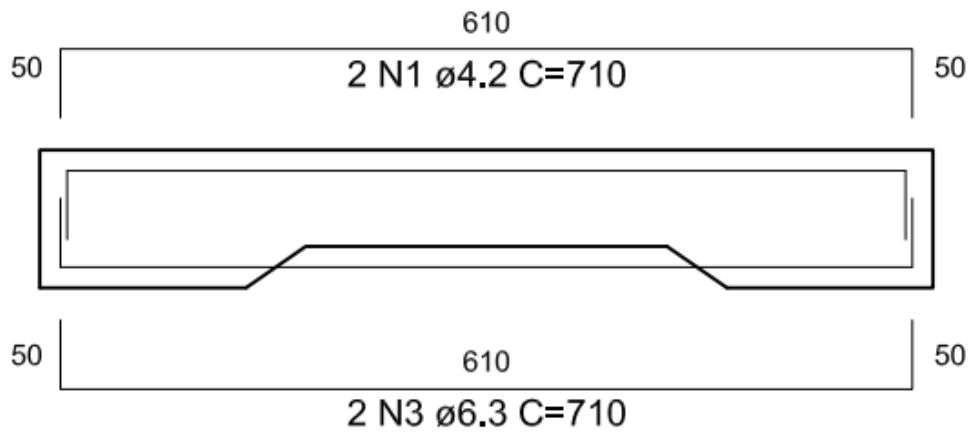


Figura 3.16 - Detalhamento da armadura 2: barras de aço longitudinais (dimensões em mm).

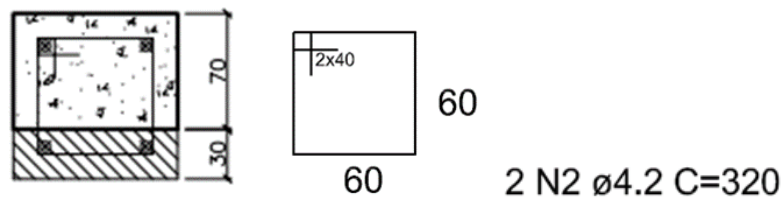


Figura 3.17 - Detalhamento da armadura transversal utilizada nas vigas (dimensões em mm).

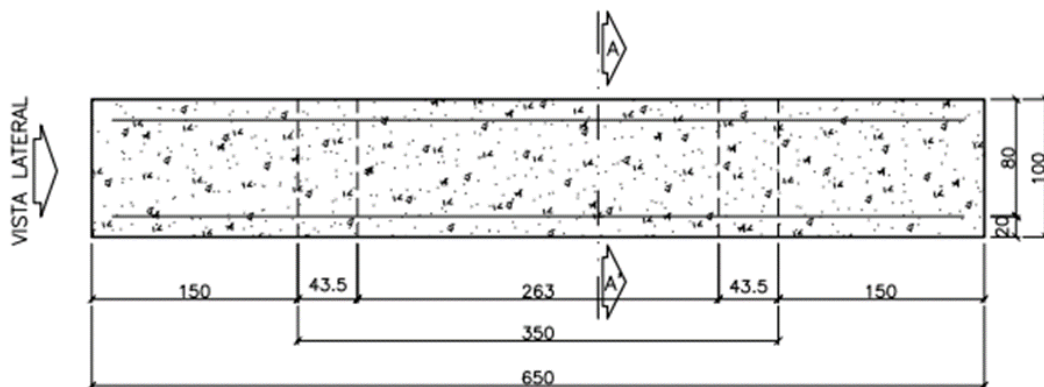


Figura 3.18 - Planta da viga (dimensões em mm).

- Argamassa de reparo
- Concreto convencional

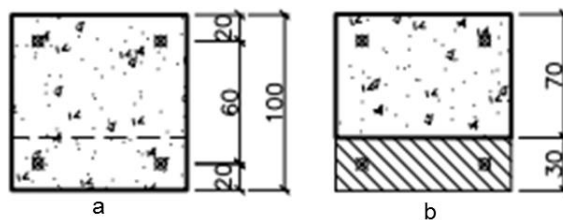




Figura 3.19 - Detalhes da viga: (a) vista lateral; (b) corte A-A' (dimensões em mm).

Tabela 3.13 - Tipos de aço e comprimentos utilizados nas armaduras.

Aço	N.º	ϕ (mm)	Comprimento (mm)
CA-60	1	4,2	710
	2	4,2	320
CA-25	3	6,3	710

 Argamassa de reparo

 Concreto convencional

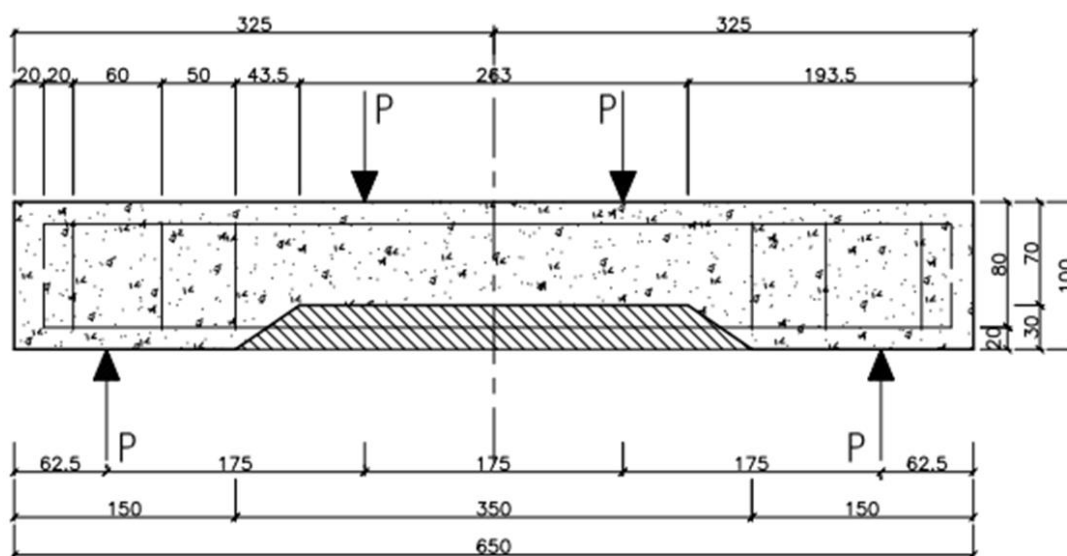


Figura 3.20 - Esquema das vigas utilizadas nos ensaios de tração na flexão a quatro pontos (dimensões em mm).



Figura 3.21 - Armaduras prontas para uso: (a) armadura 1 com armadura de flexão CA-60; (b) armadura 2 com armadura de flexão CA-25.

A taxa de armadura longitudinal de tração (CA-60) para a armadura 1 foi de 0,35% e para a armadura 2 (CA-25) foi de 0,78%. A Tabela 3.14 mostra as dimensões

das vigas e detalhes das armaduras.

Tabela 3.14 - Dimensões das vigas e detalhes das armaduras.

Vigas	b_w (mm)	h (mm)	d (mm)	d' (mm)	A_s (mm ²)	S (mm)	ρ (%)	A_{sw} (mm ²)	ρ_{sw} (%)
Viga com armadura 1 (CA-60)	100,0	100,0	80,0	20,0	27,71	50,0	0,35	27,71	0,55
Viga com armadura 2 (Ca-25)	100,0	100,0	80,0	20,0	62,34	50,0	0,78	27,71	0,55

b_w Largura da seção transversal da viga;

h Altura da viga;

d Altura efetiva da viga;

d' Cobrimento estrutural da viga;

A_s Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração;

s espaçamento entre os estribos (centro a centro)

ρ Taxa geométrica de armadura longitudinal de tração;

A_{sw} Área da seção transversal da armadura transversal;

ρ_{sw} Taxa geométrica de armadura transversal.

As variáveis do estudo experimental que influenciaram o comportamento da ligação substrato-reparo e, conseqüentemente, o comportamento das vigas foram: conformação superficial do aço (lisa ou nervurada) da armadura longitudinal de tração das vigas e argamassas de reparo utilizadas (comercial e geopolimérica).

3.3. Instrumentação dos corpos de prova

Para medir as deformações dos corpos de prova foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) da empresa Excel Sensores.

Nos corpos de prova cilíndricos, ensaiados à compressão axial, foram utilizados dois extensômetros diametralmente opostos. A leitura das deformações na superfície destes corpos de prova foi feita com o modelo PA-06-250TG-120-L, roseta dupla a 90°, autocompensação de temperatura para aço, resistência de 120 ohms; com fios de cobre soldados nos terminais, comprimento 50 mm e dimensões da grade de 20,0 mm x 6,0 mm (Figura 3.22a). Aferindo-se as deformações específicas, para cada etapa de carga até a ruptura, foi possível obter os gráficos de tensão *versus* deformação transversal (lateral), de tensão *versus* deformação longitudinal (axial), o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e, conseqüentemente, o módulo de

cisalhamento.

Para as vigas armadas foram utilizados dois tipos de extensômetros: um para medir as deformações no concreto/reparo e outro no aço. Para medir as deformações do concreto na zona de compressão (superfície superior da viga) e para a zona de tração (lateral inferior das vigas sem armadura) foram usados extensômetros modelo PA-06-800BA-120-L, unidirecional, longos, especiais para concreto; autocompensação de temperatura para aço; resistência de 120 ohms; com fios de cobre soldados nos terminais, comprimento 50 mm e dimensões da grade de 20,0 mm x 6,0 mm (Figura 3.22b). As deformações do aço foram obtidas por um extensômetro modelo PA-06-250BA-120-L, unidirecional, forma tradicional; autocompensação de temperatura para aço; resistência de 120 ohms; com fios de cobre soldados nos terminais, comprimento 50 mm e dimensões da grade de 6,0 mm x 3,0 mm (Figura 3.22c).

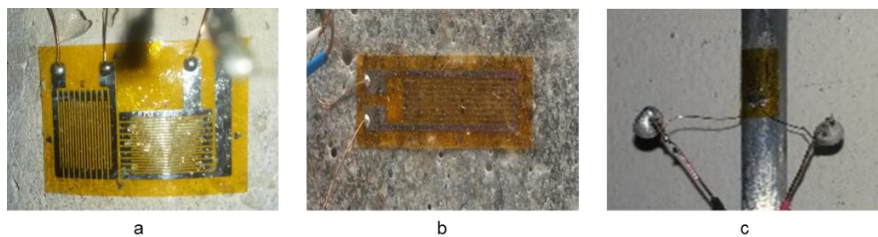


Figura 3.22 - Extensômetros: (a) PA-06-250TG-120-L; (b) PA-06-250BA-120-L; (c) PA-06-800BA-120-L.

Além de extensômetros, nas vigas foi utilizado um *LVDT* (sensor para medição de deslocamentos lineares), que permitiu a medição das deflexões (Figura 3.23).



Figura 3.23 - *LVDT* utilizado para medição dos deslocamentos verticais nas vigas.

Um multímetro da marca Icel, modelo IK 1500, foi utilizado para conferir se os extensômetros colados estavam funcionando de forma correta (Figura 3.24).



Figura 3.24 - Multímetro da marca Icel, modelo IK 1500.

Todos extensômetros e *LVDT* foram conectados a um sistema de aquisição de dados composto por um condicionador Lynx ADS 2000 de 16 bits (Figura 3.25) e um computador *desktop* com *software* AQDados (versão 7.02.08).



Figura 3.25 - Condicionador Lynx ADS 2000 de 16 bits: (a) frente; (b) traseira.

3.4. Dosagem do concreto de substrato

Os valores obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais componentes do concreto deste trabalho foram verificados com valores bem próximos aos de alguns trabalhos que envolviam pesquisas com concreto de alto desempenho no LECIV. Então, optou-se por utilizar a dosagem de Smiderle (2016), conforme Tabela 3.15. Este concreto atingiu, no trabalho da pesquisadora, resistência à compressão igual a 50 MPa aos 28 dias. Sua dosagem foi feita no programa BetonLab Pro3, cujos fundamentos são baseados no método do empacotamento compressível, desenvolvido por De Larrard, 1999 *apud* Smiderle (2016).

O valor de resistência mecânica do concreto adotado neste trabalho está em consonância com as obras de grande porte em andamento na região Norte Fluminense, tais como porto do Açú e estaleiro da Barra do Furado.

Tabela 3.15 - Composição do concreto, em kg/m³ (SMIDERLE, 2016).

Materiais	Kg/m³
Cimento CPV ARI	511,60
Areia	719,77
Brita 0	905,20
Água	225,81
Superplastificante	1,47

3.5. Fôrmas

Este item descreve as fôrmas para moldagem dos corpos de prova de tirantes, mistos e vigas com os diferentes materiais cimentícios, que foram confeccionadas de compensado naval com espessura de 15 mm, de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015).

As fôrmas para as vigas possuíam compartimentos para 14 corpos de prova. A quantidade de compartimentos foi definida de acordo com as dimensões da mesa vibratória utilizada para adensamento do concreto na fôrma. De acordo com o item 3.12.3.3, foram moldadas 27 vigas; por isso foram necessárias duas concretagens para moldá-las. As dimensões da fôrma para vigas e a fôrma pronta para uso são mostradas na Figura 3.26, e seus detalhes podem ser vistos na Figura 3.27.

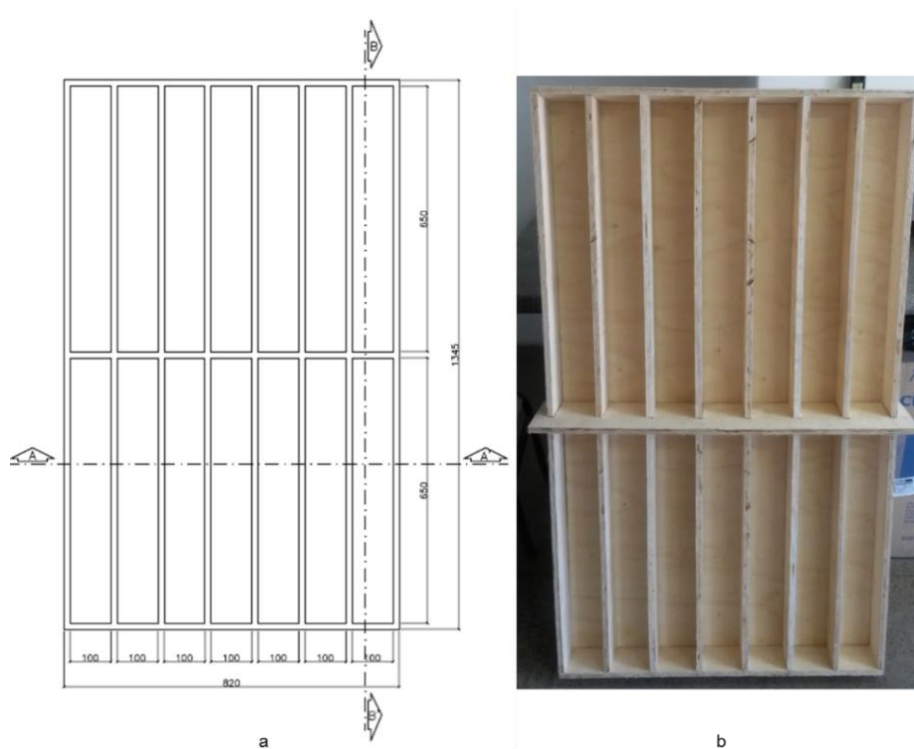


Figura 3.26 - Fôrma para vigas: (a) esquema com dimensões em mm; (b) fôrma pronta para uso.

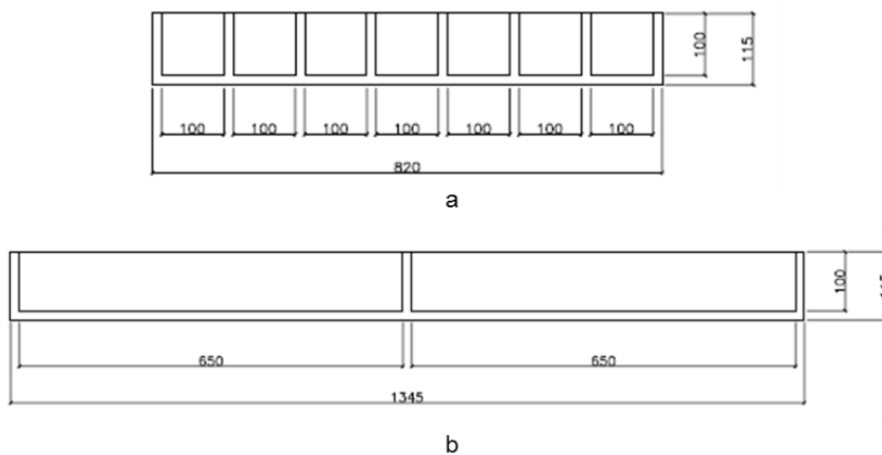


Figura 3.27 - Detalhes da fôrma para vigas com dimensões em mm: (a) corte A-A'; (b) corte B-B'.

Foi confeccionada uma fôrma para moldar 12 corpos de prova mistos. Cada corpo de prova foi produzido com 2 ou 3 partes de materiais cimentícios diferentes, cujas configurações são descritas no item 3.12.1.1. Para fabricar corpos de prova com duas partes de materiais distintos foi colocada uma chapa de aço entre os compartimentos (no meio), para delimitar a parte do concreto convencional e possibilitar a moldagem com o outro material (argamassas de reparo), a fim de estudar

a aderência entre os materiais compósitos. A Figura 3.28 mostra as dimensões da fôrma e a mesma pronta para uso. A Figura 3.29 apresenta os detalhes desta fôrma.

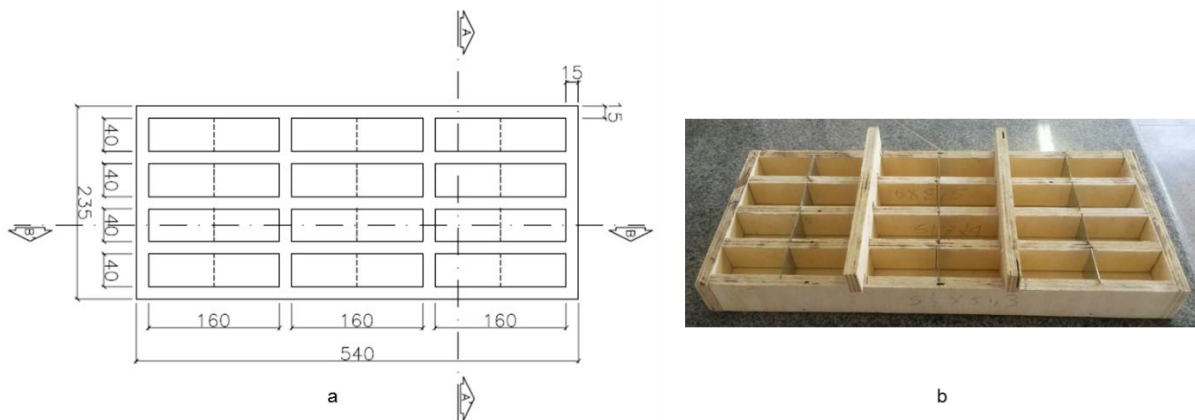


Figura 3.28 - Fôrma para corpos de prova mistos: (a) esquema com dimensões em mm; (b) fôrma pronta para uso.

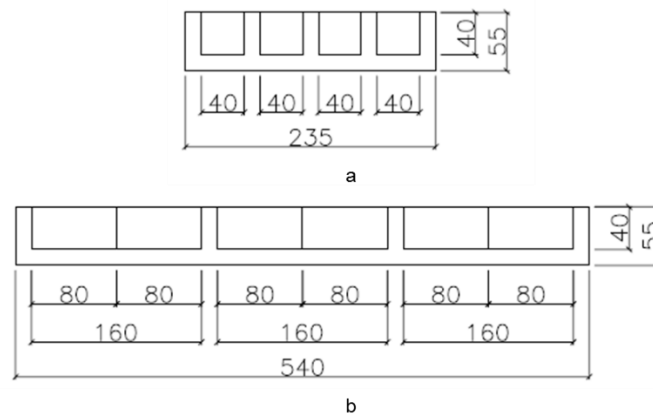


Figura 3.29 - Detalhes da fôrma com dimensões em mm: (a) corte A-A'; (b) corte B-B'.

Dois fôrmas para tirantes foram preparadas para moldar 9 corpos de prova: uma para o aço CA-60 e outra para o aço CA-25. Por meio de um furo cuidadosamente feito no centro da seção transversal quadrada de cada compartimento, foram inseridas e fixadas as barras de aço. A confecção da fôrma foi baseada na ABNT NBR 7477 (1982) e está descrita com detalhes no item 3.12.2.2. As Figuras 3.30 e 3.31 mostram as dimensões da fôrma, ela pronta para uso para o aço CA-60 e seus detalhes. As Figuras 3.32 e 3.33 apresentam as dimensões da fôrma, a mesma pronta para uso para o aço CA-25 e seus detalhes.

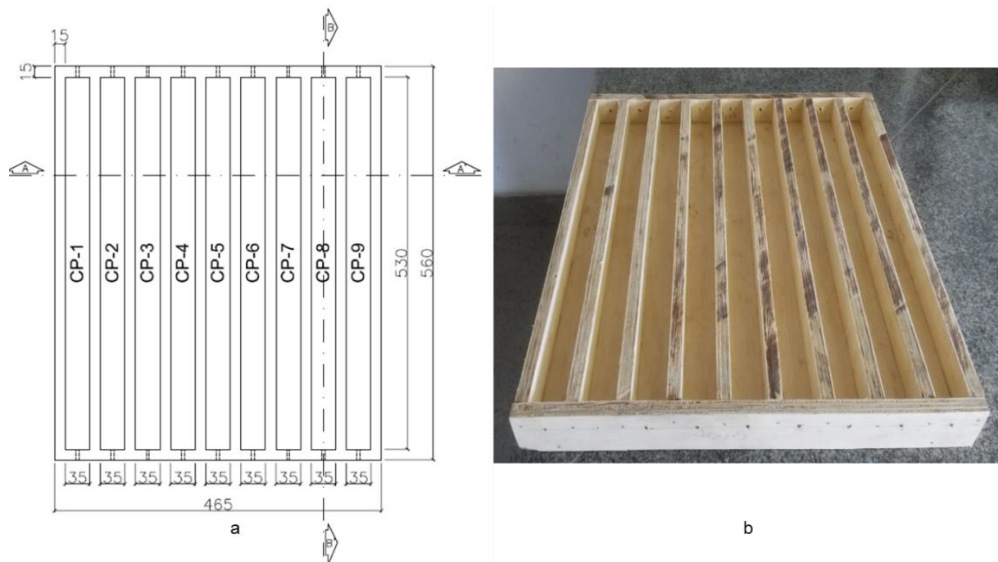


Figura 3.30 - Fôrma para tirantes com aço CA-60: (a) esquema com dimensões em mm; (b) fôrma pronta para uso.

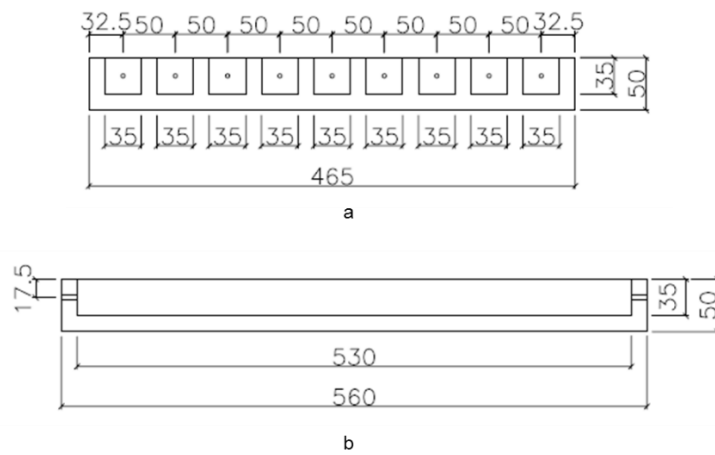


Figura 3.31 - Detalhes da fôrma para tirantes para o aço CA-60, com dimensões em mm: (a) corte A-A'; (b) corte B-B'.

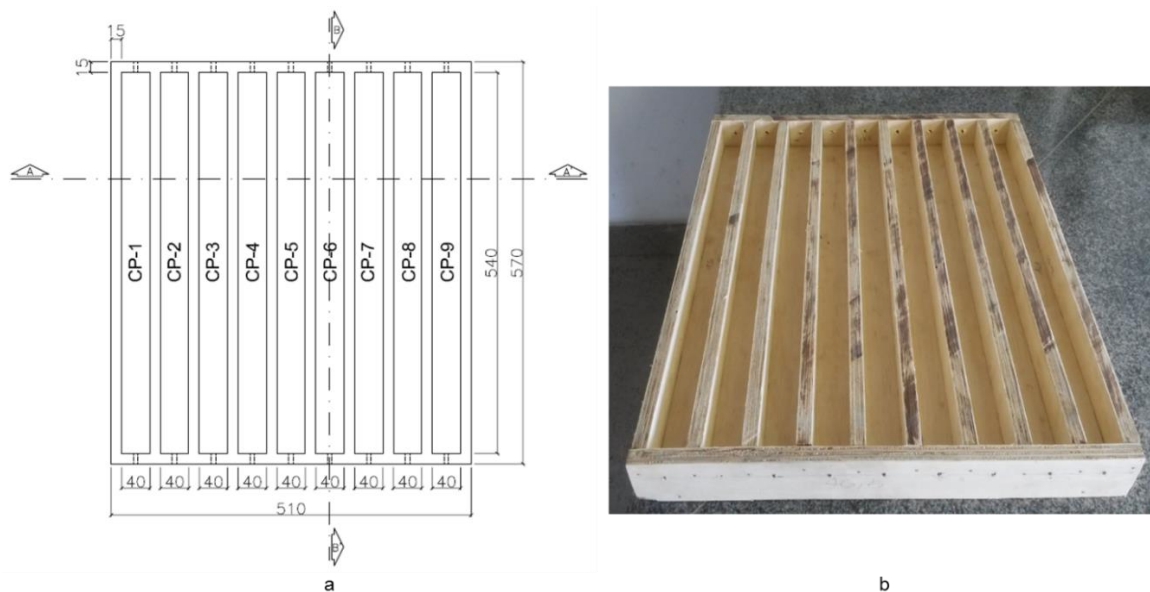


Figura 3.32 - Fôrma para tirantes com aço CA-25: (a) esquema com dimensões em mm; (b) fôrma pronta para uso.

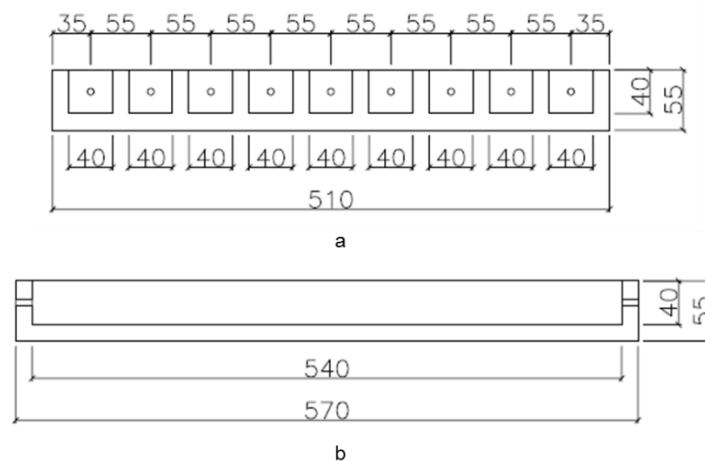


Figura 3.33 - Detalhes da fôrma para tirantes para o CA-25, com dimensões em mm: (a) corte A-A'; (b) corte B-B'.

3.6. Preparação das fôrmas para concretagem

Todas as fôrmas foram untadas com vaselina em pasta para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova (ABNT NBR 5738, 2015).

Foram confeccionadas duas fôrmas para os tirantes: uma para os de aço CA-60 e outra para os de aço CA-25. A Figura 3.34 mostra as fôrmas untadas já com as barras de aço inseridas e fixadas.



Figura 3.34 - Fôrmas para tirantes com as barras de aço inseridas e fixadas: (a) CA-60; (b) CA-25.

A fôrma das vigas foi configurada para receber o concreto fresco e após 28 dias receber as argamassas de reparo. As configurações dos tipos de vigas estão descritas no item 3.12.3.6. Algumas repartições foram montadas com um prisma trapezoidal de isopor (Figura 3.35) para as vigas que foram reconstituídas.

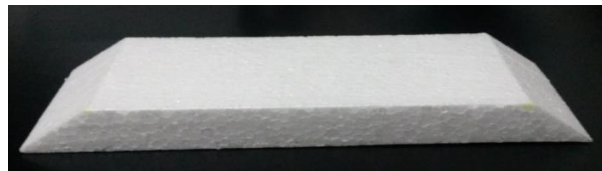


Figura 3.35 - Prisma trapezoidal de isopor para realização do entalhe nas vigas que receberam reparo.

Conforme a configuração de cada tipo de viga, algumas foram moldadas com armadura com extensômetro na região de tração, para medir sua deformação (Figura 3.36). Nas vigas armadas que receberam argamassas de reparo, os moldes de isopor foram cortados para se encaixarem na armadura. O corte foi feito de maneira que se pudesse isolar o aço do concreto quando da moldagem. Para isso, fitas adesivas foram coladas, como mostra a Figura 3.37. Esta colagem foi feita para garantir que o concreto do substrato não penetrasse na região onde as argamassas de reparo seriam aplicadas posteriormente e aderissem ao aço. A Figura 3.38 mostra as fôrmas prontas para o uso.



Figura 3.36 - Armaduras com extensômetros: (a) CA-60; (b) CA-25.



Figura 3.37 - Detalhe das fitas adesivas coladas para vedar a região de aplicação das argamassas de reparo.



Figura 3.38 - Fôrmas das vigas prontas para receber o concreto.

3.7. Fabricação do concreto e moldagem dos corpos de prova

A concretagem foi realizada no LECIV sob temperatura ambiente média de 32°C. Seguindo a sequência de Smiderle (2016), a mistura do concreto foi feita em uma betoneira com capacidade máxima de 140 litros, previamente umedecida. Segue a descrição de cada etapa:

1. mistura por trinta segundos do cimento com a brita (Figura 3.39a);
2. mistura por um minuto, incluindo metade da água e o total do aditivo superplastificante (Figura 3.39b);
3. mistura por três minutos, acrescentando a areia e o restante da água (Figura 3.39c);
4. Parada da betoneira por um minuto para retirar o excesso de mistura aderida às paredes da betoneira;
5. mistura por mais um minuto. O aspecto final do concreto recém-misturado e logo após ser retirado da betoneira (Figura 3.39d).

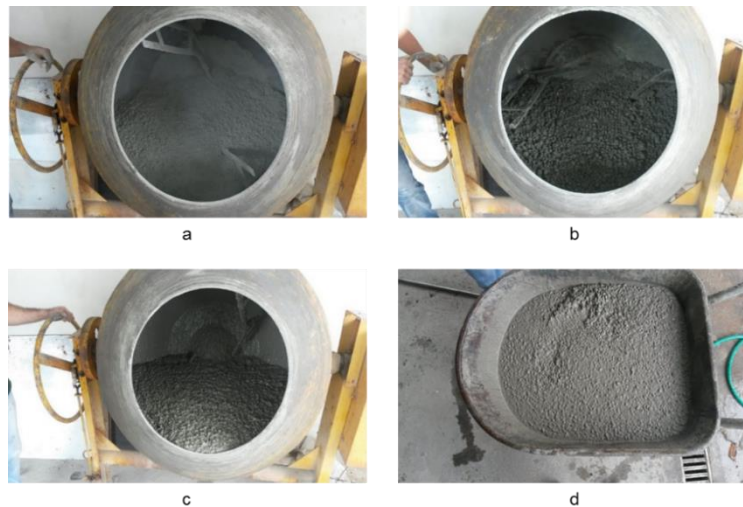


Figura 3.39 - Etapas da concretagem: (a) etapa 1; (b) etapa 2; (c) etapa 3; (d) aspecto final do concreto recém-misturado e logo após ser retirado da betoneira.

Após a retirada do concreto da betoneira, foi feito o ensaio de abatimento do troco de cone para avaliar sua consistência, conforme preconiza a ABNT NBR NM 67 (1998), atingindo o valor de 200 mm (Figura 3.40). Em seguida, procedeu-se a moldagem dos corpos de prova.



Figura 3.40 - Ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme preconiza a ABNT NBR NM 67 (1998).

Foram moldados os seguintes corpos de prova: 9 tirantes com aço CA-60, 9 tirantes com aço CA-25, 14 vigas, 18 metades para os corpos de prova mistos (Figura 3.41a). Além disso, foram moldados 6 cilindros de controle para avaliar a resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral do concreto convencional, utilizando-se moldes metálicos de ϕ 100 mm x 200 mm. Toda moldagem seguiu as prescrições da ABNT NBR 5738 (2015). O adensamento foi feito em uma mesa vibratória de 2400 vibrações/min (Figura 3.41c), de acordo com a especificação da norma. A Figura 3.41b mostra o aspecto do concreto das vigas logo após moldagem. Em seguida, os corpos de prova foram cobertos por 24 horas com um tecido úmido não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar perda de água do concreto e protegê-lo da ação das intempéries.

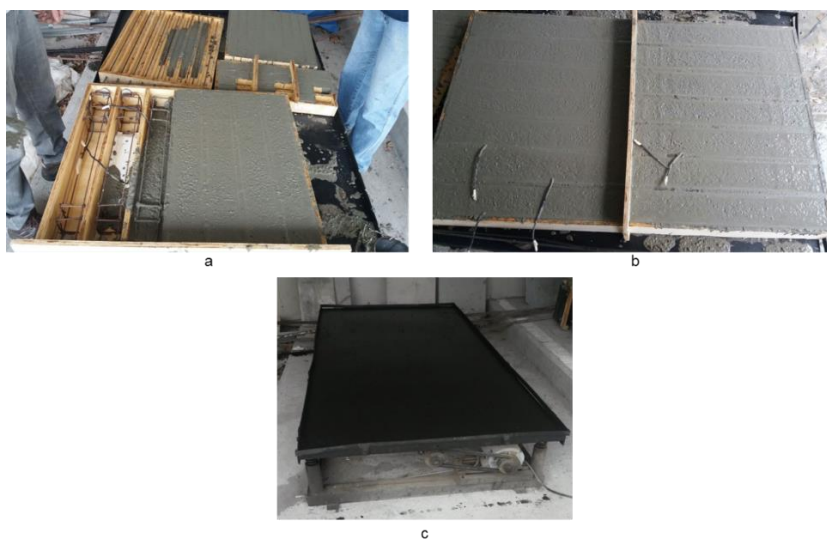


Figura 3.41 - Moldagem do concreto: (a) corpos de prova de tirantes, mistos e vigas; (b) aspecto das vigas logo após a primeira concretagem; (c) mesa vibratória.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova de concreto foram retirados das fôrmas e colocados em cura úmida. Eles permaneceram submersos durante 28 dias em água saturada de hidróxido de cálcio (Figura 3.42).



Figura 3.42 - Corpos de prova submersos em água saturada de hidróxido de cálcio: (a) vigas; (b) cilíndricos e mistos; (c) tirantes.

Após a desmoldagem dos primeiros corpos de prova de concreto, todas as fôrmas foram limpas e devidamente montadas para receber a segunda concretagem (que ocorreu no LECIV sob as mesmas condições climáticas da primeira moldagem). Então, as 13 vigas que faltaram para atingir um total de 27 corpos de prova foram fabricadas de acordo com as configurações descritas no item 3.12.3.6. Seis cilindros de controle também foram moldados. A fôrma para vigas foi novamente configurada com as armaduras e os moldes de isopor, como mostra a Figura 3.43. O valor obtido no ensaio de abatimento de tronco de cone foi o mesmo da primeira concretagem. A segunda concretagem foi feita em condições e procedimentos similares às da primeira.



Figura 3.43 - (a) fôrma pronta para concretagem das vigas; (b) aspecto físico das vigas logo após a moldagem na segunda concretagem.

3.8. Produção da argamassa comercial

A mistura da argamassa comercial foi realizada conforme as especificações do fabricante. A relação água/aglomerante foi de 2,6 litros de água por 20 kg do material. Para sua fabricação foi utilizado um misturador planetário de eixo vertical do LECIV (Figura 3.44). A argamassa fabricada foi utilizada para confeccionar 6 corpos de prova cilíndricos de ϕ 50 mm x 100 mm (3 para determinação da resistência à compressão axial e 3 para tração por compressão diametral), 18 tirantes, 6 mistos e 9 entalhes das vigas de concreto armado prontas há 28 dias. Os detalhes da moldagem da argamassa comercial para as vigas e corpos de prova mistos são discutidos mais detalhadamente nos itens 3.12.1.2 e 3.12.3.1. Neste trabalho nomeou-se a argamassa comercial com cura à temperatura ambiente de ACQT (argamassa comercial Quartzolit com cura à temperatura ambiente).

Destaca-se na ficha técnica do material que: a resistência à compressão atinge 34 MPa aos 28 dias; não havia informações sobre o tipo de cura a ser adotado após aplicação do produto; o substrato deve ser apicoado e umedecido antes da moldagem.

Diversos contatos foram feitos com a equipe técnica do fabricante da argamassa comercial, com o objetivo de saber sobre a cura do produto após a moldagem. Foi afirmado pela equipe que todos os produtos da Quartzolit não necessitam de cura úmida.

Nesta pesquisa, e em trabalhos como o de Mazza (2010), Phoo-ngernkham *et al.* (2015) e Ranjbar *et al.* (2016), as argamassas e concretos geopoliméricos utilizados não tiveram cura úmida e o substrato não foi apicoado para receber os diferentes reparos. Por este motivo, e segundo informações do fabricante, adotou-se o mesmo procedimento de moldagem e cura das argamassas geopoliméricas para a moldagem da argamassa comercial em todos os corpos de prova.

É importante relatar que após 72 horas, ao desmoldar os corpos de prova, os tirantes ficaram com muitos defeitos de moldagem (vazios). Isto deve ter ocorrido pela falta de adensamento adequado (feito por meio de marteladas nas fôrmas) e pela moderada trabalhabilidade da argamassa comercial, avaliada no ensaio de consistência. Os corpos de prova cilíndricos ficaram bons e foram submersos em água saturada com cal para se avaliar a cura úmida do produto (apesar do fabricante não recomendar este procedimento). Este procedimento foi adotado para comparar as resistências mecânicas do produto com e sem cura úmida. Nesta pesquisa nomeamos

a argamassa comercial com cura submersa em água saturada com cal de ACQU (argamassa comercial Quartzolit com cura úmida) Em seguida, os tirantes foram moldados novamente. Desta vez, com adensamento feito na mesma mesa vibratória utilizada para os corpos de prova de concreto.



Figura 3.44 - Misturador planetário utilizado para confecção das argamassas de reparo.

O índice de consistência da argamassa comercial foi de 178 mm, de acordo com a norma ABNT NBR 7215 (1996).

Quanto à moldagem dos corpos de prova cilíndricos, foram seguidas as prescrições da ABNT NBR 5738 (2015). As misturas foram preparadas e moldadas em três camadas, com cada uma sendo adensada manualmente.

O aspecto dos corpos de prova de tirantes e cilíndricos, logo após a moldagem, é mostrado na Figura 3.45. Após 72 horas foram desmoldados e colocados em cura à temperatura ambiente.



Figura 3.45 - Aparência dos corpos de prova de tirantes e cilíndricos, logo após a moldagem.

3.9. Dosagem das argamassas geopoliméricas

As argamassas geopoliméricas deste trabalho foram produzidas com matérias-primas já consagradas entre pesquisadores da área (DIAS, 2001; SOARES, 2006; MAZZA, 2010; GOLIATH, 2017 e ROCHA, 2017).

Os principais materiais empregados no desenvolvimento das argamassas foram: metacaulim comercial (fonte de alumínio e silício); cimento Portland CPIIE-32 (fonte de cálcio); e como solução alcalina ativadora foi usada uma mistura de hidróxido de potássio (KOH) e silicato de sódio alcalino comercial (Na_2SiO_3), este último como fonte adicional de silício em solução.

Inicialmente foi adotada a composição de Goliath (2017), que utilizou argamassa geopolimérica (com 25,1 MPa de resistência à compressão axial) como adesivo no reforço de colunas curtas de concreto com fibras de carbono. A pesquisadora utilizou uma dosagem adaptada dos trabalhos de Dias (2001) e Mazza (2010), que obtiveram bons resultados em suas pesquisas. Mazza (2010) e Goliath (2017) utilizaram a composição dada pela Equação 7:

$$S : \text{areia} : L/S \quad (7)$$

onde,

- S (sólido): composto pelo somatório do metacaulim, cimento Portland, KOH e a parte sólida do Na_2SiO_3 ;
- areia: número que corresponde à relação entre a quantidade de areia e a quantidade do parâmetro S;
- L (líquido): somatório das medidas, em peso, de água de mistura e da parte líquida da solução de Na_2SiO_3 .

Entre as composições usadas por Mazza (2010), a proporção 1 : 1,5 : 0,36 atingiu 34,3 MPa de resistência à compressão. No entanto, esta dosagem foi avaliada neste trabalho e alcançou somente 22,4 MPa. Isto pode ter ocorrido devido à utilização de diferentes matérias-primas (de outros fabricantes), que levou a razões molares distintas, afetando a resistência mecânica. Mazza (2010) fabricou seu próprio metacaulim, enquanto que no presente trabalho o produto utilizado foi comercial e, de acordo com a DRX e as análises térmicas, o material não é totalmente amorfo, podendo ter sido um parâmetro influenciador da menor resistência mecânica obtida.

Então, nesta pesquisa foi utilizada a proporção 1 : 1,2 : 0,36 utilizada por Goliath (2017), sendo nomeada (neste trabalho) de AGT1 (argamassa geopolimérica de traço 1 : 1,2 : 0,36). Com esta composição foi possível confeccionar uma argamassa de reparo com trabalhabilidade, resistência mecânica e aderência que atendesse à aplicação deste estudo.

Para a confecção do produto, denominado por Goliath (2017) de resina geopolimérica, foram investigadas e fabricadas diversas composições, a fim de buscar um material que apresentasse viscosidade e resistência mecânica adequada para reforçar colunas curtas de concreto. As composições testadas foram confeccionadas em moldes cilíndricos de ϕ 50 mm x 100 mm e ensaiadas à compressão axial aos 14 dias. Após a escolha da composição da resina geopolimérica, foram confeccionados corpos de prova de ϕ 50 mm x 100 mm, três para cada idade, e verificada a resistência à compressão em 1, 3, 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias. Todos foram desmoldados após 24 horas e curados à temperatura ambiente até a data dos ensaios.

Com a AGT1 atingiu-se bons resultados neste trabalho. Mas o Item 3.12.2.4 mostra problemas de retração nos corpos de prova de tirantes antes mesmo do ensaio de tração direta. Por este motivo, optou-se por utilizar, também, outra proporção de argamassa geopolimérica que estava sendo desenvolvida concomitantemente a esta pesquisa. A composição escolhida foi a de Rocha (2017).

Um dos geopolímeros dosados por Rocha (2017), adaptado de Dias (2001), não utilizou cimento Portland como fonte de cálcio, sendo um geopolímero Na,K-PSS (com 35,2 MPa de resistência à compressão axial). Já a AGT1 que utilizou cimento Portland é um geopolímero Na,K,Ca-PSDS. A AGT1 ficou mais fluida e mais trabalhável, de acordo com o índice de consistência mostrado nos itens 3.10.1 e 3.10.2. A argamassa desenvolvida por Rocha (2017) foi adotada após a moldagem de todos os corpos de prova propostos inicialmente. Por isso, novos corpos de prova foram moldados com este geopolímero.

O geopolímero que Rocha (2017) fabricou (escolhido para este trabalho), com solução alcalina ativadora de dois componentes, foi denominado pela pesquisadora de s.Na-h.K com proporção 1 : 1 : 0,34. E nesta pesquisa foi denominado de AGT2 (argamassa geopolimérica traço 1 : 1 : 0,34).

As principais relações molares da AGT1 e AGT2 utilizadas neste trabalho são mostradas na Tabela 3.16. A Tabela 3.17 mostra a composição destas argamassas e

o consumo de materiais em kg/m³.

Tabela 3.16 - Relações molares das matérias-primas usadas na AGT1 e AGT2 (GOLIATH, 2017; ROCHA, 2017).

Componente	Número de mols (AGT1)	Número de mols (AGT2)
SiO ₂	3,89	5,70
Al ₂ O ₃	0,91	2,19
K ₂ O	1,11	0,84
Na ₂ O	0,63	0,75
CaO	1,51	-
Razões molares		
$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	4,3	2,6
$\frac{\text{SiO}_2}{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}}$	1,2	-
$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}}$	0,3	-
$\frac{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{CaO}}$	1,2	-
$\frac{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2}$	-	0,28
$\frac{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	-	0,72

Tabela 3.17 - Composição da AGT1 e AGT2, em kg/m³.

Materiais	Consumo AGT1 (kg/m ³)	Consumo AGT2 (kg/m ³)
Metacaulim	420,97	848,83
Areia	1214,84	848,83
Cimento CPIIE-32	191,56	-
Água	131,92	105,25
Silicato de sódio alcalino	447,77	529,67
Hidróxido de potássio	180,43	139,21

3.10. Produção das argamassas geopoliméricas

Neste item descreve-se a produção das argamassas geopoliméricas usadas nesta pesquisa: AGT1 e AGT2.

3.10.1. Produção da AGT1

Goliath (2017) descreveu a produção da AGT1 em cinco etapas distintas. Estas foram adotadas primeiramente por Dias (2001), Torgal (2007) e Mazza (2010). As etapas da produção da AGT1, adaptadas por Goliath (2017), estão apresentadas na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 - Etapas da produção da AGT1, de acordo com Goliath (2017).

Etapa	Descrição
A	<ul style="list-style-type: none">• pesa-se a água (Figura 3.46a);• pesa-se o hidróxido de potássio juntamente com a água (Figura 3.46b);• coloca-se a mistura (água e hidróxido de potássio) no agitador magnético (Figura 3.46c).
B	<ul style="list-style-type: none">• pesa-se o silicato de sódio alcalino comercial (Figura 3.47a);• adiciona-se a mistura de água e hidróxido de potássio ao silicato de sódio alcalino comercial (Figura 3.47b);• coloca-se a solução alcalina no agitador magnético (Figura 3.47c).
C	<ul style="list-style-type: none">• pesa-se a areia peneirada (# 45 μm). (Figura 3.48a);• pesa-se o metacaulim juntamente com a areia (Figura 3.48b);• pesa-se o cimento Portland juntamente com a parte sólida (areia e metacaulim) (Figura 3.48c);• homogeneiza-se a mistura sólida (Figura 3.48d).
D	<ul style="list-style-type: none">• retira-se a solução alcalina do agitador e espera-se o resfriamento até a temperatura ambiente (Figura 3.49a);• umedece-se a cuba da argamassadeira e coloca-se a solução alcalina (Figura 3.49b);• adiciona-se a mistura sólida na argamassadeira com a solução alcalina (Figura 3.49c).
E	<ul style="list-style-type: none">• liga-se a argamassadeira em baixa velocidade por 60 segundos (Figura 3.50a);• desliga-se a argamassadeira por 30 segundos para retirada dos sólidos presos nas paredes do recipiente (Figura 3.50b);• liga-se novamente a argamassadeira em baixa velocidade por 30 segundos;• altera-se a argamassadeira para a velocidade mais alta e mistura-se a argamassa por mais 30 segundos.

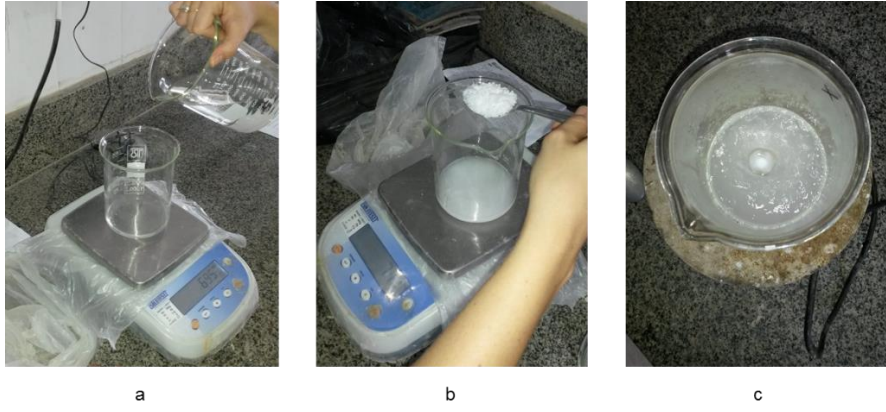


Figura 3.46 - Etapa A de preparo da AGT1.

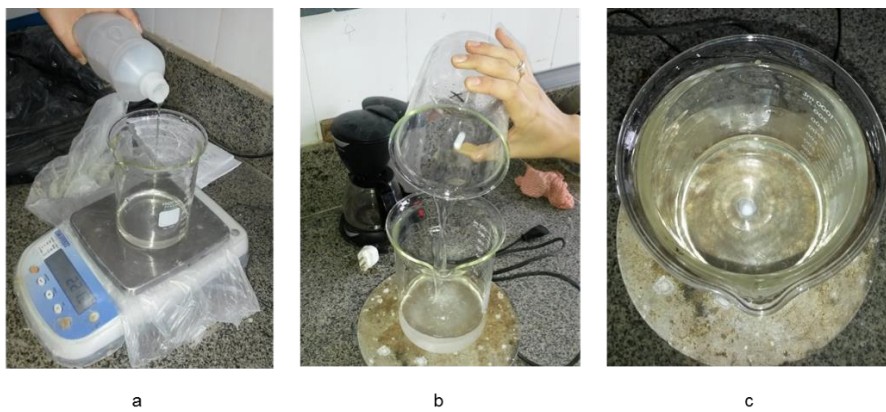


Figura 3.47 - Etapa B de preparo da AGT1.

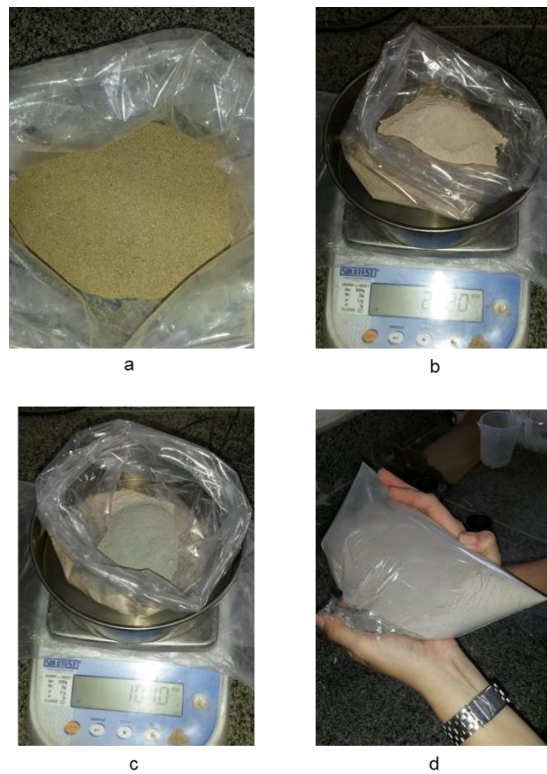


Figura 3.48 - Etapa C de preparo da AGT1.



Figura 3.49 - Etapa D de preparo da AGT1.

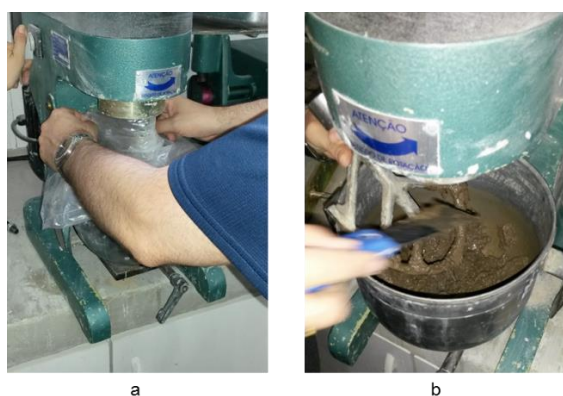


Figura 3.50 - Etapa E de preparo da AGT1.

O índice de consistência desta argamassa foi de 283 mm, de acordo com a norma ABNT NBR 7215 (1996).

3.10.2. Produção da AGT2

Rocha (2017) descreveu a produção da AGT2 em cinco etapas distintas. Estas são apresentadas na Tabela 3.19.

Tabela 3.19 - Etapas da produção da AGT2, de acordo com Rocha (2017).

Etapa	Descrição
A	<ul style="list-style-type: none"> • pesa-se a areia peneirada (#16 μm) e a armazena (Figura 3.51a); • pesa-se o metacaulim e o armazena (Figura 3.51b).
B	<ul style="list-style-type: none"> • mistura-se a solução alcalina ativadora (água, hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino comercial) durante 5 minutos no agitador magnético e a armazena durante 24 horas de antecedência da moldagem, para que esteja totalmente resfriada (Figura 3.52).
C	<ul style="list-style-type: none"> • mistura-se manualmente o metacaulim com a solução alcalina ativadora com o auxílio de uma espátula metálica por 1 minuto (Figura 3.53).
D	<ul style="list-style-type: none"> • mistura-se o composto da etapa C na argamassadeira em baixa velocidade durante 3 minutos; desliga-se a argamassadeira para retirada dos sólidos presos nas paredes do recipiente (Figura 3.54a).
E	<ul style="list-style-type: none"> • adiciona-se gradualmente a areia durante mistura na argamassadeira em baixa velocidade durante 2 minutos; desliga-se novamente a argamassadeira para retirada dos sólidos presos nas paredes do recipiente; homogeneiza-se a mistura na argamassadeira por 4 minutos na velocidade alta (Figura 3.54b).

O aspecto da AGT2 no estado fresco é mostrado na Figura 3.54c.



Figura 3.51 - Etapa A de preparo da AGT2.

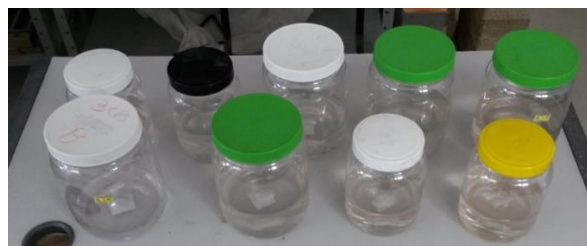


Figura 3.52 - Etapa B de preparo da AGT2.



Figura 3.53 - Etapa C de preparo da AGT2.



Figura 3.54 - Etapas D e E de preparo da AGT2.

O índice de consistência desta argamassa foi de 187 mm, de acordo com a norma ABNT NBR 7215 (1996).

3.11. Ensaios mecânicos do concreto do substrato e das argamassas de reparo no estado endurecido

Completados 28 dias de cura úmida para o concreto convencional e para a ACQU, e à temperatura ambiente para a ACQT, AGT1 e AGT2, os corpos de prova cilíndricos de cada material foram devidamente preparados para os ensaios

específicos de caracterização mecânica. Estes foram retificados em um torno mecânico, segundo prescreve a ABNT NBR 5738 (2015).

Para a caracterização mecânica foram determinados: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento. Os ensaios foram realizados numa prensa da marca EMIC com capacidade de 2000 kN, com taxa de carregamento de 0,6 kN/s (Figura 3.55). Estes foram executados de acordo com prescrições de normas brasileiras para concretos e argamassas de cimento Portland.



Figura 3.55 - Prensa utilizada na caracterização mecânica do concreto do substrato e das argamassas de reparo.

Os detalhes dos ensaios de caracterização mecânica são descritos nos itens a seguir.

3.11.1. Resistência à compressão axial

De acordo com a norma ABNT NBR 5739 (2007), o ensaio de compressão axial foi realizado em: 6 corpos de prova cilíndricos de dimensões ϕ 100 mm x 200 mm (3 do primeiro dia de concretagem e 3 do segundo dia de concretagem); e 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões ϕ 50 mm x 100 mm para cada tipo de argamassa de reparo. O esquema do ensaio é mostrado na Figura 3.56.

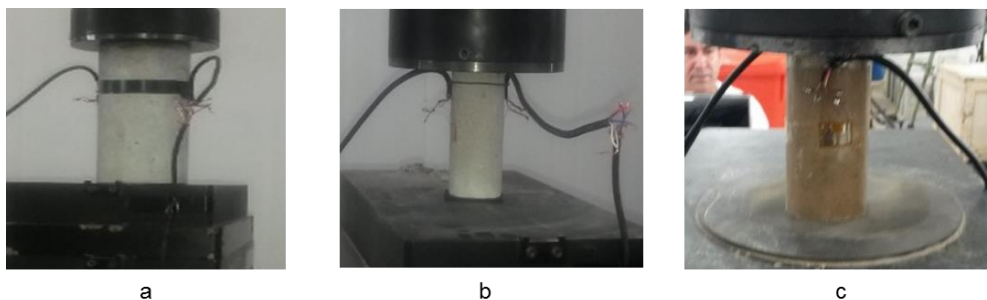


Figura 3.56 - Corpo de prova cilíndrico no ensaio de compressão axial: a) concreto; b) ACQT; c) AGT1.

A resistência à compressão axial foi obtida dividindo-se a carga da ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova. O resultado foi expresso com aproximação de 0,1 MPa.

3.11.2. Módulo de elasticidade longitudinal, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento

Conforme preceitua a ABNT NBR 8522 (2008), foi determinado o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto convencional e das argamassas de reparo, todos aos 28 dias. Além disso, foram obtidos 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. Para coletar as informações necessárias, foram colados dois medidores de deformação (*strain gages*) do tipo roseta (item 3.3) diametralmente opostos, como mostra a Figura 3.57. Este tipo de *strain gage* afere as deformações axiais e laterais.



Figura 3.57- Corpo de prova cilíndrico de concreto instrumentado com dois extensômetros do tipo roseta.

O cálculo do módulo de elasticidade foi feito com os valores da curva tensão *versus* deformação por meio da Equação 8, conforme metodologia B (deformação específica fixa da norma).

$$E_c = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} \quad (8)$$

onde,

E_c : módulo de elasticidade tangencial, em GPa;

σ_a : tensão correspondente à deformação específica de 50×10^{-6} , em MPa;

σ_b : tensão correspondente a 30% da tensão máxima, em MPa;

ε_b : deformação correspondente à tensão σ_b .

O coeficiente de Poisson foi determinado de acordo com a Equação 9.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (9)$$

sendo:

ν : coeficiente de Poisson;

ε_1 : deformação lateral (transversal) referente à tensão da carga de ruptura;

ε_2 : deformação axial (longitudinal) referente à tensão da carga de ruptura.

Já o módulo de cisalhamento foi determinado de acordo com a Equação 10.

$$G = \frac{E_c}{2(1 + \nu)} \quad (10)$$

onde,

G : módulo de cisalhamento, em GPa;

ν : coeficiente de Poisson;

E_c : módulo de elasticidade tangencial, em GPa.

3.11.3. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral ou ensaio brasileiro, normalizado pela ABNT NBR 7222 (2011), foi feito de acordo com a configuração da Figura 3.58. Nesta figura tem-se:

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.

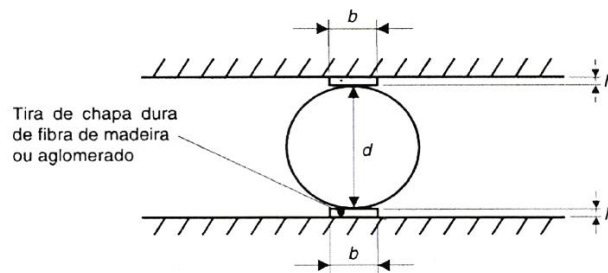


Figura 3.58 - Disposição do corpo de prova para o ensaio de tração por compressão diametral, segundo a ABNT NBR 7222 (2011).

Este ensaio foi realizado para os mesmos tipos e quantidades de corpos de prova do ensaio de compressão axial. Os corpos de prova foram posicionados na prensa com auxílio de duas taliscas de madeira, como mostra a Figura 3.59.

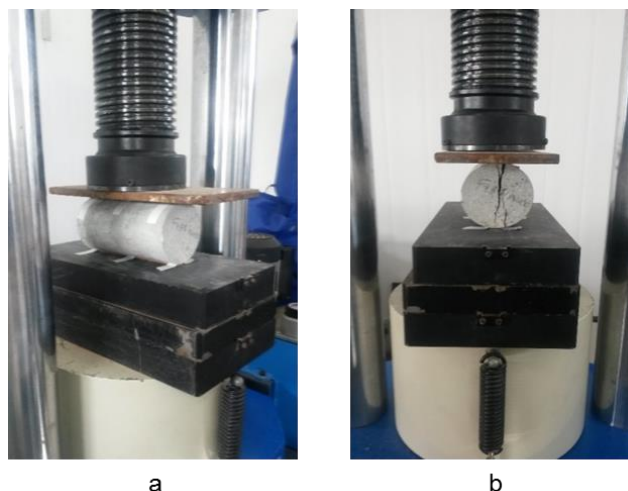


Figura 3.59 - (a) corpo de prova na prensa para o ensaio da ABNT NBR 7222 (2011); (b) ruptura do corpo de prova.

A Equação 11 foi empregada para o cálculo dos valores de resistência à tração por compressão diametral.

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

onde,

$f_{ct,sp}$: resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F : carga de ruptura (N);

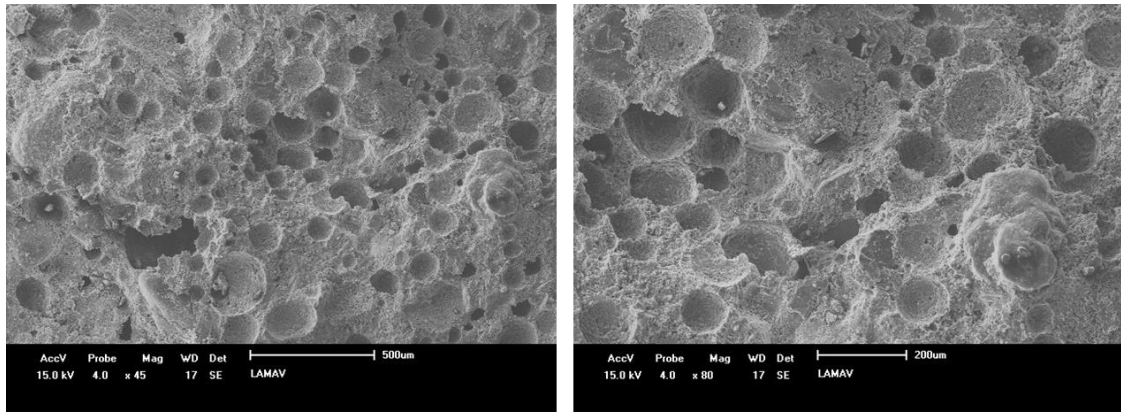
d : diâmetro do corpo de prova (mm);

l : comprimento do corpo de prova (mm).

3.11.4. Microscopia eletrônica de varredura

As microscopias obtidas por MEV apresentadas neste item são de amostras da ACQT, ACQU, AGT1, AGT2, interface do reparo AGT1/substrato e interface do agregado/ACQT. O procedimento para obtenção destas micrografias está descrito no item 3.1.8.6.

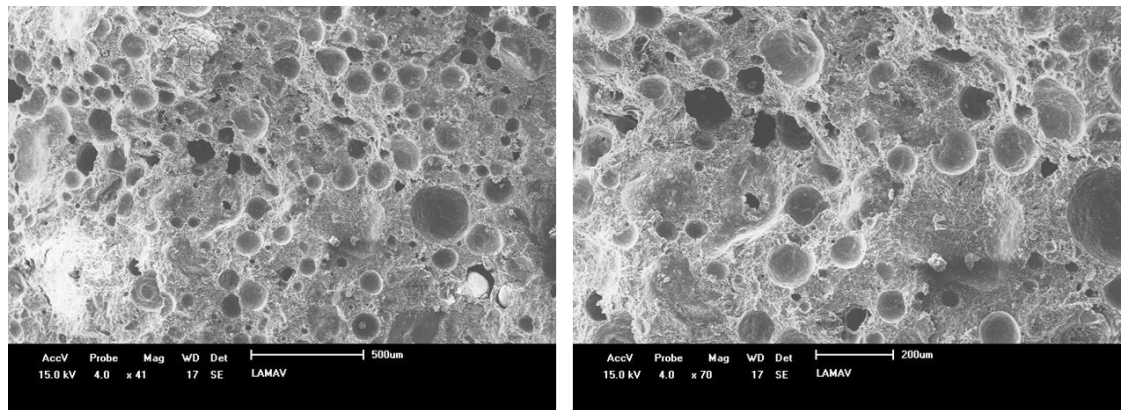
As Figuras 3.60 e 3.61 mostram as micrografias da ACQT e ACQU, respectivamente, apresentando microestrutura com muitos poros. A morfologia da AGT1 (Figura 3.62) e da AGT2 (Figura 3.63) apresentam matrizes com distribuição homogênea e uma fase gel densa, principalmente na AGT2 que mostrou superfície mais lisa e com poucas microfissuras que podem ter ocorrido devido ao processo de fratura da amostra. Destaca-se que a estrutura massiva encontrada ajuda confirmar a característica amorfa dos geopolímeros. A região da interface reparo da AGT1/substrato (Figura 3.64) apresenta-se homogênea e densa, resultado da boa aderência entre os materiais. Não foi possível fazer a micrografia da região da interface reparo da argamassa comercial/substrato, pois no momento da fratura da amostra houve descolamento da argamassa comercial do substrato (com diferentes modos de se obter as amostras). No entanto, a Figura 3.65 mostra a interface da ACQT/agregado aparentando ter uma boa aderência, sem muitos vazios nesta região.



a

b

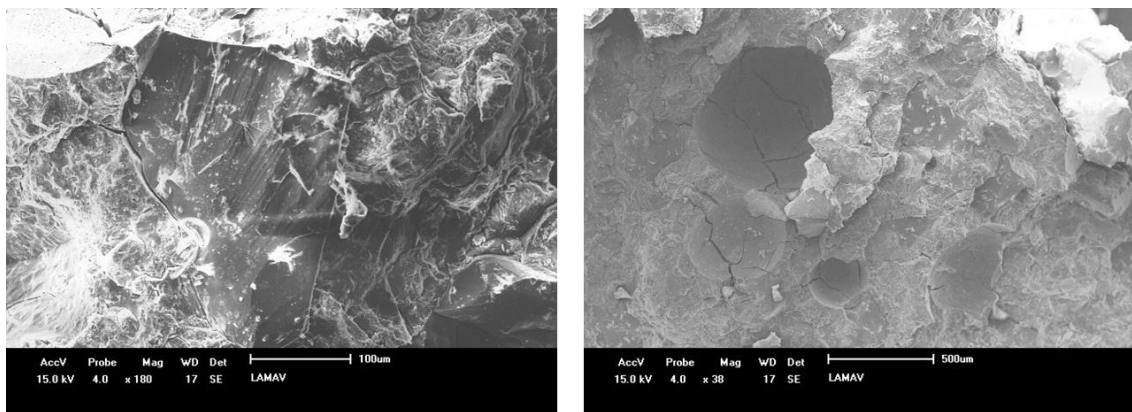
Figura 3.60 – Micrografias da ACQT.



a

b

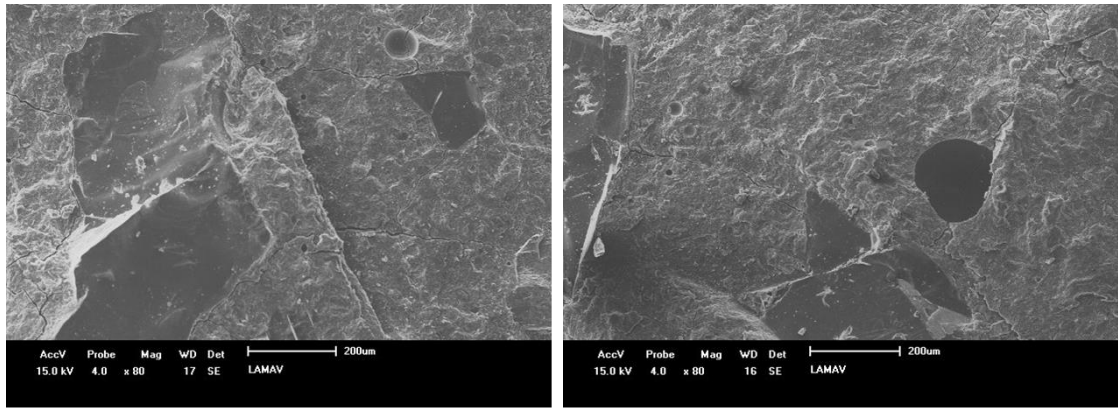
Figura 3.61 – Micrografias da ACQU.



a

b

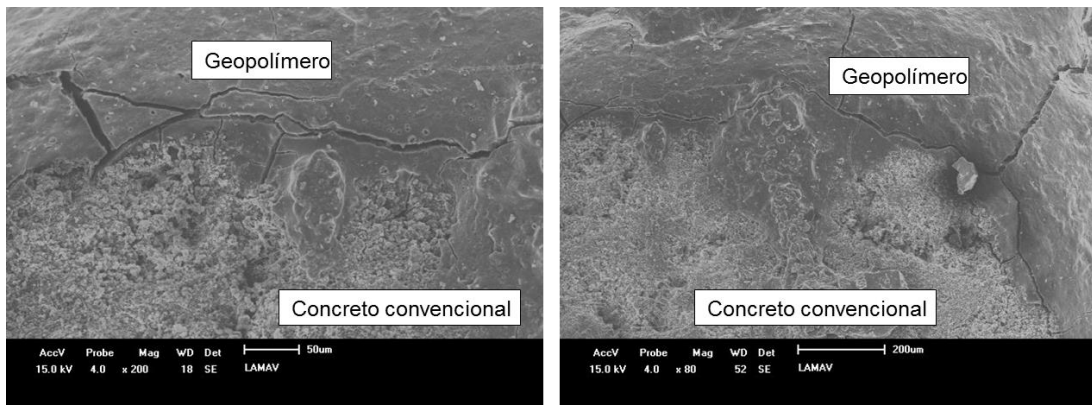
Figura 3.62 – Micrografias da AGT1.



a

b

Figura 3.63 - Micrografias da AGT2.



a

b

Figura 3.64 –Micrografia da interface AGT1/substrato.



Figura 3.65 – Micrografia da interface ACQT/agregado graúdo.

3.12. Ensaios mecânicos de aderência

Os ensaios de aderência realizados neste trabalho foram: ensaio de conformação superficial para determinar a resistência de aderência das barras de aço ao concreto convencional e às argamassas de reparo; ensaio de resistência à tração na flexão para determinar a tensão de aderência das argamassas de reparo ao concreto de cimento Portland em corpos de prova mistos; ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão em vigas para avaliar a forma de ruptura das vigas reparadas com diferentes argamassas de reparo; e ensaio de resistência à tração na flexão em vigas para avaliar a aderência entre todos os materiais componentes das vigas de concreto armado reconstituídas. Neste item foi descrito todos os detalhes da confecção dos corpos de prova, bem como a execução dos ensaios.

3.12.1. Resistência de aderência à tração na flexão com corpos de prova mistos

Este ensaio teve como objetivo avaliar a interface reparo/substrato. A resistência à tração na flexão determinada neste ensaio é denominada, nesta pesquisa, de resistência de aderência à tração na flexão. Os ensaios de resistência de aderência à tração na flexão com corpos de prova mistos foram realizados utilizando combinações de concreto convencional, ACQT e AGT1. Este ensaio foi baseado nas prescrições da ABNT NBR 12142 (2010).

3.12.1.1. Configurações dos corpos de prova mistos

Os corpos de prova mistos foram divididos em quatro séries: CQ, CG, CCQ e CCG. Os das Séries CQ e CG eram compostos por duas metades: uma metade de concreto convencional e outra de argamassa de reparo. Os das Séries CCQ e CCG possuíam duas metades de concreto convencional coladas com as argamassas de reparo. O esquema dos corpos de prova é mostrado na Figura 3.66.

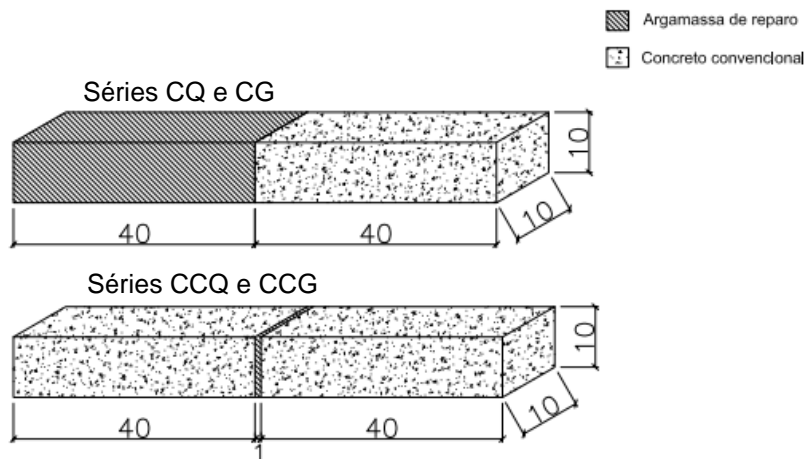


Figura 3.66 - Configurações dos corpos de prova para determinação da resistência de aderência à tração na flexão (dimensões em mm).

As Séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova mistos são apresentadas na Tabela 3.20 e mostradas na Figura 3.67.

Tabela 3.20 - Séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova mistos.

Série	Nomenclatura	Características
CQ	CQ1	Metade substrato / metade ACQT.
	CQ2	
	CQ3	
CG	CG1	Metade substrato / metade AGT1
	CG2	
	CG3	
CCQ	CCQ1	Metade substrato / ACQT com espessura de 1 mm / metade substrato
	CCQ2	
	CCQ3	
CCG	CCG1	Metade substrato / AGT1 com espessura de 1 mm / metade substrato
	CCG2	
	CCG3	

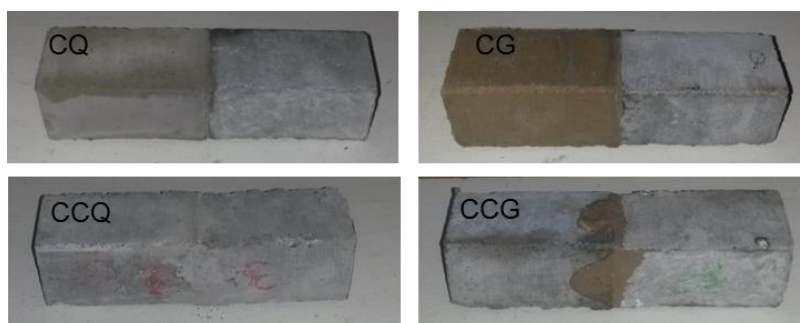


Figura 3.67 - Corpos de prova para ensaio de resistência de aderência à tração na flexão.

3.12.1.2. Confeção dos corpos de prova mistos

Para a confecção dos corpos de prova mistos foi fabricada uma fôrma de compensado naval, de acordo com o item 3.5.

Após 28 dias de cura úmida, as metades de concreto convencional foram retificadas por meio de um torno mecânico e lixadas com lixas idênticas às utilizadas nas superfícies das vigas reparadas. Desta forma, todas as superfícies das metades de concreto obtiveram o mesmo valor médio de rugosidade das superfícies das vigas, onde foram aplicadas as argamassas de reparo.

As metades de concreto das séries CQ e CG foram reposicionadas na fôrma. Em seguida, as chapas de aço que dividiam as metades foram retiradas e os espaços entre as metades foram preenchidos com as argamassas de reparo (Figura 3.68). Já as das séries CCQ e CCG receberam uma camada de 1 mm com as argamassas de reparo para colar as duas metades de concreto convencional. Essa colagem foi executada com as partes dos corpos de prova de concreto na posição vertical (Figura 3.69).



Figura 3.68- Confeção dos corpos de prova mistos da série CG.



Figura 3.69 - Partes de concreto dos corpos de prova mistos preparados para receberem a camada fina da ACQT e AGT1.

3.12.1.3. Ensaio

Os corpos de prova mistos foram submetidos à ruptura 60 dias após a sua moldagem. A configuração do ensaio é mostrada na Figura 3.70.



Figura 3.70 - Configuração do ensaio de resistência de aderência à tração na flexão.

As resistências de aderência à tração na flexão foram calculadas por meio da Equação 12 (ABNT NBR 12142, 2010):

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (12)$$

onde,

$f_{ct,f}$ = resistência à tração na flexão = resistência de aderência à tração na flexão, em MPa;

F = força máxima registrada no ensaio, em N;

l = dimensão do vão livre entre apoios, em mm;

b = largura média do corpo de prova, em mm;

d = altura média do corpo de prova, em mm.

3.12.2. Ensaio de tirantes

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), tirantes são elementos lineares, de eixo reto, em que as forças normais de tração são preponderantes. Este ensaio teve como objetivo avaliar a interface concreto-aço e argamassas de reparo-aço.

Segundo a ABNT NBR 7480 (2007), o coeficiente de conformação superficial

(ensaio de tirantes) deve ser determinado de acordo com a ABNT NBR 7477 (1982), que prescreve os procedimentos necessários para a determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado, sendo que essa determinação é feita por meio do ensaio de fissuração em tirantes de concreto, armados com uma única barra ou fio.

Os diâmetros das barras utilizadas nas armaduras das vigas eram iguais a 4,2 mm para o aço CA-60 e 6,3 mm para o CA-25. Segundo a ABNT NBR 7480 (2007), o coeficiente de conformação superficial deve ser maior ou igual a 1,0 para diâmetros nominais menores do que 10 mm.

3.12.2.1. Confecção dos corpos de prova

A fabricação dos tirantes obedeceu à ABNT NBR 7477 (1982). As fôrmas foram confeccionadas de acordo com o item 3.5. Para a confecção destes foi necessário calcular o parâmetro a , de acordo com a Equação 13.

$$a = \sqrt{\pi \cdot \varnothing \cdot \left(\frac{\varnothing}{4} + 7\right)} \quad (13)$$

onde,

a = medida do lado do tirante, em mm;

\varnothing = diâmetro nominal da barra ou fio, em mm.

Com o valor do parâmetro a , determinou-se os outros parâmetros necessários para a confecção das fôrmas. São eles:

l = comprimento do tirante $\geq 15 a$, em mm;

L = comprimento da barra = $l + 120$, em mm.

Destaca-se que o tamanho das fôrmas destes corpos de prova variou de acordo com o diâmetro da barra de aço. As dimensões dos tirantes ensaiados estão na Tabela 3.21.

Tabela 3.21 - Dimensões dos tirantes, em mm.

Tipo do aço	Diâmetro da barra (ϕ)	Largura (a)	Altura (a)	Comprimento (l)	Comprimento (L)
CA-60	4,2	35	35	460	580
CA-25	6,3	40	40	570	690

O procedimento na fabricação dos tirantes foi: primeiramente untou-se as fôrmas com óleo mineral, colocando em seguida as barras de aço cuidadosamente, para que não tivessem contato com o óleo; as barras foram dispostas no centro de massa do tirante; após fixação das barras de aço, os orifícios externos foram vedados com massa de calafetar, para não permitir que estas se movimentassem durante o processo de adensamento.

3.12.2.2. Configuração dos tirantes

A norma ABNT NBR 7477 (1982) determina que no mínimo sejam ensaiados 9 tirantes. Atendendo à esta orientação, foram moldados 9 tirantes para cada série (S25, S60, ACQ25, ACQ60, AGT1-25, AGT1-60).

As Séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova de tirantes são mostradas na Tabela 3.22 e na Figura 3.71.

Tabela 3.22- Séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova de tirantes.

Série	Nomenclatura	Características
S25	S25-1 a S25-9	Tirantes de substrato com barras de aço lisas CA-25 ϕ 6,3 mm
S60	S60-1 a S60-9	Tirantes de substrato com barras de aço nervuradas CA-60 ϕ 4,2 mm
ACQ25	ACQ25-1 a ACQ25-9	Tirantes de ACQT com barras de aço lisas CA-25 ϕ 6,3 mm
ACQ60	ACQ60-1 a ACQ60-9	Tirantes de ACQT com barras de aço nervuradas CA-60 ϕ 4,2 mm
AGT1-25	AGT1-25-1 a AGT1-25-9	Tirantes de AGT1 com barras de aço lisas CA-25 ϕ 6,3 mm
AGT1-60	AGT1-60-1 a AGT1-60-9	Tirantes de AGT1 com barras de aço nervuradas CA-60 ϕ 4,2 mm

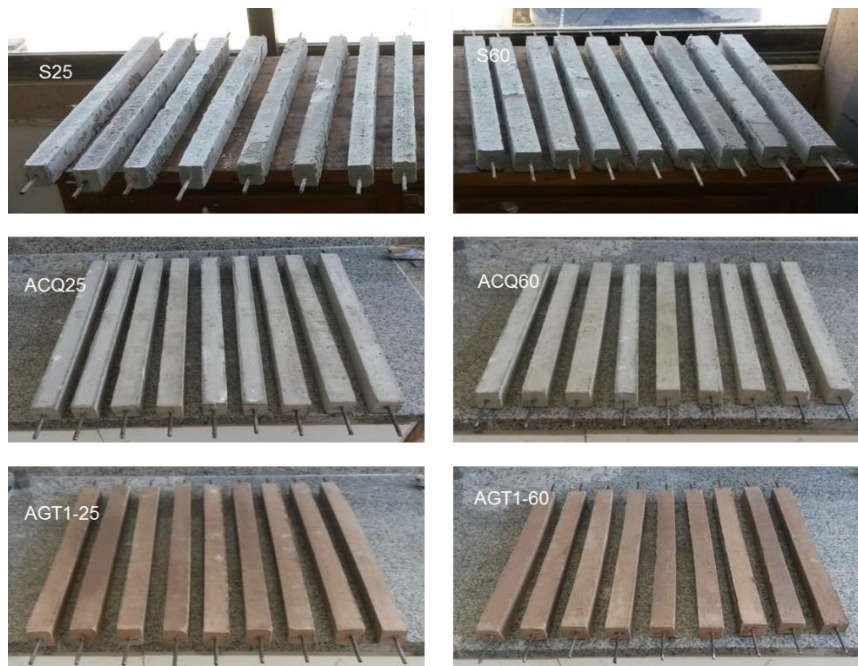


Figura 3.71- Tipos de corpos de prova de tirantes.

3.12.2.3. Ensaio

Os tirantes foram ensaiados à tração direta em uma prensa universal da marca INSTRON, com capacidade de 100 kN e com velocidade de 2 mm/min, disponível no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF, de acordo com procedimentos da ABNT NBR ISO 6892-1 (2015).

Para a realização dos ensaios, os tirantes foram pintados com uma tinta acrílica branca, a fim de auxiliar na localização das fissuras durante o ensaio de tração direta. Esta pintura ocorreu após os 28 dias de cura dos corpos de prova. Os tirantes pintados e a configuração do ensaio são mostrados na Figura 3.72.

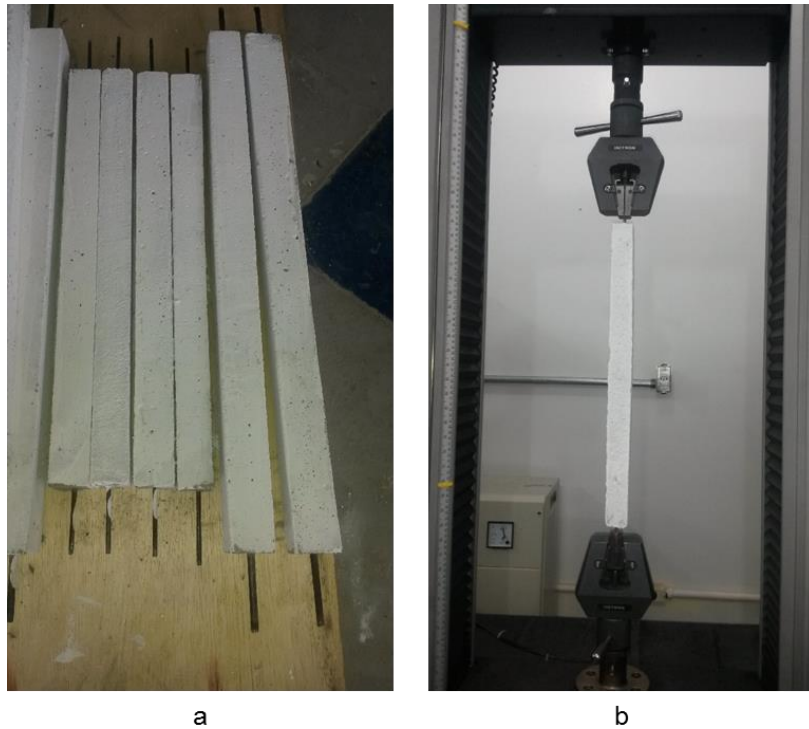


Figura 3.72 - Tirantes: (a) pintados; (b) configurados para o ensaio de tração direta.

A norma determina que a carga máxima a ser aplicada seja a referente de 80% da tensão de escoamento da barra ou do fio de aço utilizado. Por isso utilizou-se o valor médio da tensão de escoamento das barras ensaiadas, de acordo com o item 3.1.6. Ao término da aplicação do carregamento máximo, as fissuras ocorridas nas quatro faces dos tirantes foram realçadas com caneta (Figura 3.73) e as distâncias entre elas anotadas em um formulário. Estas distâncias, no eixo longitudinal, foram registradas a fim de determinar o coeficiente de conformação superficial e a resistência de aderência entre o aço e o concreto convencional ou argamassa de reparo. Ressalta-se que só foram consideradas as fissuras que surgiram nas quatro faces dos tirantes.



Figura 3.73 - Fissuras sendo realçadas no tirante após o ensaio de tração direta.

3.12.2.4. Novos corpos de prova de tirantes

Com a AGT1, que atingiu a resistência média à compressão de 25,2 MPa, as vigas foram reparadas e levadas à ruptura, atingindo praticamente a mesma carga de ruptura que as vigas de referência (sem reparo); os corpos de prova mistos também puderam ser avaliados. Porém, os tirantes compostos por esta argamassa sofreram pré-fissuração excessiva (Figura 3.74). Algumas fissuras ocorreram nas quatro faces, mesmo antes do ensaio de tração direta.

A pré-fissuração citada pode ter ocorrido por retração da AGT1 e em função das características geométricas dos tirantes (peças esbeltas). Geopolímeros que utilizam metacaulim como material precursor são mais sujeitos à retração (ZHANG *et al.*, 2015; KUENZEL *et al.*, 2012; KONG *et al.*, 2007). Então, o ensaio de conformação superficial não foi feito para os corpos de prova com esta argamassa. Por este motivo, foram moldados novos tirantes utilizando a AGT2, que atingiu a resistência média à compressão de 37,2 MPa (próxima da resistência especificada pelo fabricante da argamassa comercial).

A dosagem e fabricação dos dois traços de argamassas geopoliméricas utilizados neste trabalho se encontram no item 3.9. Em função da limitação de tempo e de recursos financeiros, foram moldados para a AGT2 somente 3 tirantes para cada tipo de aço (CA-60 e CA-25).



Figura 3.74 - Tirantes da AGT1 pré-fissurados.

A cura dos novos tirantes com AGT2 foi à temperatura ambiente, mas foram envolvidos em filme plástico (Figura 3.75) de PVC (*polyvinyl chloride*), mesmo procedimento adotado por Rocha (2017). Segundo a pesquisadora, o uso do filme plástico para embalar os corpos de prova é um cuidado que deve ser tomado para evitar contato com o ar, visto que possuem NaOH e KOH em sua superfície, que em

contato com o CO₂ podem formar carbonatos e, conseqüentemente, perda de Na⁺ e K⁺. Esta perda pode ocasionar queda na resistência mecânica, pois estes íons devem reagir com os óxidos de silício e alumínio. Com este novo procedimento, os tirantes não sofreram pré-fissuração e foram ensaiados (Figura 3.76).



Figura 3.75 - Corpos de prova com AGT2.



Figura 3.76 - Exemplos de tirantes com AGT2.

Assim, a nova classificação contendo as séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova de tirantes é apresentada na Tabela 3.23.

Tabela 3.23 – Novas séries, nomenclaturas e características dos corpos de prova de tirantes.

Série	Nomenclatura	Características
S25	S25-1 a S25-9	Tirantes de substrato com barras de aço lisas CA-25 ϕ 6,3 mm
S60	S60-1 a S60-9	Tirantes de substrato com barras de aço nervuradas CA-60 ϕ 4,2 mm
ACQ25	ACQ25-1 a ACQ25-9	Tirantes de ACQT com barras de aço lisas CA-25 ϕ 6,3 mm
ACQ60	ACQ60-1 a ACQ60-9	Tirantes de ACQT com barras de aço nervuradas CA-60 ϕ 4,2 mm
AGT2-25	AGT2-25-1 a AGT2-25-3	Tirantes de AGT2 com barras de aço lisas CA-25 ϕ 6,3 mm
AGT2-60	AGT2-60-1 a AGT1-60-3	Tirantes de AGT2 com barras de aço nervuradas CA-60 ϕ 4,2 mm

3.12.3. Ensaio de resistência à tração na flexão e resistência de aderência ao cisalhamento na flexão em vigas

A verificação do comportamento mecânico e da aderência das argamassas de reparo ao substrato em vigas de concreto convencional, armadas e não armadas, foram estudados por meio dos ensaios de resistência à tração na flexão baseado na ABNT NBR 12142 (2010) e de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão baseado na AFNOR NF P18-851 (1992).

Os detalhes sobre o dimensionamento das vigas, suas armaduras e os entalhes em formato de prisma trapezoidal se encontram no item 3.2.1. A Figura 3.77 apresenta o sistema de reparo, que consiste em um entalhe construído com isopor na forma de prisma trapezoidal (durante a moldagem), onde a argamassa de reparo foi aplicada. A profundidade do entalhe ultrapassou a armadura de flexão nas vigas de concreto armado. O formato de trapézio e suas dimensões foram definidos baseados na AFNOR NF P18-851 (1992).

A Figura 3.77 mostra o esquema das vigas simplesmente apoiadas. Os apoios foram de 1.º e 2.º gêneros, distando 525 mm entre si. O carregamento consistiu de duas cargas concentradas equidistantes dos apoios a 175 mm.

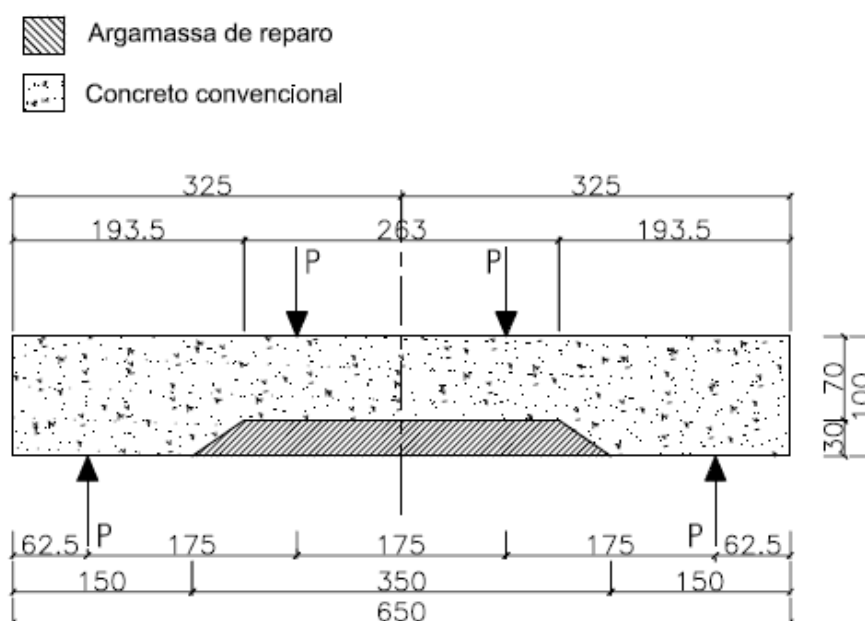


Figura 3.77 - Esquema dos apoios e das cargas concentradas para os ensaios de tração na flexão a quatro pontos (dimensões em mm).

3.12.3.1. Confeção das vigas reconstituídas

O início da recuperação das vigas ocorreu após 27 dias de cura submersa em água saturada com cal. Estas foram retiradas dos recipientes e armazenadas à temperatura ambiente no LECIV. No dia seguinte, os moldes de isopor foram retirados (Figura 3.78a). Para que as vigas ficassem prontas para aplicação das argamassas de reparo, os restos de isopor foram retirados do substrato inicialmente com espátula (Figura 3.78b) e, em seguida, com lixa para concreto. Foram confeccionadas tábuas retangulares de compensado naval e grampos de barras de aço que pudessem segura-las às vigas. Assim as argamassas de reparo puderam ser aplicadas e as vigas reconstituídas (Figura 3.78d). Antes de serem fixadas, as tábuas foram untadas com vaselina em pasta para facilitar a desmoldagem.

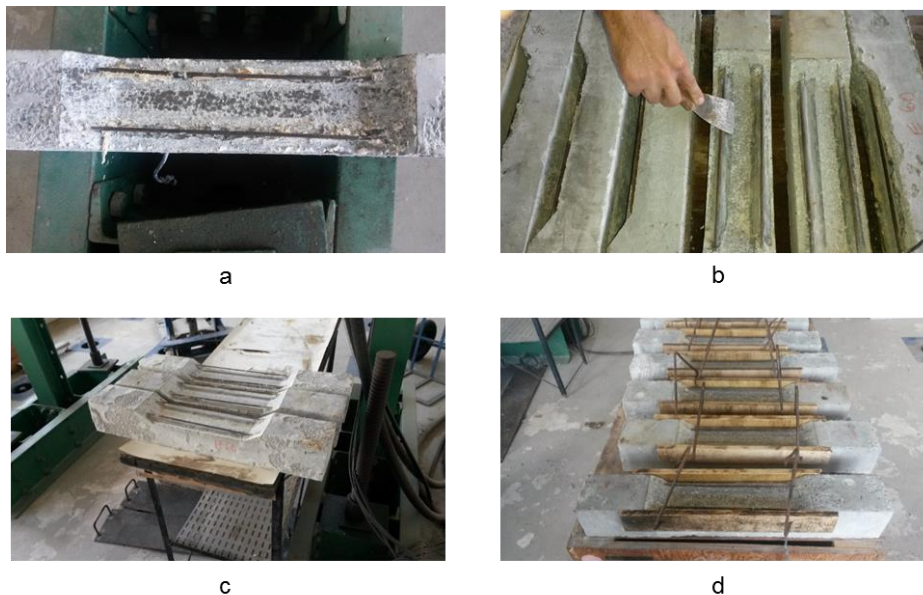


Figura 3.78 - Preparação das vigas: (a) sem o molde de isopor; (b) restos de isopor sendo retirados; (c) superfície limpa e preparada; (d) tábuas fixadas com grampos de aço.

3.12.3.2. Rugosidade dos substratos

A rugosidade das vigas limpas e lixadas e das superfícies dos corpos de prova mistos, que ficaram em contato com as argamassas de reparo, foi inspecionada e analisada com um rugosímetro Mitutoyo SJ-201 (Figura 3.79). Os valores são mostrados na Tabela 3.24. As três regiões (R1, R2 e R3) das medições foram

escolhidas aleatoriamente.

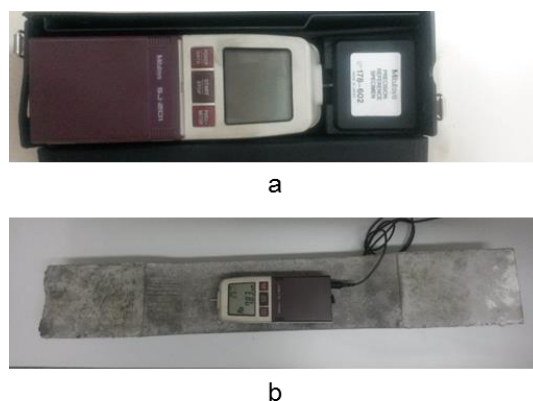


Figura 3.79 - a) Rugosímetro Mitutoyo SJ-201; b) medição da rugosidade da superfície do substrato das vigas.

Tabela 3.24 - Rugosidade da superfície do substrato das vigas e dos corpos de prova mistos.

Região	Rugosidade na viga (μm)	Rugosidade (μm) no corpo de prova misto (metade de concreto convencional)
R1	7,83	7,54
R2	7,63	7,61
R3	7,12	7,35
Média	7,53	7,50
S (μm)	0,30	0,11
CV (%)	3,97	1,46

Nota-se que as regiões nas vigas e nos corpos de prova mistos possuem rugosidades bem similares e homogêneas.

3.12.3.3. Configurações das vigas

As vigas tinham superfície com rugosidade média de $7,53 \mu\text{m}$ e o concreto de substrato resistência média à compressão de $49,9 \text{ MPa}$. Os corpos de prova foram reparados com a AGT1 (Figura 3.80) e a ACQT (Figura 3.81). O diâmetro nominal e o tipo de aço utilizado variaram na armadura de flexão. Foram ensaiados três corpos de prova para cada série. As séries, nomenclaturas e características das vigas são mostradas na Tabela 3.25.

Tabela 3.25 - Séries, nomenclaturas e características das vigas.

Série	Nomenclatura	Características
A	A1	Substrato sem reparo e sem aço
	A2	
	A3	
B	B1	Substrato sem reparo, com armadura de tração usando aço CA-60
	B2	
	B3	
C	C1	Substrato sem reparo, com armadura de tração usando aço CA-25
	C2	
	C3	
D	D1	Substrato com reparo de ACQT e sem aço
	D2	
	D3	
E	E1	Substrato com o reparo de ACQT, com armadura de tração usando aço CA-60
	E2	
	E3	
F	F1	Substrato com reparo de ACQT, com armadura de tração usando aço CA-25
	F2	
	F3	
G	G1	Substrato com reparo de AGT1 e sem aço
	G2	
	G3	
H	H1	Substrato com reparo de AGT1, com armadura de tração usando aço CA-60
	H2	
	H3	
I	I1	Substrato com reparo de AGT1, com armadura de tração usando aço CA-25
	I2	
	I3	



Figura 3.80 - Vigas reparadas com AGT1.



Figura 3.81 - Vigas reparadas com ACQT.

A cura das vigas após a reconstituição com as argamassas de reparo foi à temperatura ambiente.

3.12.3.4. Instrumentação das vigas para o ensaio da ABNT NBR 12142 (2010)

Os ensaios de resistência à tração na flexão das vigas permitiram obter valores das cargas de ruptura, flechas, momentos de fissuração, deformações nas regiões de compressão, tração e interface substrato/reparo. Os deslocamentos verticais foram obtidos por meio de um *LVDT* posicionado na parte inferior no centro longitudinal do corpo de prova prismático (Figura 3.82).

Nas vigas armadas os extensômetros elétricos de resistência foram instalados em dois locais: no concreto (zona de compressão da viga) e no aço (zona de tração da viga), como mostra a Figura 3.83. Já nas vigas sem aço, os *strain gages* foram instalados no concreto (zona de compressão da viga) e na face lateral do concreto/argamassa de reparo (zona de tração da viga) na mesma altura da armadura de flexão das vigas armadas.

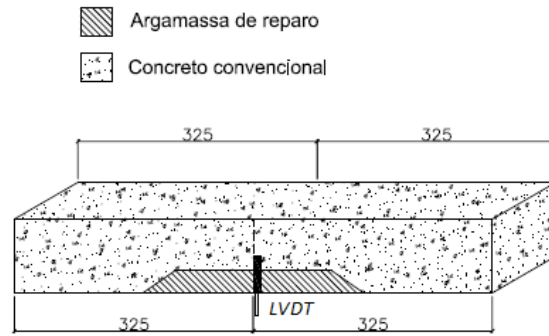


Figura 3.82 - Posicionamento do LVDT nas vigas (dimensões em mm).

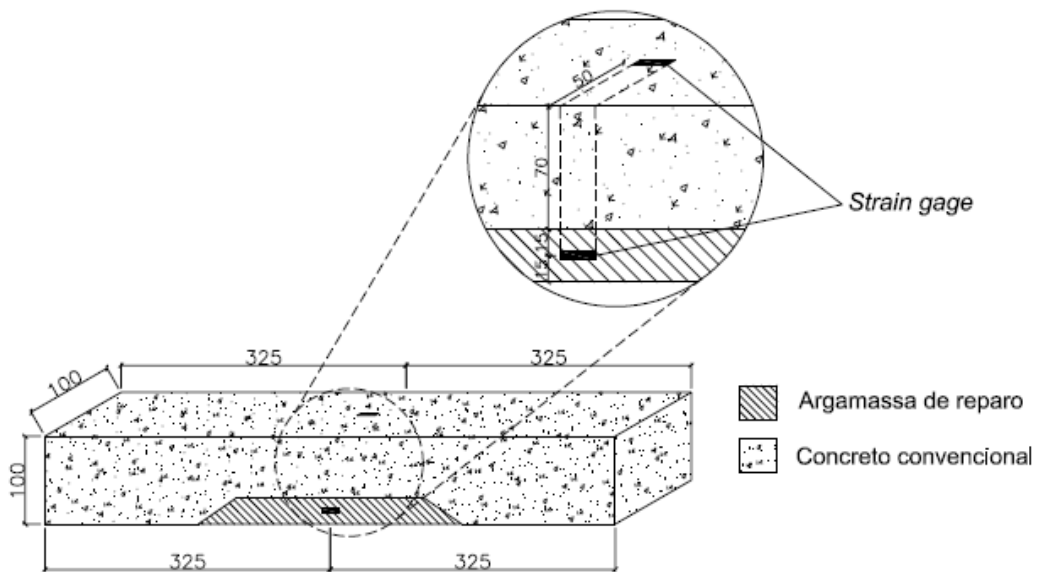


Figura 3.83 - Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência nas vigas (dimensões em mm).

3.12.3.5. Ensaios

As vigas foram ensaiadas aos 60 dias de idade. As configurações usadas para os apoios e para aplicação da carga são mostradas na Figura 3.84. A Figura 3.85 mostra os pontos de aplicação de cargas e os pontos de apoio no ensaio.

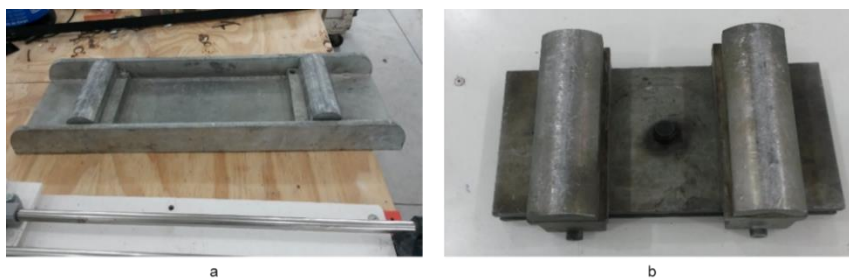


Figura 3.84 - Configuração utilizada para: (a) apoios; (b) carregamento.

As vigas foram ensaiadas até o ELU (Estado Limite Último), relacionado ao colapso ou ruína estrutural, que determina a paralisação do uso da estrutura.



Figura 3.85 - Pontos de aplicação das cargas e pontos de apoio no ensaio.

Os valores de resistência à tração na flexão foram calculados a partir da Equação 12. É importante ressaltar que essa equação somente é válida se a ruptura na superfície tracionada ocorrer entre as cargas.

3.12.3.6. Novos corpos de prova

No Item 3.8 foi citado que o fabricante da argamassa comercial não indicou cura úmida para as peças de concreto reparadas com seu produto. Ainda assim, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de dimensões ϕ 50 mm x 100 mm, submetidos à cura submersa em água saturada com cal, além dos outros submetidos à cura sob temperatura ambiente (item 3.8).

Os corpos de prova cilíndricos fabricados com ACQT obtiveram resistência média à compressão de 12,9 MPa e os com ACQU alcançaram 24,9 MPa, valor distante dos 34 MPa especificados na ficha técnica do produto. Além disso, houve descolamento desta argamassa de reparo aplicada no entalhe das vigas da série D (vigas com reparo de ACQT e sem armadura de aço), como mostra a Figura 3.86. O descolamento ocorreu aos 28 dias de idade da viga reparada quando foi transportada para a realização do ensaio. O ensaio de resistência à tração na flexão foi inviabilizado com as vigas desta série. A equipe técnica do fabricante explicou que a baixa aderência da ACQT ao substrato teria ocorrido pela falta de apicoamento da superfície a ser reparada. Desta forma, a viga D1 foi apicoada com uma ponteira, até exposição

dos agregados graúdos. As superfícies das vigas com e sem apicoamento são mostradas na Figura 3.87.

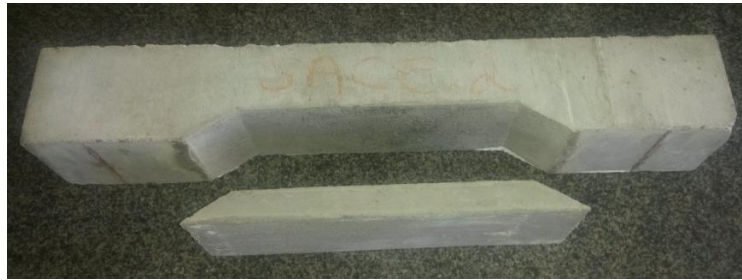


Figura 3.86 - Viga da série D com reparo de ACQT descolado.

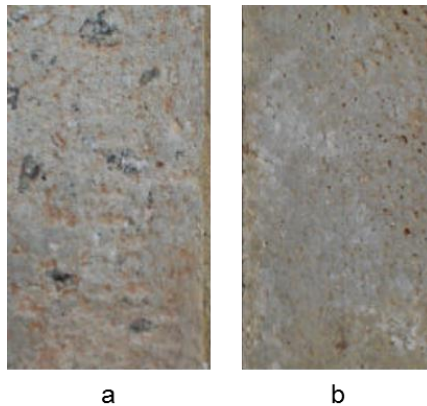


Figura 3.87 - (a) superfície com apicoamento; (b) superfície sem apicoamento.

Em função do tempo e de recursos financeiros foram moldados alguns novos corpos de prova usando ACQT e ACQU com as seguintes quantidades e configurações:

- 2 vigas da série D com reparo de ACQU sem aço, sem apicoamento e com cura úmida;
- 1 viga da série D com reparo de ACQT sem aço, com apicoamento e com cura à temperatura ambiente (de acordo com as especificações do fabricante, tanto da ficha técnica do produto como informado pela equipe técnica da empresa);
- 1 viga da série E com reparo de ACQU e aço CA-60, com cura úmida;
- 1 viga da série F com reparo de ACQU e aço CA-25, com cura úmida.

Como descrito no item 3.12.2.4, com a AGT1, que atingiu resistência média à compressão de 25,2 MPa, as vigas foram reparadas, alcançando, em média, a mesma carga de ruptura que as vigas de referência (séries A, B e C). No entanto, o ensaio de conformação superficial foi desconsiderado para as séries AGT1-25 e AGT1-60, pois

os tirantes sofreram pré-fissuração, com algumas fissuras nas quatro faces, mesmo antes do ensaio de tração direta. Desta forma, foram moldados novos tirantes com AGT2, que atingiram 37,2 MPa (resistência próxima à especificada na ficha técnica da argamassa comercial).

Nas vigas das séries G, H, e I, reparadas com AGT1, notaram-se algumas fissuras de retração nas vigas, antes mesmo dos ensaios, que podem ter sido causadas pelo mesmo motivo das ocorridas nos tirantes que utilizaram esta argamassa. Porém, não foi observada propagação significativa dessas fissuras durante os ensaios. As primeiras fissuras originadas durante os ensaios foram de flexão sob cargas aproximadas às das vigas monolíticas de referência. Mesmo com bons resultados nos ensaios com as vigas destas séries, foram moldadas novas vigas reparadas com AGT2 para as séries H e I. Estas séries foram escolhidas já que foram as que utilizavam aço e argamassa geopolimérica de reparo. Todos os resultados são apresentados e analisados no Capítulo 4 deste estudo.

Por questões de tempo e recursos financeiros, as configurações e quantidades dos novos corpos de prova com AGT2 foram:

- 1 viga da série H com reparo de AGT2 e aço CA-60;
- 1 viga da série I com reparo de AGT2 e aço CA-25.

As novas vigas são mostradas na Figura 3.88.

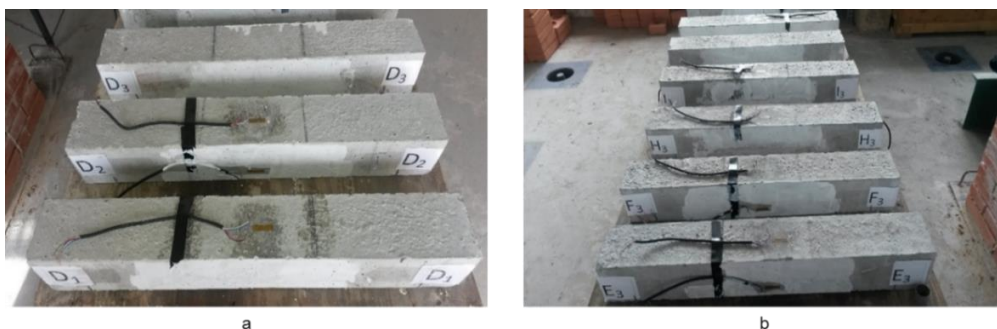


Figura 3.88 - (a) Vigas da série D; (b) vigas das séries E, F, H e I.

As séries, nomenclaturas e características de todas as vigas (incluindo as novas configurações) são mostradas na Tabela 3.26. As novas configurações estão destacadas com um * (asterisco) na coluna da nomenclatura.

Tabela 3.26 - Atualização das séries, nomenclaturas e características de todas as vigas.

Série	Nomenclatura	Características
A	A1	Substrato sem reparo e sem aço
	A2	
	A3	
B	B1	Substrato sem reparo, com armadura de tração usando aço CA-60
	B2	
	B3	
C	C1	Substrato sem reparo, com armadura de tração usando aço CA-25
	C2	
	C3	
D	D1*	Substrato com reparo de ACQT, sem aço, com apicoamento
	D2*	Substrato com reparo de ACQU, sem aço, sem apicoamento
	D3*	Substrato com reparo de ACQU, sem aço, sem apicoamento
E	E1	Substrato com reparo de ACQT, com armadura de tração usando aço CA-60
	E2	
	E3*	Substrato com reparo de ACQU, com armadura de tração usando aço CA-60
F	F1	Substrato com reparo de ACQT, com armadura de tração usando aço CA-25
	F2	
	F3*	Substrato com reparo de ACQU, com armadura de tração usando aço CA-25
G	G1	Substrato com reparo de AGT1 e sem aço
	G2	
	G3	
H	H1	Substrato com reparo de AGT1, com armadura de tração usando aço CA-60
	H2	
	H3*	Substrato com reparo de AGT2, com armadura de tração usando aço CA-60
I	I1	Substrato com reparo de AGT1, com armadura de tração usando aço CA-25
	I2	
	I3*	Substrato com reparo de AGT2, com armadura de tração usando aço CA-25

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são mostrados os principais resultados do programa experimental. Os gráficos apresentados e elaborados, por meio da leitura de valores de extensômetros e *LVDT*, foram os dos corpos de prova mais representativos de cada série. Alguns foram descartados por falhas nas leituras e outros são mostrados no Anexo A.

4.1. Caracterização do concreto e das argamassas de reparo no estado endurecido

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do concreto convencional, das argamassas geopoliméricas e da argamassa comercial. As propriedades determinadas foram: resistência à compressão axial, resistência à tração indireta, módulo de elasticidade longitudinal, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento.

4.1.1. Concreto convencional

De acordo com a ABNT NBR 12655 (2015), o concreto utilizado neste trabalho é classificado com condição de preparo A (aplicável às classes C10 até C80): o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados; o desvio-padrão das resistências mecânicas deve ser de no máximo 4,0 MPa.

A Tabela 4.1 mostra os resultados de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral com valores médios de 49,9 MPa e 3,8 MPa, respectivamente.

Tabela 4.1 - Valores da resistência à compressão axial e à tração indireta do concreto.

Corpo de prova	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)
CP1	50,8	3,9
CP2	49,7	3,8
CP3	49,1	3,6
Média (MPa)	49,9	3,8
S (MPa)	0,7	0,1
CV (%)	1,4	2,6

As curvas tensão *versus* deformação axial (longitudinal) e tensão *versus* deformação lateral (transversal), Gráfico 4.1, foram obtidas por meio das leituras dos *strain gages* colados nos corpos de prova cilíndricos. As cargas e deformações obtidas permitiram determinar o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e o módulo de cisalhamento.

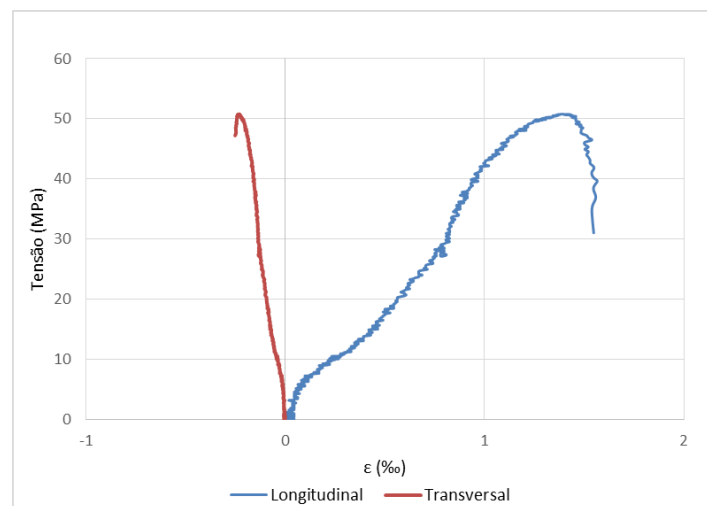


Gráfico 4.1 - Curvas tensão *versus* deformação do concreto convencional (substrato).

O módulo de elasticidade encontrado para o concreto foi de 32,3 GPa. Já Smiderle (2016) obteve 25,2 GPa para esta mesma dosagem. Estes valores são esperados para um concreto convencional, pois, segundo Mehta e Monteiro (2008), esse valor varia entre 14 GPa e 40 GPa.

Quanto ao coeficiente de Poisson, o valor encontrado foi de 0,17. Esse valor é condizente para concretos, pois, também, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), esse valor fica em torno de 0,20. Já o valor do módulo de cisalhamento foi de 13,9 GPa.

4.1.2. ACQT e ACQU

A Tabela 4.2 mostra os resultados da ACQT e da ACQU. Verifica-se que o modo de cura destas argamassas influenciou consideravelmente os valores de resistência mecânica. A ACQU, com cura úmida, alcançou resistência à compressão 93% superior à ACQT (cura ambiente).

Tabela 4.2 - Valores da resistência à compressão axial e à tração indireta da argamassa comercial.

Corpo de prova	ACQT		ACQU	
	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)
CP1	13,2	1,8	24,6	2,2
CP2	12,3	1,8	26,0	2,5
CP3	13,0	1,7	24,1	2,3
Média (MPa)	12,9	1,7	24,9	2,3
S (MPa)	0,4	0,1	0,8	0,1
CV (%)	3,0	2,8	3,3	4,1

Para ACQT, o módulo de elasticidade encontrado foi de 10,5 GPa, O coeficiente de Poisson foi de 0,13 e módulo de cisalhamento foi de 4,7 GPa. Já para ACQU, o módulo de elasticidade foi de 17,1 GPa, o coeficiente de Poisson foi de 0,10 e módulo de cisalhamento de 7,8 GPa. Os Gráficos 4.2 e 4.3 mostram as curvas tensão *versus* deformação usada para se obter esses valores.

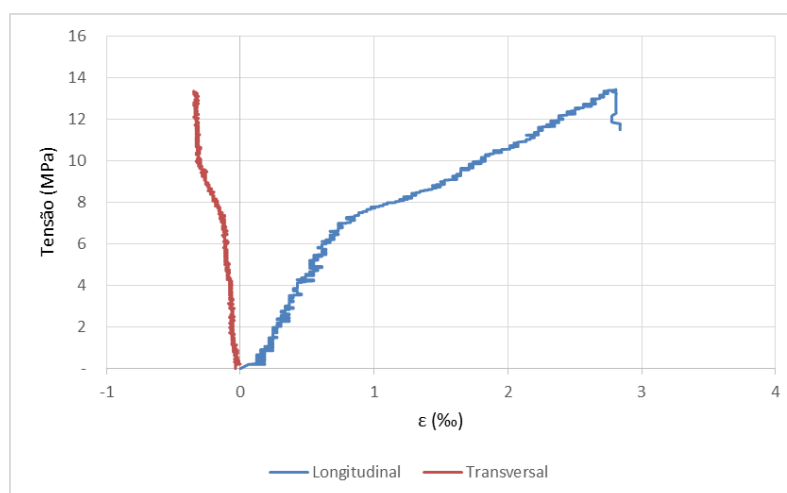


Gráfico 4.2 - Curvas tensão *versus* deformação da ACQT.

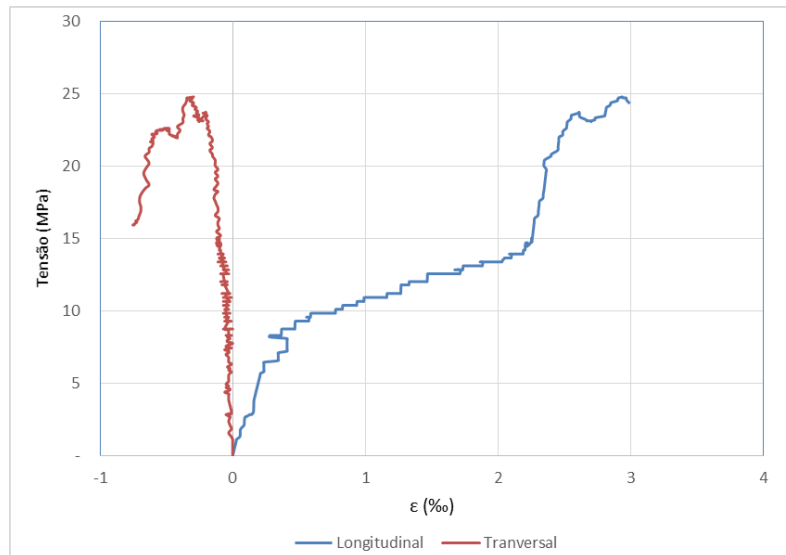


Gráfico 4.3 - Curvas tensão *versus* deformação da ACQU.

4.1.3. Argamassas geopoliméricas

A Tabela 4.3 mostra os resultados dos ensaios de compressão axial e tração indireta da argamassa geopolimérica de composição 1 : 1,5 : 0,36, dosada por Mazza (2010). Esta argamassa acabou por não ser utilizada como reparo neste trabalho. Os resultados das argamassas AGT1 e AGT2 também se encontram nesta tabela.

Tabela 4.3 - Valores da resistência à compressão axial e à tração indireta das argamassas geopoliméricas confeccionadas nesta pesquisa.

Corpo de prova	1 : 1,5 : 0,36 (MAZZA, 2010)		AGT1		AGT2	
	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)
CP1	22,6	2,3	25,8	2,54	37,4	3,3
CP2	22,7	2,2	25,1	2,7	36,9	3,5
CP3	14,8	2,2	24,7	2,8	37,2	3,5
Média (MPa)	19,9	2,3	25,2	2,7	37,2	3,4
S (MPa)	3,6	0,04	0,4	0,1	0,2	0,1
CV (%)	17,9	1,7	1,7	3,8	0,6	2,7

O módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento não foram determinados para a argamassa dosada por Mazza (2010). Para a AGT1, o módulo de elasticidade encontrado foi de 6,8 GPa, o coeficiente de Poisson foi de 0,33 e módulo de cisalhamento foi de 2,5 GPa. Já para a AGT2, o módulo de

elasticidade encontrado foi de 6,9 GPa, coeficiente de Poisson foi de 0,30 e módulo de cisalhamento foi de 2,7 GPa. Os Gráficos 4.4 e 4.5 mostram as curvas tensão *versus* deformação que permitiram obter os valores.

Os módulos de elasticidade encontrados para a AGT1 e AGT2 foram relativamente baixos quando comparados com o do concreto, mas coerentes com os obtidos por outros pesquisadores (YUAN *et al.*, 2016; ROCHA, 2017), que encontraram valores variando entre 5 e 11 GPa. DUXSON *et al.* (2007) sugerem que o módulo de elasticidade longitudinal dos geopolímeros é determinado em grande parte por sua microestrutura, ao invés simplesmente pela composição ou resistência mecânica. O coeficiente de Poisson também se assemelha muito ao encontrado por ROCHA (2017), que encontrou valores entre 0,13 a 0,24.

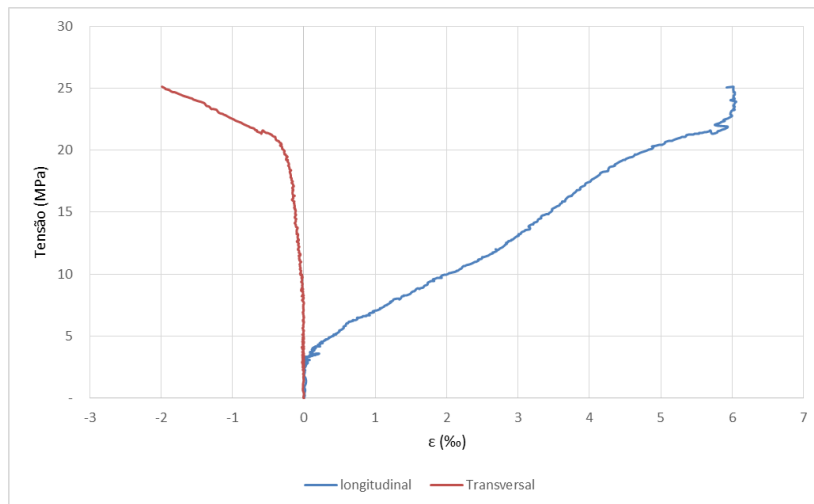


Gráfico 4.4 - Curvas tensão *versus* deformação da AGT1.

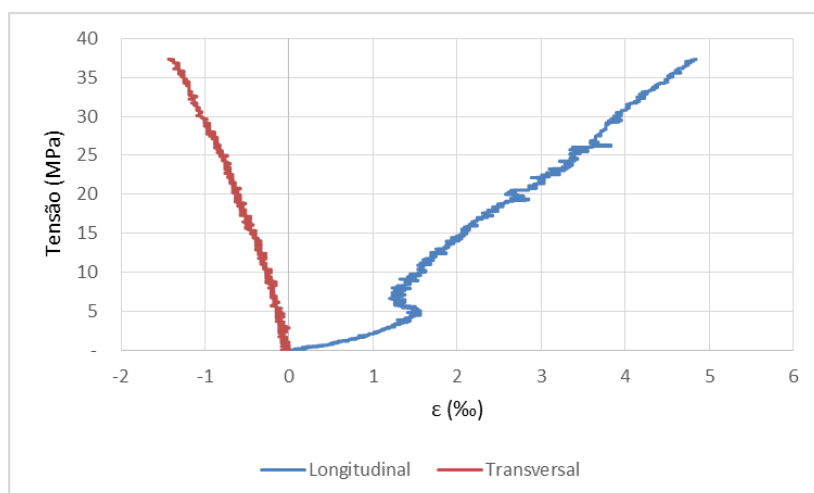


Gráfico 4.5 - Curvas tensão *versus* deformação da AGT2.

Goliath (2017) moldou, para a AGT1, 3 corpos de prova para as idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias e os submeteu a ensaios de resistência à compressão axial, a fim de avaliar o ganho de resistência mecânica ao longo do tempo (Gráfico 4.6). É possível observar o elevado ganho de resistência nas primeiras idades, característica dos materiais geopoliméricos. A resistência à compressão foi de 25,1 MPa, valor muito próximo ao encontrado neste estudo (25,2 MPa).

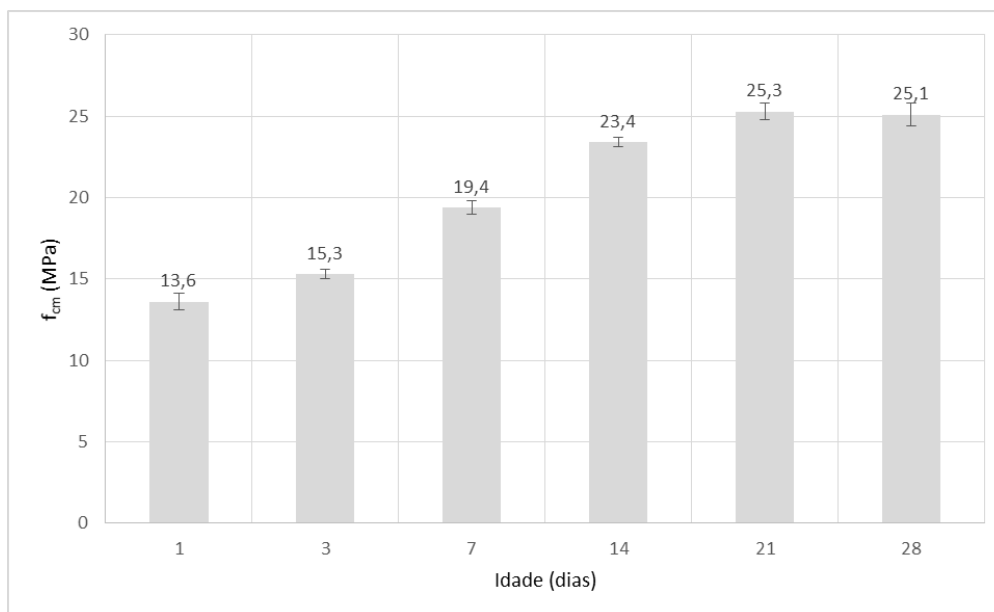


Gráfico 4.6 - Evolução da resistência à compressão da AGT1 em função do tempo (adaptado de GOLIATH, 2017).

4.1.4. Resumo da caracterização dos materiais e comparação dos resultados

Um resumo das propriedades mecânicas do concreto convencional e das argamassas utilizados nesta pesquisa é mostrado nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 - Resumo das propriedades mecânicas (f_{cm} e $f_{ct,sp}$) dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Material	f_{cm} (MPa)	S (MPa)	CV (%)	$f_{ct,spm}$ (MPa)	S (MPa)	CV (%)
Concreto	49,9	0,70	1,41	3,8	0,10	2,61
ACQT	12,9	0,38	2,97	1,7	0,05	2,80
ACQU	24,9	0,82	3,28	2,3	0,10	4,13
AGT1	25,2	0,44	1,73	2,7	0,10	3,83
AGT2	37,2	0,21	0,56	3,4	0,09	2,70

Tabela 4.5 - Resumo das propriedades mecânicas (E, ν , G) dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Material	E_c (GPa)	S (GPa)	CV (%)	ν	S	CV (%)	G (GPa)	S (GPa)	CV (%)
Concreto	32,33	0,80	2,47	0,17	0,70	4,20	13,86	4,00	0,29
ACQT	10,52	0,37	3,52	0,13	0,31	2,47	4,67	5,30	1,13
ACQU	17,10	0,78	4,56	0,10	0,45	4,48	7,77	5,50	0,71
AGT1	6,76	0,30	4,44	0,33	0,21	0,64	2,54	4,60	1,81
AGT2	6,92	0,35	5,06	0,30	0,11	0,37	2,67	5,30	1,98

Os valores de resistência à compressão axial e à tração indireta da ACQU e AGT1 foram bem aproximados, o que permitiu fazer uma comparação mais direta dos resultados dos ensaios de aderência destas argamassas ao aço e substrato.

Sendo as características elásticas do material uma medida de sua rigidez (MEHTA e MONTEIRO, 2008), por meio da avaliação do módulo de deformação, verifica-se que a ACQU é o material que possui maior módulo de elasticidade entre as argamassas de reparo e, conseqüentemente, maior rigidez. Sendo assim, é a argamassa que menos se deforma em relação às demais. Mazza (2010) destaca que uma menor rigidez para argamassas de reparo favorece a viga reconstituída.

4.1.5. Consistência das argamassas

O estudo feito por Ghosh (2012) sobre trabalhabilidade de argamassas geopoliméricas, classifica as mesmas conforme a Tabela 4.6. Os índices de consistência das argamassas de reparo deste trabalho foram determinados de acordo com ABNT NBR 7215 (1996) e são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.6 - Critérios de trabalhabilidade utilizados para argamassas geopoliméricas (GHOSH, 2012).

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

Tabela 4.7 - Índice de consistência das argamassas deste trabalho.

Argamassa	Índice de consistência (mm)	Trabalhabilidade
ACQT/ACQU	178	Moderada
AGT1	283	Muito alta
AGT2	187	Alta

4.2. Corpos de prova mistos

Os ensaios com os corpos de prova mistos foram realizados baseados na ABNT NBR 12142 (2010). Segundo Antunes (2005), a resistência à tração da argamassa representa o máximo valor que a resistência de aderência pode atingir. Neste caso, a resistência avaliada é a de aderência entre o substrato e o reparo, simulando um caso onde haja necessidade de recuperar um elemento estrutural submetido à tração. O resultado da tensão de ruptura do ensaio equivale à tensão limite de resistência de aderência.

Os resultados mostraram maiores resistências de aderência dos corpos de prova fabricados com a AGT1 nas séries CG e CCG em relação às CQ e CCQ (reparadas com ACQT). Os valores de $f_{ct,f}$ e $f_{ct,fm}$, em MPa, representam as resistências de aderência e resistências médias de aderência das argamassas de reparo ao substrato, respectivamente, e estão nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8- Resultados das séries CCQ e CCG.

Série	CCQ			CCG		
	CCQ1	CCQ2	CCQ3	CCG1	CCG2	CCG3
Corpo de prova						
Carga de ruptura (N)	1.065,8	1.017,4	1.138,5	2.361,7	2.456,2	2.465,2
$f_{ct,f}$ (MPa)	1,85	1,76	1,97	4,10	4,26	4,28
$f_{ct,i}/f_{cm}$	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17
Média $f_{ct,fm}$ (MPa)	1,86			4,21		
Média $f_{ct,fm}/f_{cm}$	0,14			0,17		
S $f_{ct,fm}/f_{cm}$	0,01			0,00		
CV $f_{ct,fm} / f_{cm}$ (%)	0,36			0,08		

Tabela 4.9 - Resultados das séries CQ e CG.

Série	CQ			CG		
Corpo de prova	CQ1	CQ2	CQ3	CG1	CG2	CG3
Carga de ruptura (N)	1.211,2	1.332,3	1.271,7	3.148,9	3.088,4	3.200,6
$f_{ct,f}$ (MPa)	2,10	2,31	2,21	5,46	5,36	5,55
$f_{ct,f}/f_{cm}$	0,16	0,18	0,17	0,22	0,21	0,22
Média $f_{ct,fm}$ (MPa)	2,21			5,46		
Média $f_{ct,fm}/f_{cm}$	0,17			0,22		
S $f_{ct,fm}/f_{cm}$	0,01			0,00		
CV $f_{ct,fm} / f_{cm}$ (%)	0,30			0,06		

Nos resultados de todas as séries, os valores de resistência de aderência dos corpos de prova mistos com AGT1 foram superiores aos com ACQT. Porém, os valores das resistências mecânicas destas argamassas são bem diferentes, de acordo com o item 4.1.4. Por isso, os resultados foram normalizados dividindo-se os valores das resistências de aderência pelos valores médios de suas resistências à compressão ($f_{ct,f}/f_{cm}$). Estes são mostrados no Gráfico 4.7 e resultam novamente em valores superiores das resistências de aderência nos corpos de prova com a AGT1.

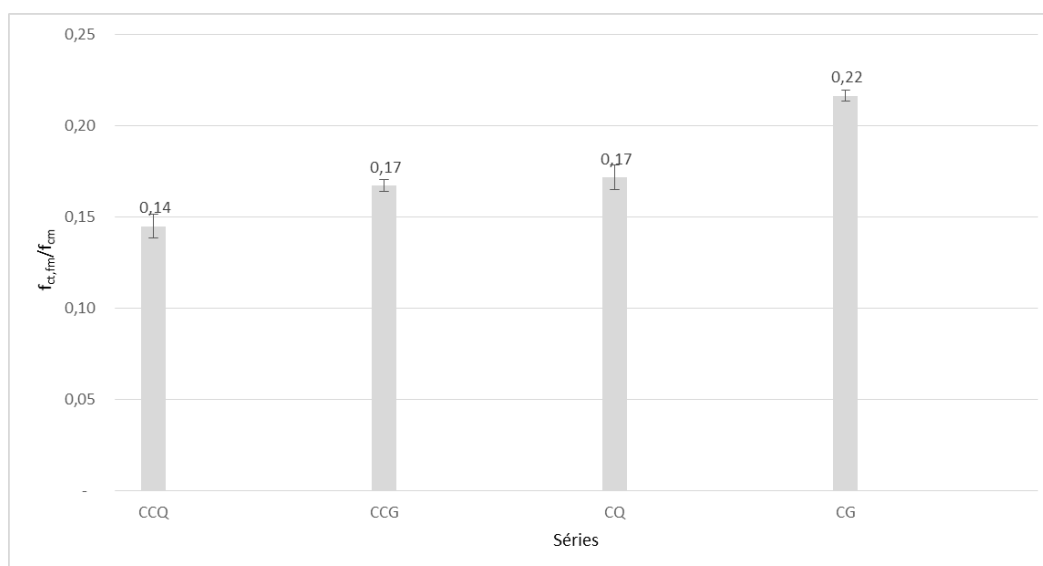


Gráfico 4.7 - Médias das tensões normalizadas $f_{ct,fm}/f_{cm}$.

Todos os corpos de prova mistos apresentaram ruptura na interface (Figura 4.1), devido à menor resistência de aderência em relação às resistências do concreto

convencional e das argamassas de reparo.

A tensão de aderência entre o concreto do substrato e a AGT1 foi 13% superior nos corpos de prova da série CCG em relação à CCQ, e 21% maior nos corpos de prova da série CG em relação à CQ.

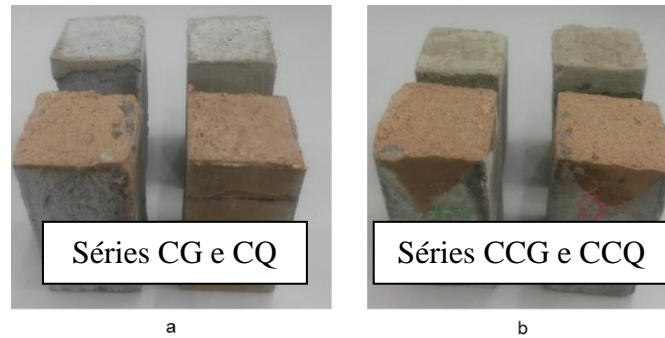


Figura 4.1- Modo de ruptura dos corpos de prova mistos.

Com os dados das tensões de aderência normalizadas, verificou-se que a AGT1 possui maior compatibilidade ao substrato que a ACQT. Logo, a maior capacidade portante foi obtida pelos corpos de prova mistos utilizando AGT1. No item 2.2.1.1 é citado que a aderência química é influenciada pela porosidade do material e às análises das micrografias por MEV descritas no Item 3.11.4 apresentam muitos poros para ACQT o que provavelmente explica a baixa resistência de aderência da argamassa comercial ao substrato. Além disso, o Item 3.11.4 mostra a região homogênea da interface AGT1/substrato, resultado que pode ser associado ao maior valor da resistência de aderência da argamassa geopolimérica ao substrato.

Na literatura há escassez de pesquisas para este tipo de ensaio. No entanto, Kudlanvec Junior *et al.* (2016) pesquisaram a aderência de corpos de prova mistos (Figura 4.2) com as mesmas dimensões e configurações das séries CQ e CG (metade concreto convencional/metade argamassa de reparo) utilizados neste trabalho. Os pesquisadores utilizaram 3 tipos de argamassas comerciais de reparo com resistências mecânicas distintas (Tabela 4.10) e substrato com resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias. O substrato foi apicoado, diferentemente deste trabalho, que foi mantido liso. Os valores das resistências de aderência normalizados são mostrados na Tabela 4.11. Os pesquisadores apresentaram os valores de desvio-padrão em gráficos e não foi possível identificá-los.

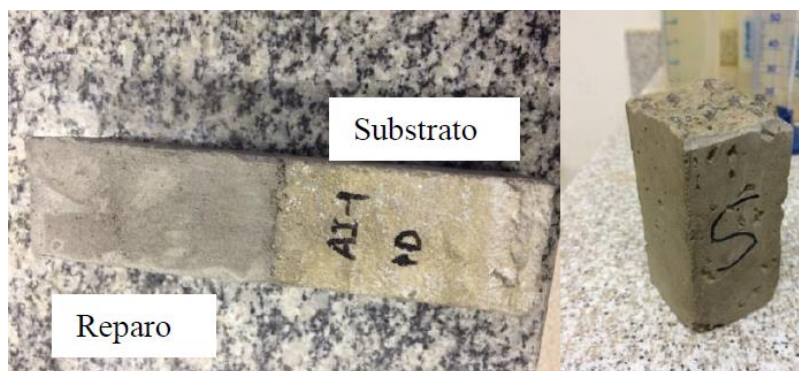


Figura 4.2 - Corpo de prova misto para ensaio de resistência à tração na flexão (KUDLANVEC JUNIOR *et al.*, 2016).

Tabela 4.10 - Resistências mecânicas das argamassas usadas por Kudlanvec Junior *et al.* (2016),

Argamassa comercial	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)
AI-1	60,7	12,5
AI-2	56,7	9,7
AI-3	14,6	2,8

Tabela 4.11 - Resistências de aderência normalizadas (KUDLANVEC JUNIOR *et al.*, 2016).

Argamassa comercial	$f_{ct,fm}$ (MPa)	$f_{ct,fm}/f_{cm}$
AI-1	4,94	0,08
AI-2	6,76	0,12
AI-3	1,41	0,10

É interessante destacar que a AI-2, com resistência à tração inferior à AI-1, apresentou resistência de aderência superior. Embora os pesquisadores não tenham discutido esta particularidade, é válido comentar que grande parte das pesquisas e normas não consideram a resistência de aderência em seus cálculos teóricos, e que os resultados experimentais do presente trabalho comprovam que a força de ligação (aderência) entre os materiais é um parâmetro determinante para o desempenho mecânico de estruturas de concreto.

Os corpos de prova das séries CQ e CG podem ser comparados aos de Kudlanvec Junior *et al.* (2016), pois possuem a mesma configuração (metade concreto convencional e metade argamassa de reparo). De acordo com a Tabela 42, é possível afirmar que todas as argamassas comerciais utilizadas pelos pesquisadores tiveram desempenho inferior (quanto à aderência) em relação à ACQT e à AGT1. Em particular, a AGT1 teve resistência de aderência 83% maior em relação à AC-2 (argamassa de maior aderência no estudo de Kudlanvec Junior *et al.*, 2016).

Quanto à diferença de tratamento da superfície do substrato, na presente pesquisa a superfície dos corpos de prova possuíam rugosidade de 7,5 μm (não sendo apicoada), enquanto que as superfícies do estudo de Kudlanvec Junior *et al.* (2016) foram apicoadas. Assim como neste estudo, os pesquisadores informam que os fabricantes das argamassas comerciais recomendam o apicoamento e o molhamento da superfície do substrato antes da aplicação do produto. Porém, este tratamento da superfície dos substratos, em comparação com os deste trabalho, não contribuiu para que suas resistências de aderência fossem superiores. Portanto, estes resultados sugerem que o mecanismo de intertravamento mecânico teve menor influência que a parcela de adesão na promoção da aderência entre os materiais.

4.3. Tirantes

O ensaio de conformação superficial preconizado pela ABNT NBR 7477 (1982) foi executado para avaliar a resistência de aderência entre os tipos de aço CA-60 (barra nervurada) de 4,2 mm de diâmetro e CA-25 (barra lisa) com 6,3 mm de diâmetro com o concreto convencional, com a ACQT e com a AGT2. O coeficiente de conformação superficial foi calculado pelos parâmetros α (lado da seção do tirante) e $\Delta l_{m\u00e9dio}$ (distância média entre fissuras, considerando as quatro faces), de acordo com o item 2.4.1.

Os valores dos coeficientes de conformação superficial encontrados para cada série estão no Gráfico 4.8. Segundo a ABNT NBR 7480 (2007), o coeficiente de conformação superficial deve ter valor maior ou igual a 1,0 para diâmetros menores que 10 mm, como nos casos das barras de aço de CA-25 e de CA-60. Desta forma, o aço CA-25 de 6,3 mm para ACQT não atende à norma em questão.

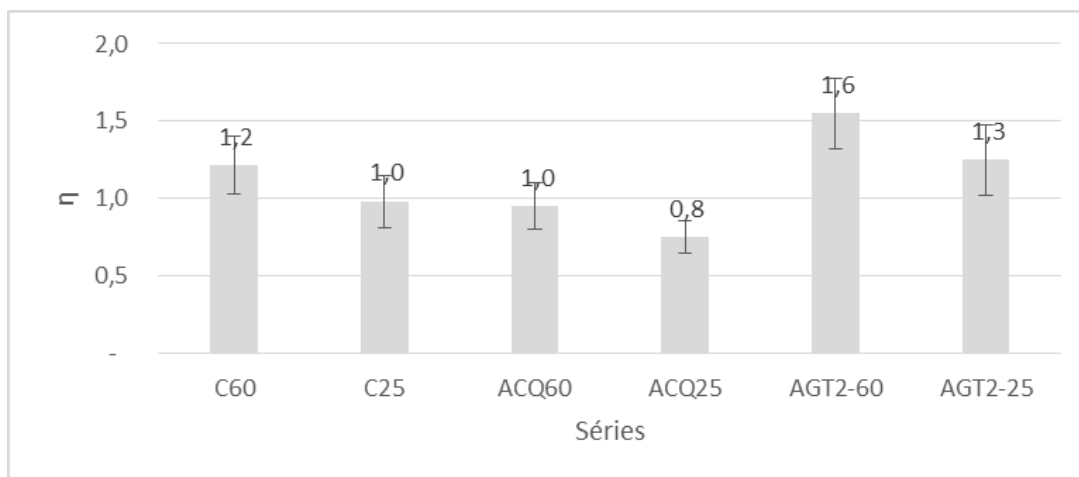


Gráfico 4.8 - Valores do coeficiente de conformação superficial para os corpos de prova de todas as séries.

A partir dos valores encontrados no ensaio de tirantes, foi possível determinar a resistência de aderência entre o aço e o concreto ou argamassas de reparo. As equações utilizadas para isto foram as de Castro (2000), da ABNT NBR 6118 (2014) e a de Silva (2015), descritas no item 2.4.1.

O parâmetro $f_{cta} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$, utilizado nas formulações de tensões de aderência deste trabalho, foi substituído pelo valor de $f_{ctm} = 0,9 \cdot f_{ct,spm}$, onde $f_{ct,spm}$ foi obtido por meio do ensaio de tração indireta.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), conclui-se que as barras de aço nos tirantes são situadas pela norma em região de má aderência; logo $\eta_2 = 0,7$ foi utilizado nos cálculos.

As tensões de aderência, calculadas segundo Castro (2000), ABNT NBR 6118 (2014) e Silva (2015), bem como seus valores normalizados (tensão de aderência dividida pela resistência média à compressão de cada material), estão na Tabela 4.12. As discussões tomam por base os valores normalizados.

De acordo com a Tabela 4.12, foi observado que utilizando a equação de Castro (2000) os resultados das resistências de aderência para AGT2 (com os dois tipos de aço) foram maiores que os valores dos outros materiais. No entanto, quando se utiliza a equação da ABNT NBR 6118 (2014), a ACQT supera os valores encontrados para os demais materiais. E os resultados usando a equação de Silva (2015) apontam a AGT2 como material mais aderente aos tipos de aço utilizado.

Para todas as equações utilizadas, as argamassas de reparo tiveram a

resistência de aderência superior ao concreto convencional. Em relação aos tipos de aço utilizados, as barras lisas de CA-25 tiveram os menores valores de resistência de aderência, resultados compatíveis com a ABNT NBR 6118 (2014). O menor número de fissuras encontrado ocorreu nos corpos de prova com o aço liso e conseqüentemente as maiores distâncias médias entre fissuras.

Analisando estes resultados por meio dos parâmetros utilizados nas equações aplicadas neste trabalho, é possível afirmar que: os resultados de Castro (2000) e Silva (2015) são mais coerentes pois utilizaram, respectivamente, $\Delta l_{médio}$ e η , parâmetros do ensaio de tirantes realizado nesta pesquisa. Já a ABNT NBR 6118 (2014) utiliza uma equação com parâmetros fixos (η_1, η_2 e η_3) e o parâmetro variável f_{ctm} . Neste caso como a razão f_{ctm}/f_{cm} da ACQT tem maior valor, os resultados de suas resistências de aderência normalizadas foram superiores segundo esta norma.

Tabela 4.12 - Tensões de aderência, calculadas segundo Castro (2000), ABNT NBR 6118 (2014) e Silva (2015); e seus valores normalizados.

Série	τ_m (MPa) CASTRO (2000)	τ_m/f_{cm} Castro (2000)	f_{bd} (MPa) NBR6118 (2014)	f_{bd}/f_{cm} NBR6118 (2014)	f_{bd} (MPa) Silva (2015)	f_{bd}/f_{cm} Silva (2015)
C60	7,3	0,15	5,3	0,11	4,1	0,08
C25	4,5	0,09	2,5	0,05	3,3	0,07
ACQ60	2,6	0,20	2,5	0,19	1,5	0,12
ACQ25	1,6	0,12	1,1	0,09	1,2	0,09
AGT2-60	8,5	0,23	4,9	0,13	4,8	0,13
AGT2-25	6,4	0,17	2,2	0,06	3,9	0,10

Não foi encontrada nenhuma pesquisa na qual foi realizado o ensaio de conformação superficial para os aços CA-25 e CA-60. Os trabalhos encontrados avaliaram o desempenho da aderência com diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm de CA-50 em relação a concretos à base de cimento Portland.

A fim de mostrar a eficácia deste ensaio, destacam-se os trabalhos de Costa (2012) e Silva (2015). Costa (2012) avaliou o comportamento da aderência entre o aço e o concreto em peças carbonatadas, por um período de 102 dias, e em peças com posterior corrosão, induzida pela aplicação de uma corrente elétrica por 72 dias. Foram realizados ensaios de arrancamento segundo as prescrições da RILEM/CEB/FIP-RC6 (1983), e tirantes de acordo com a ABNT NBR 7477 (1982). Já Silva (2015) realizou ensaio de tirantes e arrancamento em concreto autoadensável

contendo seixos de rio e fibras de aço. Os resultados dos ensaios de arrancamento e de tirantes indicaram que a aderência da barra de aço ao concreto não foi afetada pela presença do seixo rolado no concreto autoadensável e da adição do reforço fibroso. Ambos os pesquisadores destacaram que os valores encontrados de resistência de aderência nos ensaios de arrancamento e de tirantes foram compatíveis e complementares.

4.4. Vigas com e sem reparo

Ao todo, 27 vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos até o colapso, de acordo com a configuração mostrada no item 3.12.3.6. O carregamento foi crescente até a ruptura das vigas. Os dados obtidos nos ensaios foram coletados por inspeção visual e por meio da leitura de extensômetros e do *LVDT*. Estes foram utilizados para determinação das curvas carga *versus* deflexão (no meio das vigas), carga *versus* deformação na zona de compressão do concreto, carga *versus* deformação na zona de tração do concreto ou da argamassa de reparo e carga *versus* deformação na armadura de tração. Serviram também para determinar momentos de fissuração e analisar os modos de ruptura das vigas, bem como para avaliar a aderência das argamassas de reparo ao substrato. Em particular, para as séries A, D e G (vigas sem armadura), o modo de ruptura foi avaliado por meio do ensaio de resistência ao cisalhamento na flexão.

Os resultados foram, em sua maioria, obtidos e calculados para o estado limite último (ELU). No entanto, o item 4.4.4 apresenta algumas conclusões do comportamento das vigas no estado limite de serviço (ELS). Neste trabalho foi considerado o valor de 60% das cargas de ruptura para avaliar o comportamento em serviço das séries com vigas armadas.

4.4.1. Vigas das séries A, D e G

As vigas das séries A, D e G não foram armadas. As vigas da série A eram maciças (sem reparo) e serviram de referência. As da série D foram reparadas, a princípio, com ACQT, sem apicoamento. Porém, houve descolamento do reparo, como descrito no item 3.12.3.6. Num segundo momento, a viga D1 teve sua superfície

apicoada de forma aleatória (até exposição do agregado graúdo) e recebeu o reparo de ACQT. As vigas D2 e D3 não sofreram apicoamento e foram reconstituídas com ACQU. Na série G, as vigas foram recuperadas com AGT1.

Sabe-se que uma superfície mais rugosa confere maior travamento mecânico do reparo, provocando maior aderência na zona de transição. No entanto o procedimento indicado pelo fabricante e utilizado na viga D1 não resultou em melhor desempenho quando comparado com as vigas D2 e D3. Neste caso, a cura úmida aumentou as reações de hidratação, permitindo maior superfície de contato entre o concreto e a argamassa comercial.

Para as vigas das séries A e G foram apresentados (em sua maioria) valores médios, e para as vigas da série D são mostrados valores individuais. A seguir, apresentam-se os resultados destas séries.

4.4.1.1. Carga de ruptura das vigas das séries A, D e G

O Gráfico 4.9 mostra as cargas últimas experimentais ($P_{u,exp}$) e as cargas últimas teóricas ($P_{u,teor}$) das vigas. As $P_{u,exp}$ das séries A e G tiveram valores semelhantes. As vigas da série D tiveram ruptura precoce pela baixa aderência da ACQT e ACQU ao substrato. A viga D1, que foi apicoada e sofreu cura à temperatura ambiente, teve sua ruptura com carga inferior às vigas D2 e D3, que não foram apicoadas e tiveram cura úmida. Assim, de acordo com os resultados de resistência de aderência dos corpos de prova mistos, descritos no item 4.2., o apicoamento teve menor influência no desempenho (aderência mecânica) do que o modo de cura da viga, que está associada à parcela de aderência química.

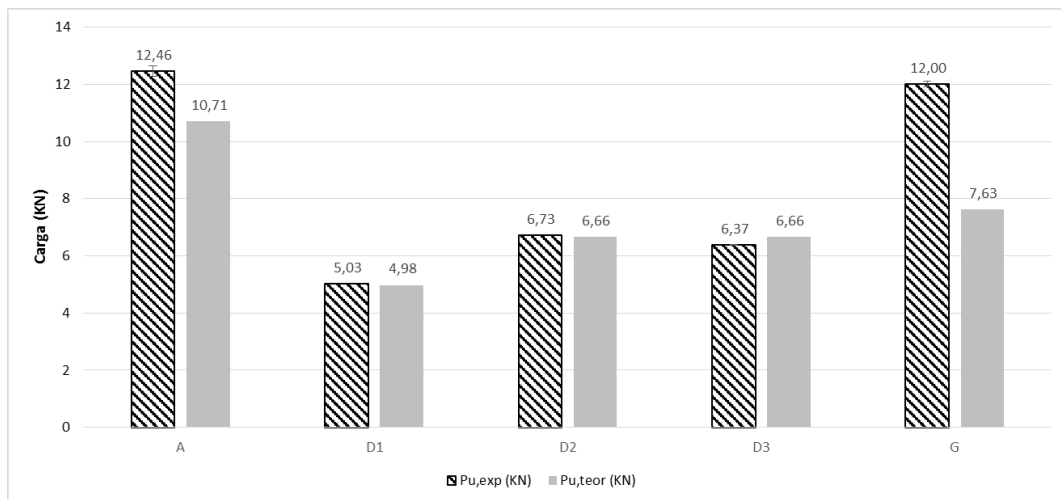


Gráfico 4.9 - Valores das cargas de ruptura teóricas e experimentais das vigas das séries A, D e G.

As relações $P_{u,exp}/P_{u,teor}$ (Gráfico 4.10) mostram que as vigas da série G tiveram carga de ruptura experimental 58% maior do que a carga de ruptura teórica. Vale destacar que as resistências à compressão e à tração indireta (item 4.1.4) das argamassas ACQU e AGT1 utilizadas nestas vigas possuem valores semelhantes. Desta forma, por meio dos resultados dos ensaios com os corpos de prova mistos, que mostraram maiores valores de resistência de aderência com a AGT1 (item 4.2), e a forma de ruptura apresentada no item 4.4.1.7, é possível afirmar que a aderência desta argamassa ao substrato foi determinante para o resultado superior das vigas da série G em relação às da série D.

Em relação ao dimensionamento das cargas de ruptura das vigas destas séries ($P_{u,teor}$) a ABNT NBR 6118 (2014) foi mais precisa, com baixa margem de segurança em relação as vigas de referência da série A. Já as vigas D1 e D2 ficaram no limite da segurança. Enquanto a viga D3 mostrou-se contra a segurança. A norma demonstrou-se mais conservadora para as vigas da Série G.

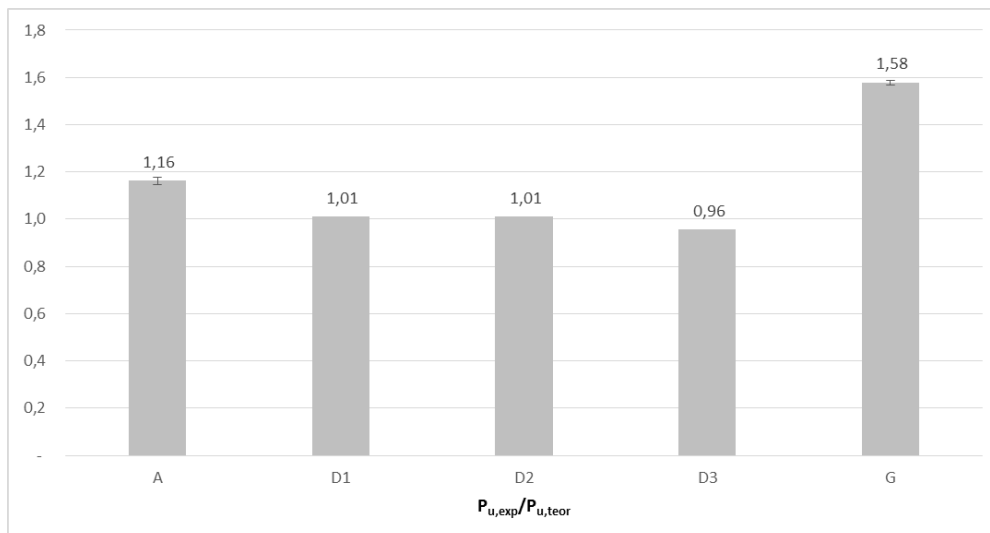


Gráfico 4.10 - Relação $P_{u,exp}/P_{u,teor}$ das vigas das séries A, D e G.

4.4.1.2. Carga versus flecha das vigas das séries A, D e G

Nesta pesquisa e no estudo de Mazza (2010), o entalhe nas vigas preenchidas com argamassas geopoliméricas diminuiu a rigidez do sistema, quando a comparação é feita entre as vigas das séries A e G (com cargas de ruptura semelhantes). Isso reduz a susceptibilidade de surgimento de ruptura frágil e indesejável, por possibilitar o aumento do aproveitamento das propriedades resistentes à tração das vigas recuperadas (MAZZA, 2010).

O Gráfico 4.11 mostra as curvas carga *versus* flecha das vigas A1, D1, D2, D3 e G1. Os gráficos das vigas A2, A3, G2 e G3 encontram-se no Anexo A. As curvas das vigas A1 e G1 são análogas. A flecha máxima da viga A1 é de 0,13 mm e da viga G1 é de 0,14 mm. Já as curvas das vigas D1, D2 e D3 são bem diferentes em relação à viga A1 (referência). As flechas máximas das vigas D1, D2 e D3 são, respectivamente, iguais a 0,05 mm, 0,07 mm e 0,06 mm. Os valores inferiores apresentados por estas vigas refletem em menores cargas de ruptura (que ocorreu por falta de aderência da ACQT e ACQU ao substrato).

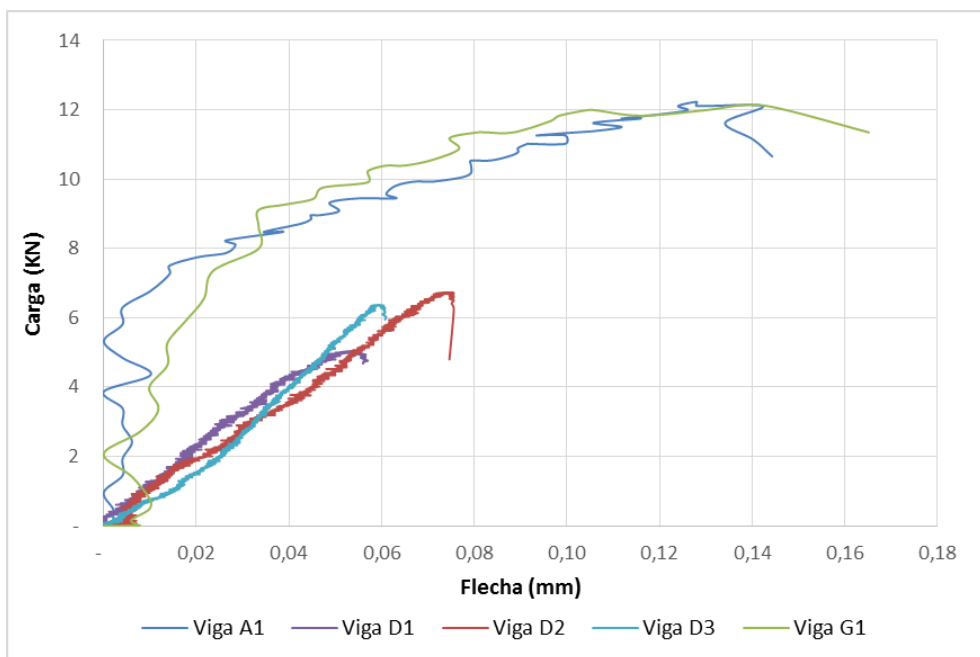


Gráfico 4.11 - Curvas carga *versus* flecha das vigas A1, D1, D2, D3 e G1.

Sendo a ductilidade uma propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura, o concreto é considerado um material frágil e suporta pouca deformação em ensaios de flexão. No entanto, vale destacar que as maiores deflexões ocorreram para os corpos de prova recuperados com argamassa geopolimérica (quando comparadas às vigas de referência de concreto maciço), devido ao baixo módulo de elasticidade longitudinal deste material de reparo. O Gráfico 4.12 mostra os valores médios (3 corpos de prova) das flechas máximas das séries A e G e os das vigas D1, D2 e D3.

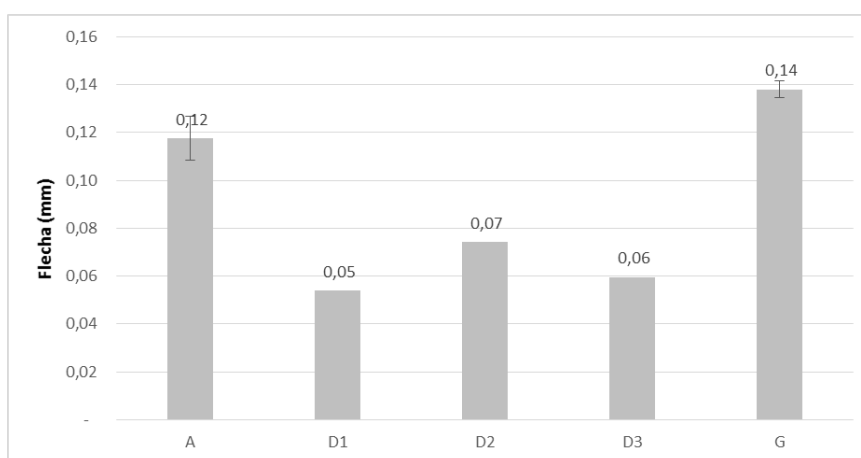


Gráfico 4.12 - Valores médios das flechas máximas das vigas das séries A e G; e valores das flechas das vigas D1, D2 e D3.

As vigas reconstituídas com argamassa geopolimérica AGT1 apresentaram-se monolíticas, ao contrário das recuperadas com argamassa comercial, que apresentaram descolamento da interface substrato/reparo.

Os resultados obtidos por Mazza (2010) para cargas de ruptura e flechas das vigas denominadas de maior potencial são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Valores de carga máxima e deslocamento vertical máximo das vigas (Mazza, 2010).

Viga	Carga de ruptura (kN)	Flecha (mm)
Monolítica (CP2)	12,0	0,025
A100 (CP3)	14,8	0,053
Graute comercial (CP3)	14,4	0,039

No trabalho daquele pesquisador, as vigas reparadas com argamassa geopolimérica A100 e as vigas reparadas com graute comercial tiveram cargas de ruptura e flechas maiores do que as monolíticas de concreto convencional. Ressalta-se, porém, que as argamassas de reparo tinham resistência à tração superior à do concreto de substrato. Assim, as maiores flechas foram obtidas por causa dos menores módulos de elasticidade das argamassas de reparo em relação ao concreto convencional (MAZZA, 2010).

4.4.1.3. Carga versus deformação na zona de compressão das vigas das séries A, D e G

Para o monitoramento das deformações específicas do concreto e das argamassas de reparo foram utilizados extensômetros elétricos de resistência, de acordo com os modelos descritos no item 3.3. Os valores lidos por meio desses *strain gages* permitiram traçar o perfil de deformações nos pontos especificados no item 3.12.3.4 e, conseqüentemente, em diferentes pontos das vigas com diferentes reparos. O Gráfico 4.13 mostra as curvas carga versus deformação na zona de compressão das vigas A1, D2 e G1. Verifica-se que a viga A1 deformou menos que a G1 até a carga de 9 kN. A partir desta carga elas tiveram comportamentos bem parecidos. Porém, considerando os baixos valores de deformação, é possível afirmar que ambas tiveram comportamento bem semelhante. Já a viga D2 teve comportamento diferente, pois, como já foi dito em itens anteriores, as vigas da série D tiveram ruptura antecipada pela falta de aderência da ACQT e ACQU ao substrato.

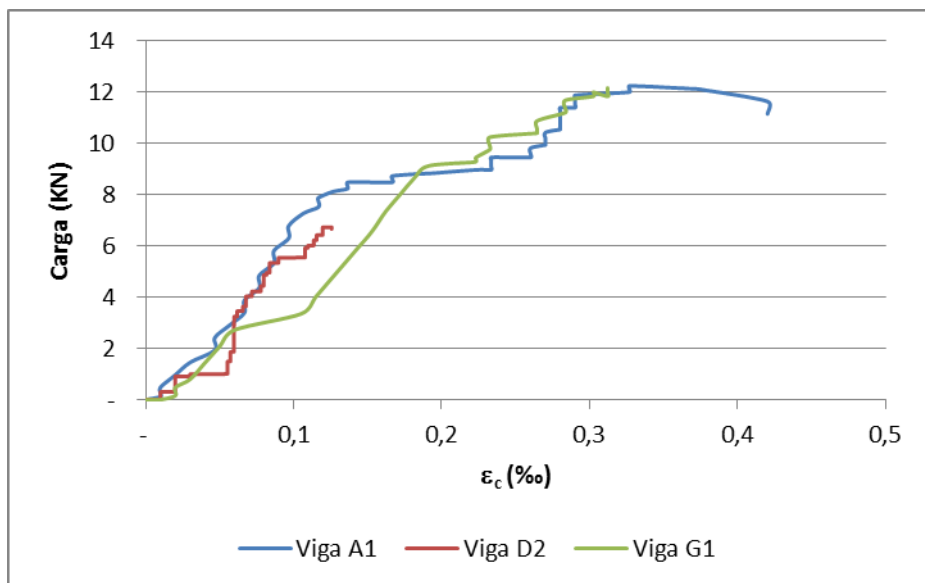


Gráfico 4.13 - Curvas carga *versus* deformação na zona de compressão das vigas A1, D2 e G1.

De acordo com o Gráfico 4.14, é possível comparar os valores de deformação máxima na zona de compressão. Os valores das vigas A1 e G1 mostram compatibilidade de deformações entre elas.

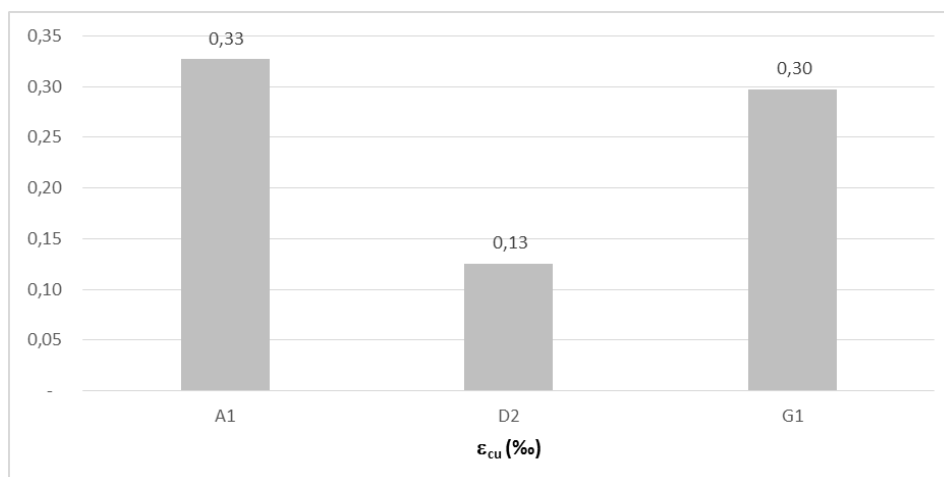


Gráfico 4.14 - Valores das deformações máximas (na zona de compressão) das vigas A1, D2 e G1.

Mazza (2010) relatou que não pôde analisar os dados de deformações dos extensômetros colados nas regiões de compressão, tração e interface devido a falhas na aquisição dos dados.

4.4.1.4. Carga versus deformação na zona de tração das vigas das séries A, D e G

O Gráfico 4.15 mostra as deformações na zona de tração a uma altura de 20 mm (correspondente ao cobrimento estrutural nas séries de vigas armadas e a localização dos extensômetros na armadura de tração destas vigas) do bordo inferior das vigas A1, D2 e G1. Assim como ocorreu no item 4.4.1.3, as deformações das vigas A1 e G1 foram semelhantes. Já as da viga D2 foram diferentes das demais. As deformações máximas (Gráfico 4.16) confirmam a compatibilidade entre as vigas A1 e G1.

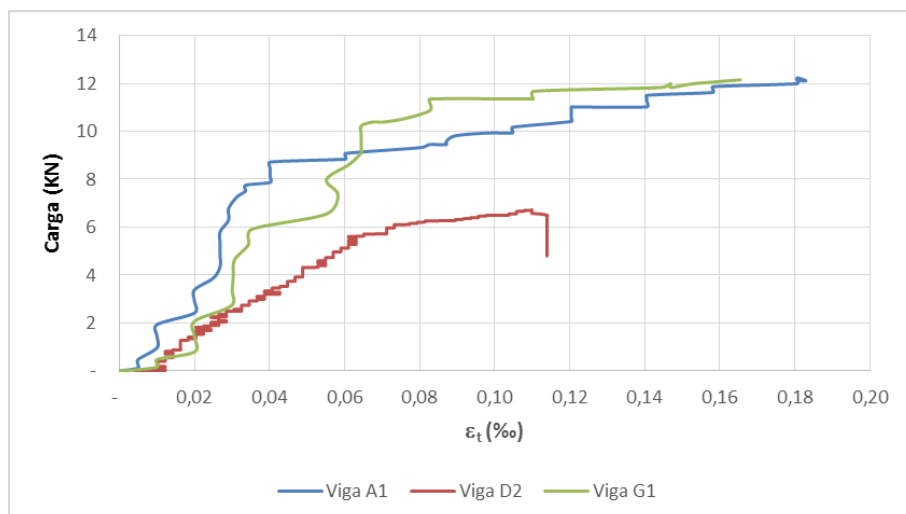


Gráfico 4.15 - Curvas carga versus deformação na zona de tração das vigas A1, D2 e G1.

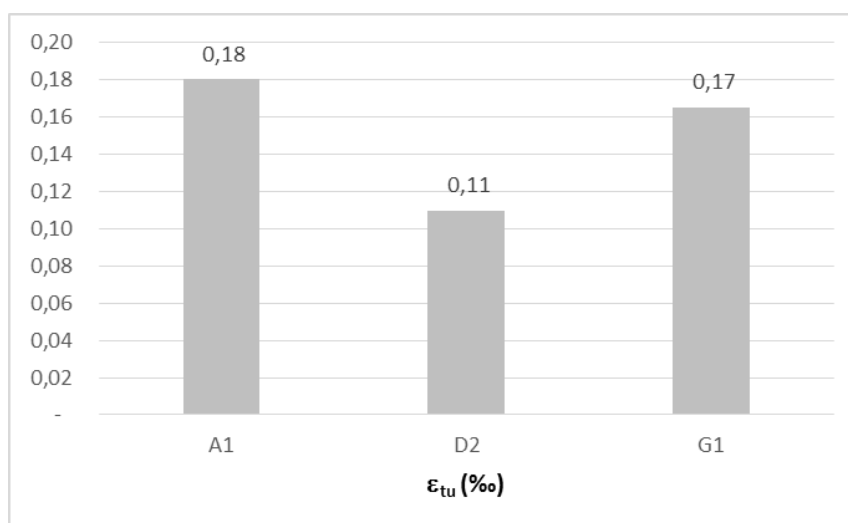


Gráfico 4.16 - Valores das deformações máximas (na zona de tração) das vigas A1, D2 e G1.

4.4.1.5. Carga versus deformação na zona de interface substrato/reparo das vigas das séries A, D e G

De acordo com os itens anteriores, as deformações entre as vigas das séries A e G foram semelhantes. Isto indica que não houve perda de aderência na região da interface entre o substrato e o reparo, com base nos gráficos de deformações nas zonas de compressão e tração das vigas. Observa-se que, em todos os casos, as deformações foram praticamente insignificantes até a carga de aproximadamente 9 kN. É nesse momento que a AGT1 passa a ser solicitada e a suportar os esforços de tração, e a aderência entre ela e o substrato foram determinantes para reparar as vigas e manter o monolitismo das vigas da série G.

O Gráfico 4.17 confirma a compatibilidade de deformações entre a viga monolítica A1 e a G1 reparada com AGT1, com a posição da linha neutra praticamente inalterada. A linha neutra da viga D2, mais próxima do bordo superior, demonstra que o reparo com a ACQU fez esta perder resistência com valores de deformações inferiores às demais. A linha vermelha cheia neste gráfico representa a zona da interface e confirma as deformações semelhantes das vigas A1 e G1 nesta região. A deformação muito pequena (nesta região) da viga D2 deve-se ao motivo já exposto, ruptura antecipada pela falta de aderência substrato/reparo.

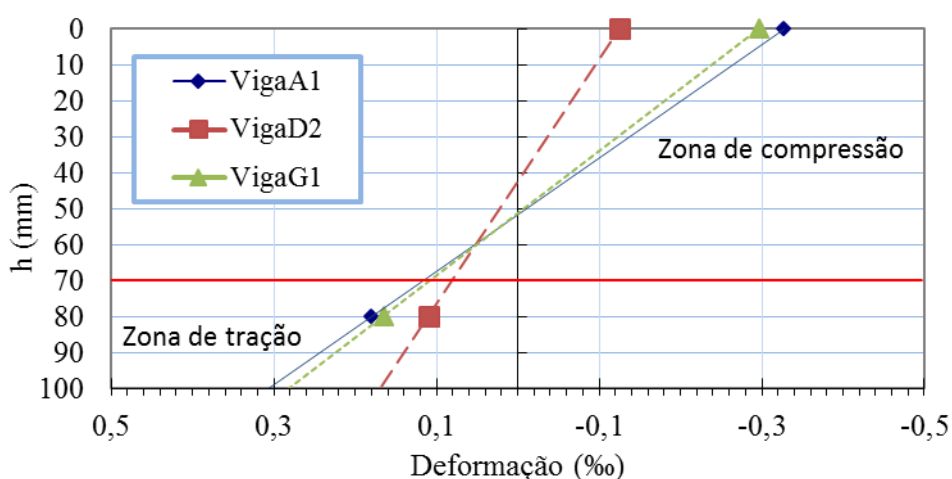


Gráfico 4.17 - Localização da linha neutra das vigas A1, D2 e G1 para carga última.

4.4.1.6. Momento de fissuração das vigas das séries A, D e G

As fissuras foram avaliadas somente por meio da análise visual. Nas vigas das séries A e G as fissuras de flexão ocorreram no terço médio das vigas, no momento do colapso, ou seja, quando se atingiu a carga máxima do ensaio. Já na série D ocorreram antes da ruptura, na região inferior inclinada do reparo, propagando-se pela interface concreto/reparo e, em seguida, para o concreto.

Sabe-se que nos estados-limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre esses dois estádios é definida pelo momento de fissuração. Esse momento pode ser calculado de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014) pela Equação 14.

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad (14)$$

onde,

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares;

y_t = distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada ($h/2$);

I_c = momento de inércia da seção transversal bruta de concreto;

$f_{ct} = f_{ct,spm}$; nesta formulação os valores usados para f_{ct} foram os valores obtidos nos ensaios de tração indireta referentes a cada material utilizado no banzo tracionado da viga (região do reparo).

Nas vigas ensaiadas os valores de I_c , α e y_t foram constantes. Assim, a variação dos resultados de $M_{r,teor}$ foi devido ao parâmetro $f_{ct,spm}$. É importante destacar que a norma não considera a resistência de aderência como parâmetro de cálculo. No entanto, notou-se que os resultados experimentais obtidos para o momento de fissuração experimental ($M_{r,exp}$) foi influenciado principalmente pela aderência dos materiais de reparo ao substrato.

O momento de fissuração das vigas com comportamento monolítico ocorreu para as cargas últimas, mesmo para resistências à tração diferentes. Este fato aconteceu com as vigas das séries A e G. Para as vigas da série D, o $M_{r,exp}$ ocorreu antes do colapso. É possível notar no Gráfico 4.18 que nas vigas da série A os valores teóricos e experimentais são próximos. Para as vigas da série G houve diferença

significativa (valor superior) do valor experimental em relação ao teórico ($M_{r,teor}$). Já para as vigas da série D estes valores foram inferiores. No item 4.4.1.7 verifica-se que a ruptura ocorreu por falta de aderência da ACQT e ACQU ao substrato.

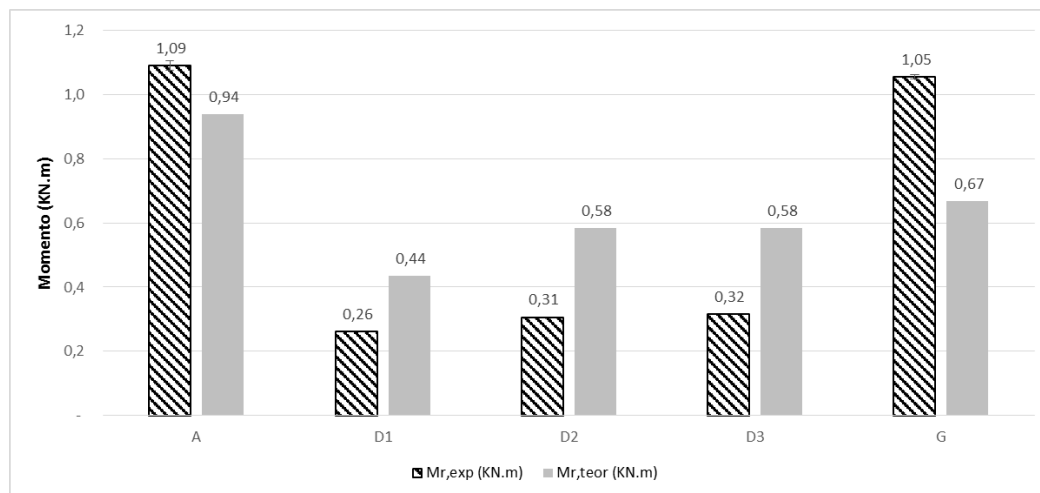


Gráfico 4.18 - Momento de fissuração teórico e experimental das vigas das séries A, e G e das vigas D1, D2 e D3.

Os resultados dos ensaios mostraram que a qualidade da ligação substrato/reparo é que governou o processo de fissuração e não o valor da resistência à tração do material utilizado.

4.4.1.7. Modo de ruptura das vigas das séries A, D e G

As vigas monolíticas e as reparadas com a AGT1 tiveram ruptura frágil na região de flexão pura (no terço médio). Pela norma AFNOR NF P18-851 (1992), a viga reparada com esse tipo de ruptura é do tipo M, como mostrado no item 2.4.3.

De acordo com a norma, a argamassa rompeu de forma monolítica por tração na extremidade inferior da seção com posterior propagação da fissura para o concreto, ou seja, na ruptura, a fissura se propagou da base para o topo. A ruptura com essas características ocorreu nas vigas das séries A e G, como mostram as Figuras 4.3 e 4.4. O modo de ruptura das vigas da série G (Figura 4.5) comprova a boa aderência da AGT1 ao substrato.

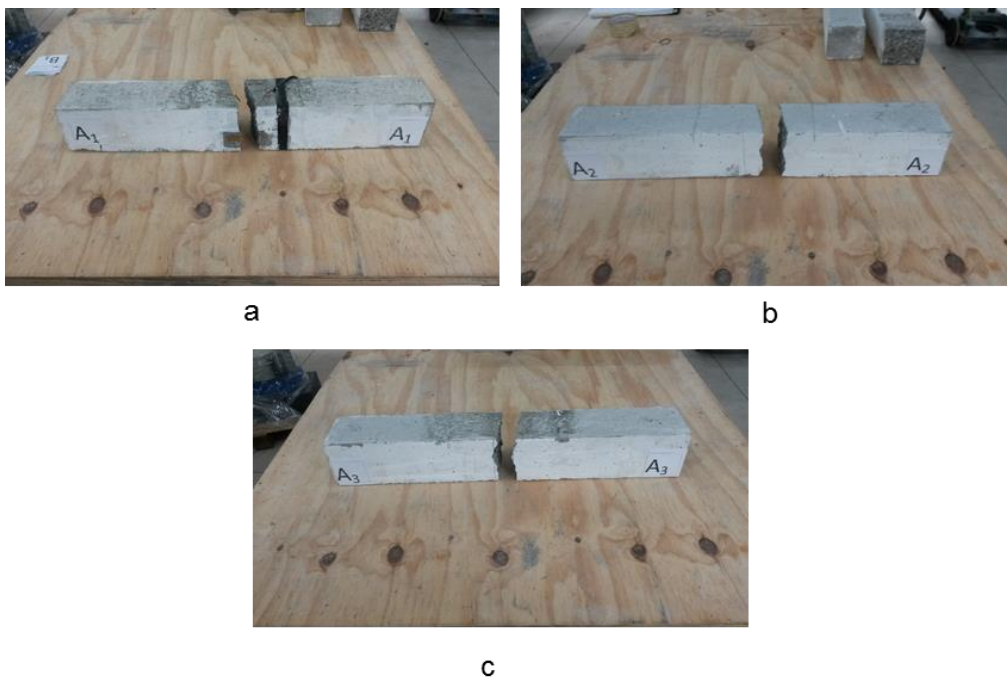


Figura 4.3 - Vigas da série A: monolíticas, sem aço, com ruptura do tipo M.

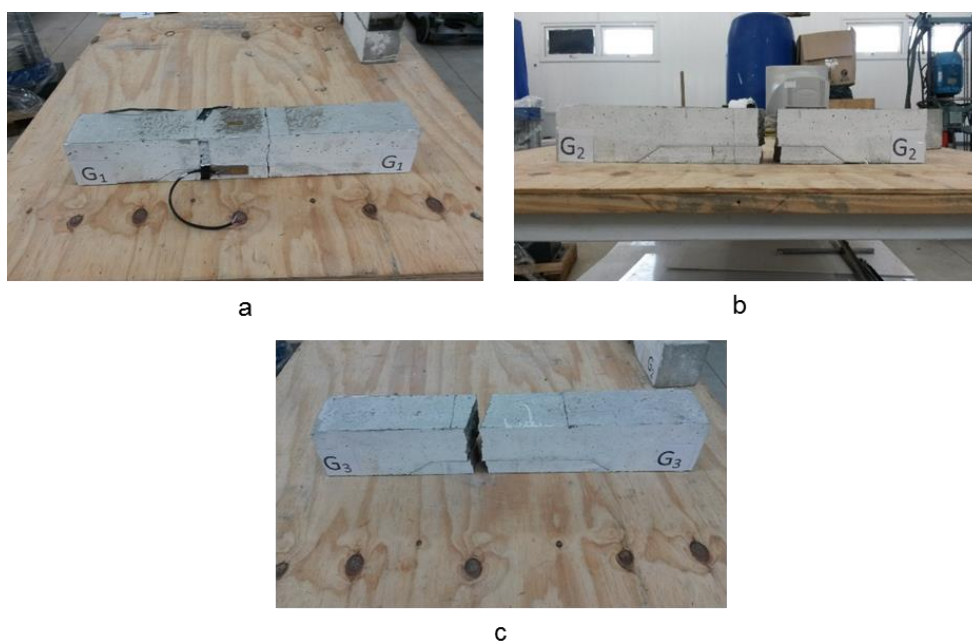


Figura 4.4 - Vigas da série G: reparadas com AGT1, sem aço, com ruptura do tipo M.

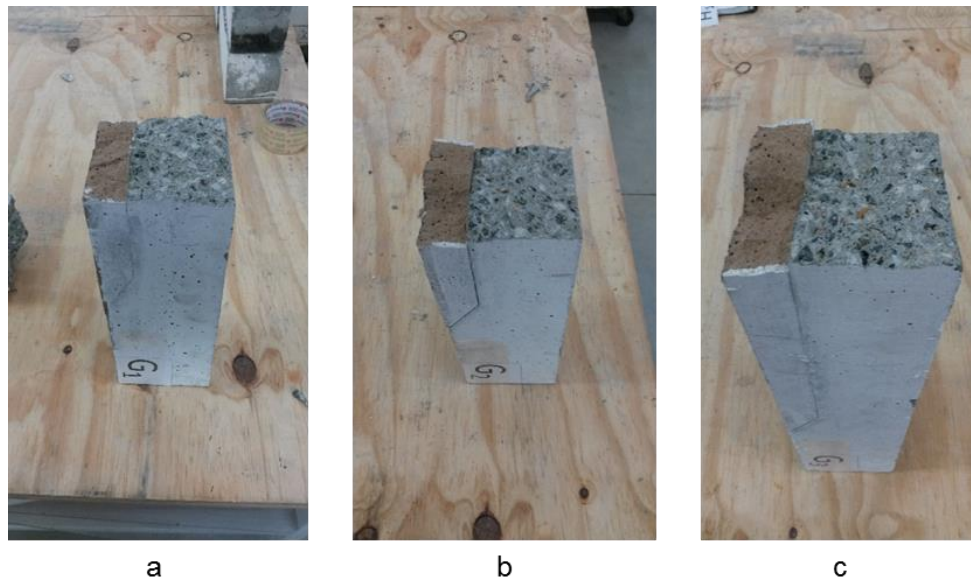


Figura 4.5 - Detalhe da superfície de ruptura da série G.

As vigas da série D, sem aço e recuperadas com argamassa de reparo com ACQT e ACQU tiveram ruptura frágil. De acordo com a AFNOR NF P18-851 (1992), estas vigas tiveram ruptura do tipo I-1 (Figura 4.6). Segundo a norma, houve desprendimento da parte inclinada do reparo e desenvolvimento da fissura para o concreto. Nesses casos a ruptura se dá na região inclinada da reentrância, com conseqüente propagação da fissura para o concreto a partir da interface em sua região horizontal. Esse tipo de ruptura indica má aderência da argamassa de reparo com o substrato. Vale destacar que a viga D1 teve cura em temperatura ambiente e foi apicoada antes da aplicação do reparo (procedimento sugerido pelo fabricante). Já as vigas D2 e D3 não foram apicoadas e tiveram cura úmida. Neste caso o apicoamento interferiu na aderência da ACQT, mas não foi um parâmetro determinante para melhorar o desempenho mecânico da viga D1.

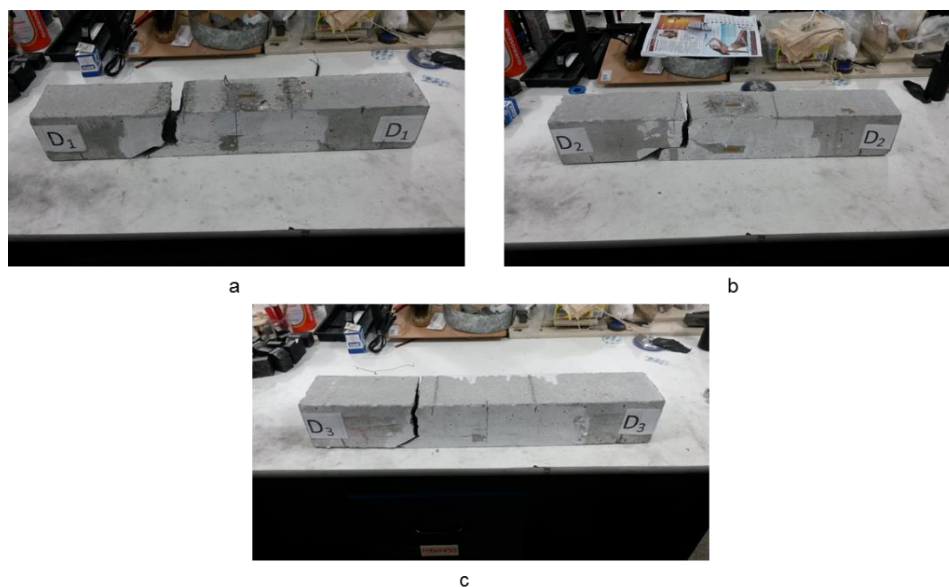


Figura 4.6 - Vigas da série D: reparadas com ACQT e ACQU, sem aço, com ruptura do tipo I-1.

Comparando as vigas da série G com as da série D, a aderência do reparo ao substrato desta foi melhor do que a daquela, pois tiveram ruptura à flexão semelhante aos das peças maciças de concreto convencional. A ruína das vigas da série G teve relação evidente com o ensaio de resistência à tração na flexão dos corpos de prova mistos (item 4.2), com resultados superiores de resistência de aderência dos corpos de prova confeccionados com AGT1.

Costa (2014) cita que a ruptura dos materiais cimentícios multifásicos geralmente ocorre na interface porque, próximo ao substrato, a matriz possui menor resistência e descontinuidades que intensificam os níveis de tensão. Mazza (2010) afirma que a presença do entalhe na face inferior das vigas causa concentração de tensões nessa região (que é de máximo esforço de tração) e, com isso, tende a provocar alterações significativas nos valores da carga de ruptura das vigas, com carga inferior à carga de ruptura da viga monolítica. No entanto, para as vigas da série G deste trabalho os deslocamentos verticais, as deformações laterais, as cargas de ruptura, os momentos de fissuração e o modo de ruptura foram semelhantes com os da série A. Isso mostra que a presença do reparo com argamassa geopolimérica reestabeleceu o monolitismo da estrutura, contribuindo com incremento de flecha, aumentando a ductilidade das vigas.

Mazza (2010) relata ainda que as vigas de referência e as vigas com reparo de argamassa geopolimérica tiveram ruptura tipo M. Já as vigas com reparo de graute

comercial tiveram ruptura tipo I-2 (Figura 4.7).

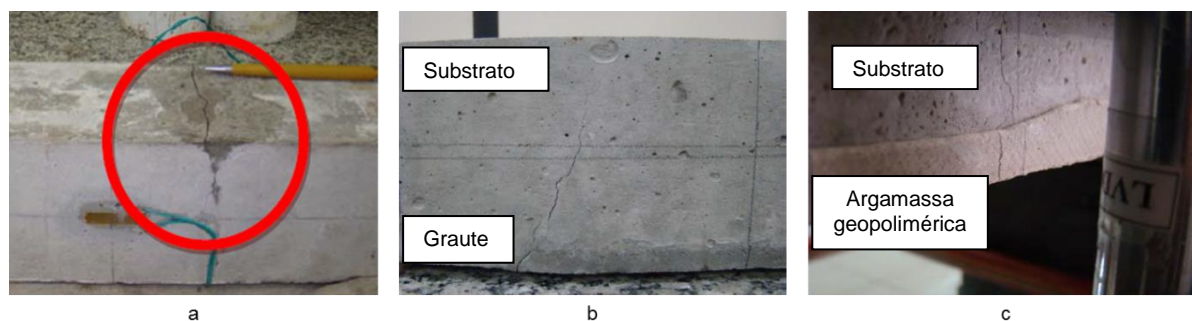


Figura 4.7 - Modo de ruptura das vigas de Mazza (2010): (a) viga de referência com ruptura tipo M; (b) viga reparada com graute comercial com ruptura tipo I-2; (c) viga reparada com argamassa geopolimérica com ruptura tipo M.

4.4.2. Vigas das séries B, E e H

As vigas das séries B, E e H foram confeccionadas com armadura de flexão usando barras de aço nervuradas CA-60 com $\phi 4,2$ mm. Os detalhes da armadura dessas vigas estão no item 3.2.1. Os corpos de prova da série B eram monolíticos (sem reparo), os da série E receberam reparo com ACQT e ACQU, e da série G foram recuperadas com AGT1 e AGT2. Os resultados obtidos na série B são, em sua maioria, valores médios, por possuírem 3 vigas com mesmas características. Já os das séries E e H foram mostrados individualmente por possuírem 3 corpos de prova, sendo dois iguais e um com características diferentes. As especificidades das vigas estão descritas no item 3.12.3.6.

4.4.2.1. Carga de ruptura das vigas das séries B, E e H

Sabe-se que o concreto tem baixa resistência à tração em relação à sua resistência à compressão, e que em vigas de concreto armado o material que mais resiste a este esforço é o aço. No entanto, há uma pequena parcela de resistência à tração do material compósito, que contribui para viga suportar as solicitações de tração. No caso das vigas reparadas nestas séries, o colapso ocorreu com cargas próximas às das vigas monolíticas, com redução não significativa para as vigas da série E, e carga de ruptura ligeiramente superior para a viga H3.

O Gráfico 4.19 mostra que as vigas da série E tiveram cargas de ruptura

ligeiramente inferiores, o que, de acordo com os resultados anteriores, é justificado pela baixa aderência da ACQT e ACQU ao substrato. Neste caso, a solidariedade entre o reparo/substrato foi desfeita e a armadura de tração foi solicitada precocemente, ocasionando ruptura por deformação excessiva do aço. Dentre as vigas desta série, a E3 teve carga de ruptura superior à E1 e E2, provavelmente por ter sido confeccionada com ACQU, que possuía resistência mecânica maior do que a da ACQT (item 4.4.1, no tópico das discussões referentes às vigas D2 e D3 reparadas com ACQU). As vigas da série H tiveram cargas de ruptura bem próximas as da série B, sendo que a viga H3, reparada com AGT2, com resistência mecânica superior à da AGT1, superou a média das cargas da série B.

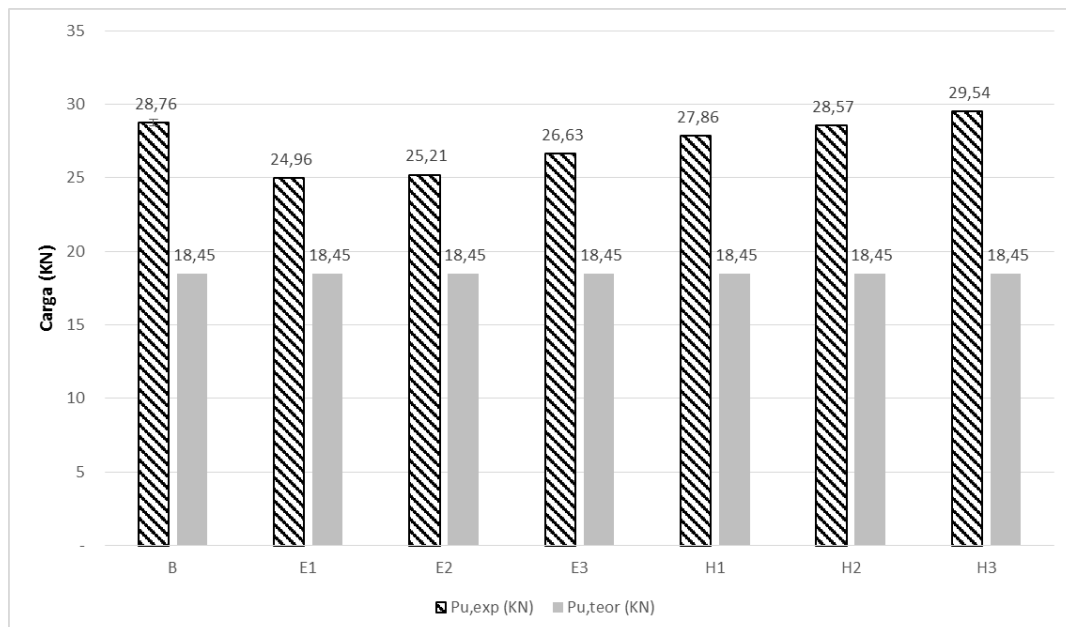


Gráfico 4.19 - Valores das cargas de ruptura teóricas e experimentais das vigas das séries B, E e H.

O Gráfico 4.20 apresenta as relações $P_{u,exp}/P_{u,teor}$, sendo notório que as cargas experimentais foram superiores às teóricas. A maior diferença foi de 60% da carga experimental comparada com a teórica para a viga H3. Em relação ao dimensionamento das cargas de ruptura das vigas destas séries ($P_{u,teor}$) a ABNT NBR 6118 (2014) mostrou-se a favor da segurança.

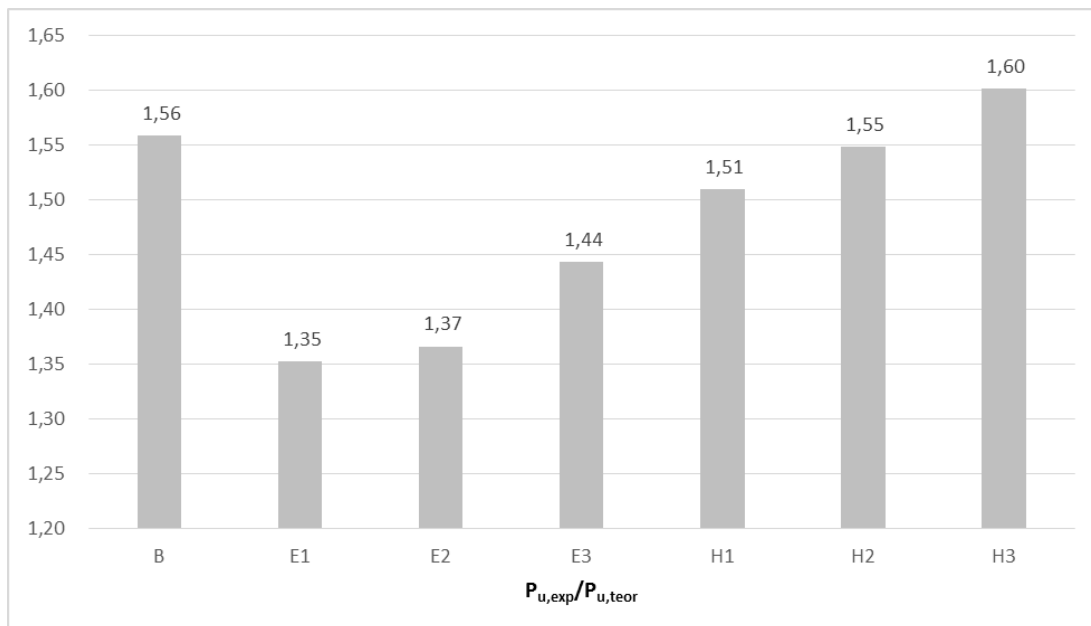


Gráfico 4.20 - Relação $P_{u,exp}/P_{u,teor}$ das vigas das séries B, E e H.

4.4.2.2. Carga versus flecha para as vigas das séries B, E e H

As curvas carga *versus* flecha mostradas no Gráfico 4.21 são resultado das leituras dos deslocamentos verticais do LVDT posicionado no meio dos vãos das vigas B1, E1, E3, H1 e H3. As curvas relativas às outras vigas destas séries encontram-se no anexo A.

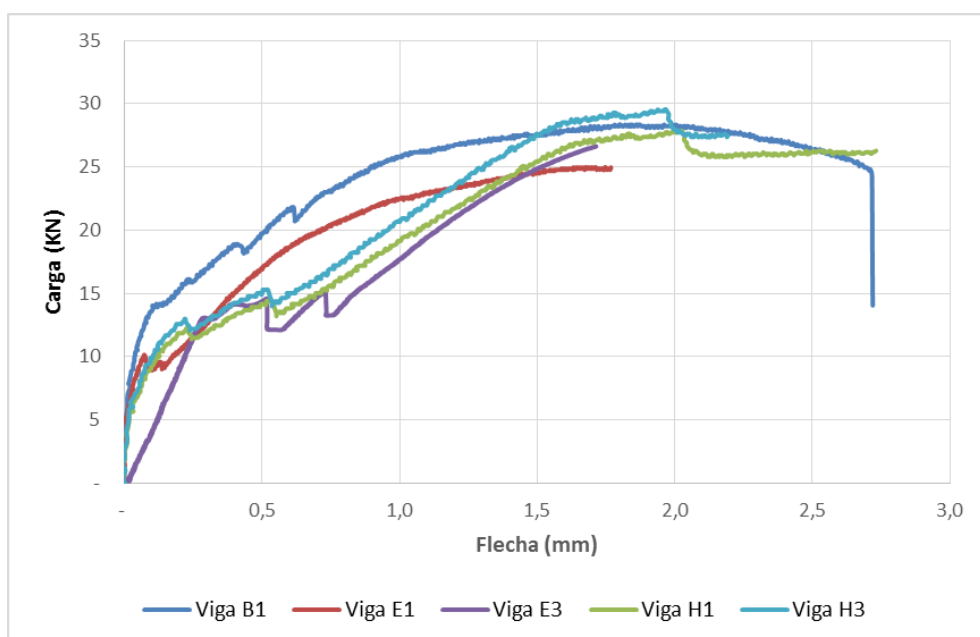


Gráfico 4.21- Curvas carga *versus* flecha das vigas das séries B, E e H.

De acordo com o Gráfico 4.22 (elaborado com os valores das flechas no ELU e com os valores das flechas teóricas), as vigas da série E foram as que tiveram as menores flechas, por terem rompido com as menores cargas. As vigas da série H tiveram as maiores flechas. Os cálculos utilizando as flechas teóricas confirmaram que o baixo módulo de elasticidade da AGT1 e AGT2 contribuíram para estes resultados. Em comparação com as vigas monolíticas da série B, as vigas da série E tiveram menores flechas, mesmo utilizando material mais deformável na região de tração. Porém, a reduzida aderência da ACQT e ACQU contribuiu para a carga de ruptura ligeiramente inferior destas vigas. Destaca-se que os valores das flechas teóricas foram próximos aos valores experimentais.

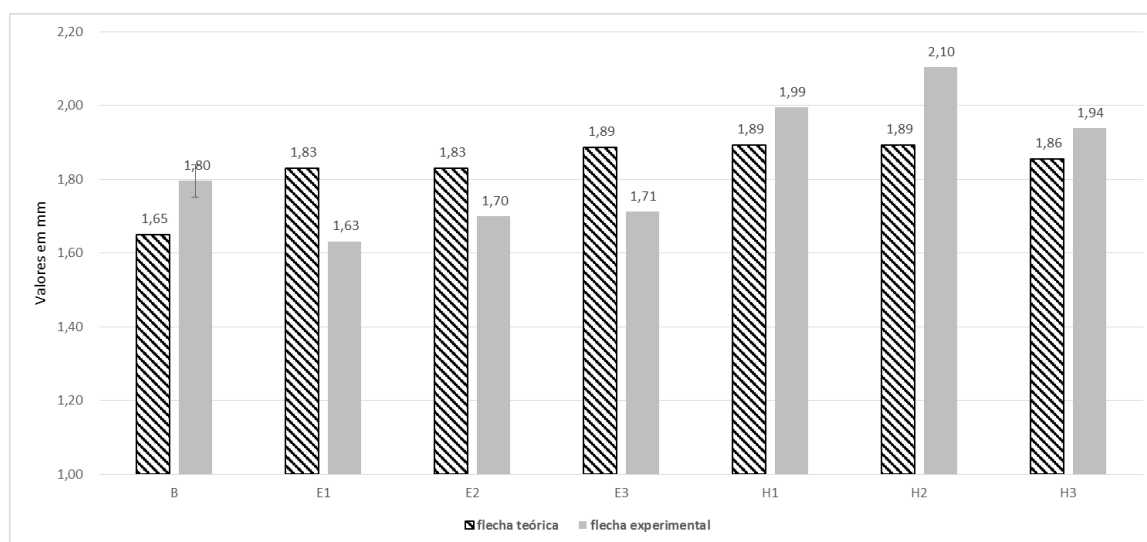


Gráfico 4.22 - Valores médios das flechas máximas das vigas da série B; e valores das flechas das vigas das séries E e H.

A fim de avaliar a ductilidade das vigas, o índice de ductilidade 1 (ID1) foi calculado, sendo a relação entre a flecha máxima e a carga de ruptura de cada viga. De acordo com o Gráfico 4.23, as vigas reparadas tiveram valores de ID1 maiores que as de referência. As vigas H1 e H2 possuem os mais altos ID1. Apesar das vigas da série E possuírem flechas máximas inferiores às da série B, seus ID1 foram mais elevados, pois a ACQT e ACQU são materiais mais deformáveis que o concreto convencional.

Altun (2004), Santos (2006), Simões (2007), Romero (2007) e Vaz (2013) calcularam o índice de ductilidade (δ_u/δ_y) para as vigas de suas pesquisas. Este índice

é a relação entre as flechas, no meio do vão, correspondentes às cargas últimas (δ_u) e de escoamento da armadura longitudinal de tração (δ_y). Este parâmetro é identificado no presente trabalho como índice de ductilidade 2 (ID2) e seus valores estão no Gráfico 4.24. Os resultados de ID1 e ID2 apontam as vigas da série H (reparadas com AGT1 e AGT2) como as mais dúcteis.

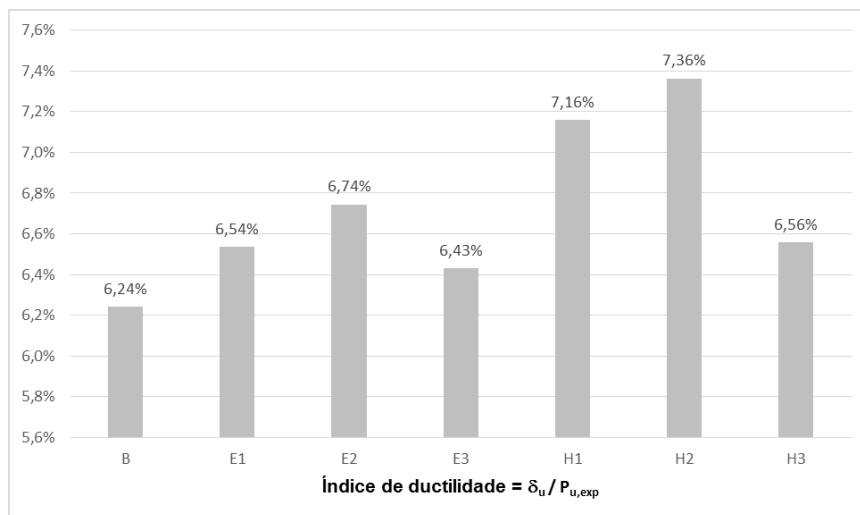


Gráfico 4.23 - Índice de ductilidade 1 das vigas das séries B, E e H.

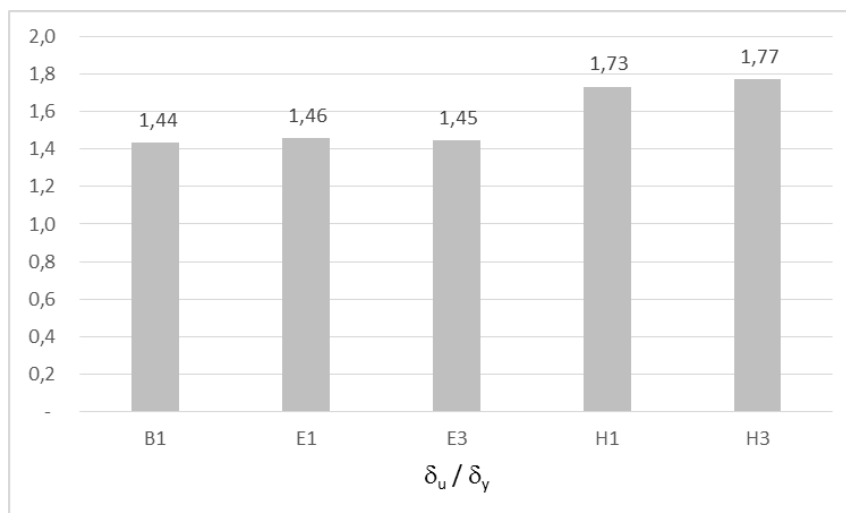


Gráfico 4.24 - Índice de ductilidade 2 das vigas das séries B, E e H.

4.4.2.3. Carga *versus* deformação na zona de compressão das vigas das séries B, E e H

O Gráfico 4.25 mostra as deformações na zona de compressão das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.

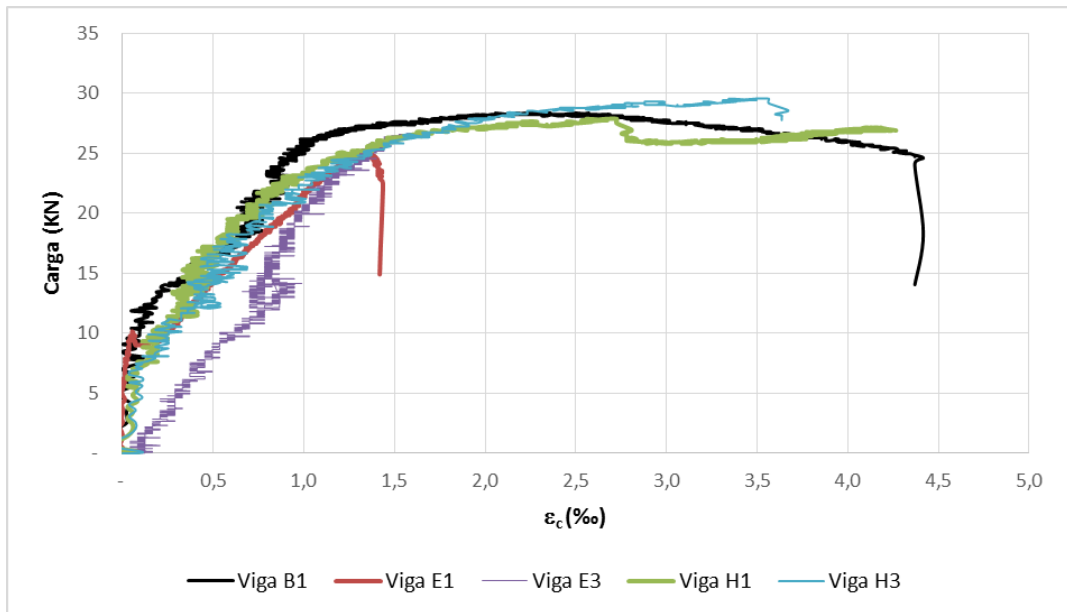


Gráfico 4.25 - Curvas carga *versus* deformação na zona de compressão das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.

Por meio do Gráfico 4.26, verifica-se que as maiores deformações na zona de compressão do concreto convencional ocorreram para as vigas H1 e H3. Os resultados são coerentes com os valores apresentados para as flechas no item anterior.

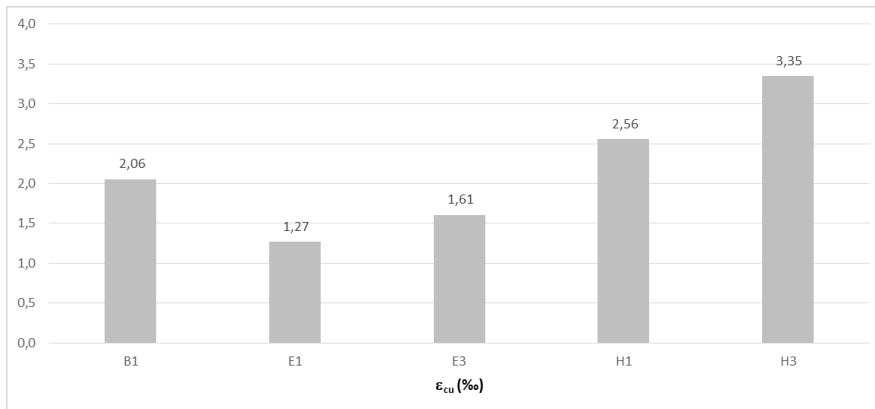


Gráfico 4.26 - Valores das deformações máximas (na zona de compressão) das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.

4.4.2.4. Carga versus deformação na armadura de tração das vigas das séries B, E e H

O Gráfico 4.27 mostra as deformações nas armaduras de tração das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.

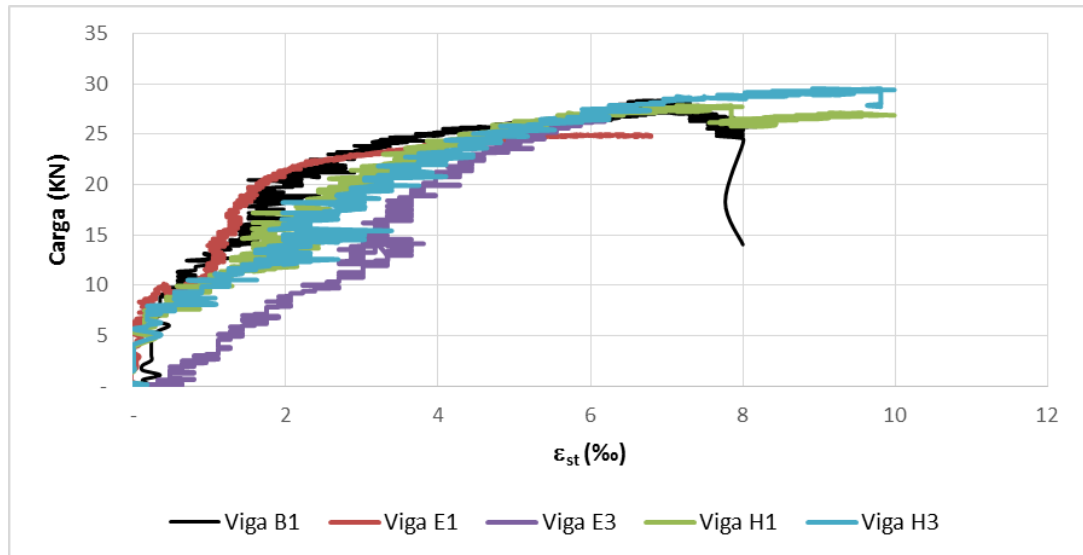


Gráfico 4.27 – Curvas carga versus deformação na armadura de tração das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.

Por meio do Gráfico 4.28, verifica-se que as maiores deformações na armadura de tração ocorreram para as vigas H1 e H3. Os resultados também são coerentes com os valores apresentados para as flechas no item anterior.

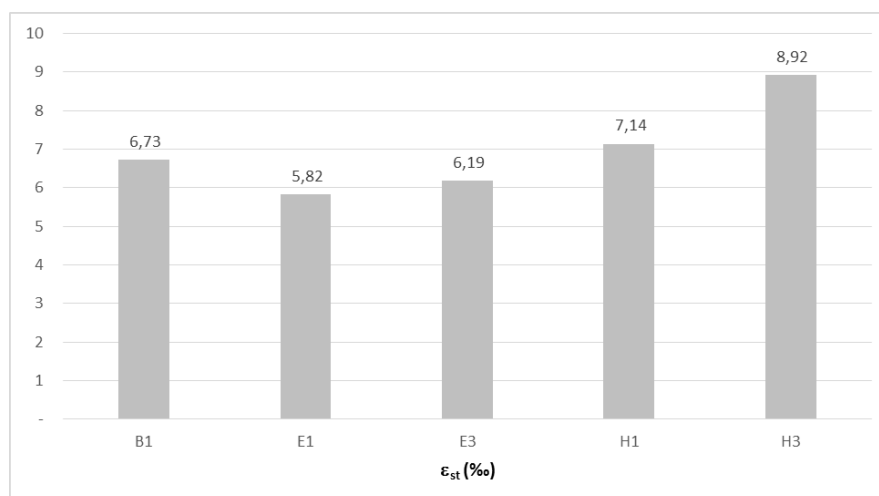


Gráfico 4.28 - Valores das deformações máximas (na armadura de tração) das vigas B1, E1, E3, H1 e H3.

4.4.2.5. Posição da linha neutra nas vigas das séries B, E e H

Com as deformações últimas nas zonas de compressão do concreto e nas armaduras de tração das vigas destas séries foi possível elaborar os Gráficos 4.29 e 4.30. O Gráfico 4.29 permite verificar que as linhas neutras das vigas E1 e E3 reparadas com ACQT e ACQU, respectivamente, subiram em relação à da B1, demonstrando que estas vigas tiveram menores capacidades resistentes que a viga de referência B1. Destaca-se que a viga E1 foi a menos resistente, pois foi reparada com a ACQT, argamassa com propriedades mecânicas inferiores às da ACQU utilizada na viga E3.

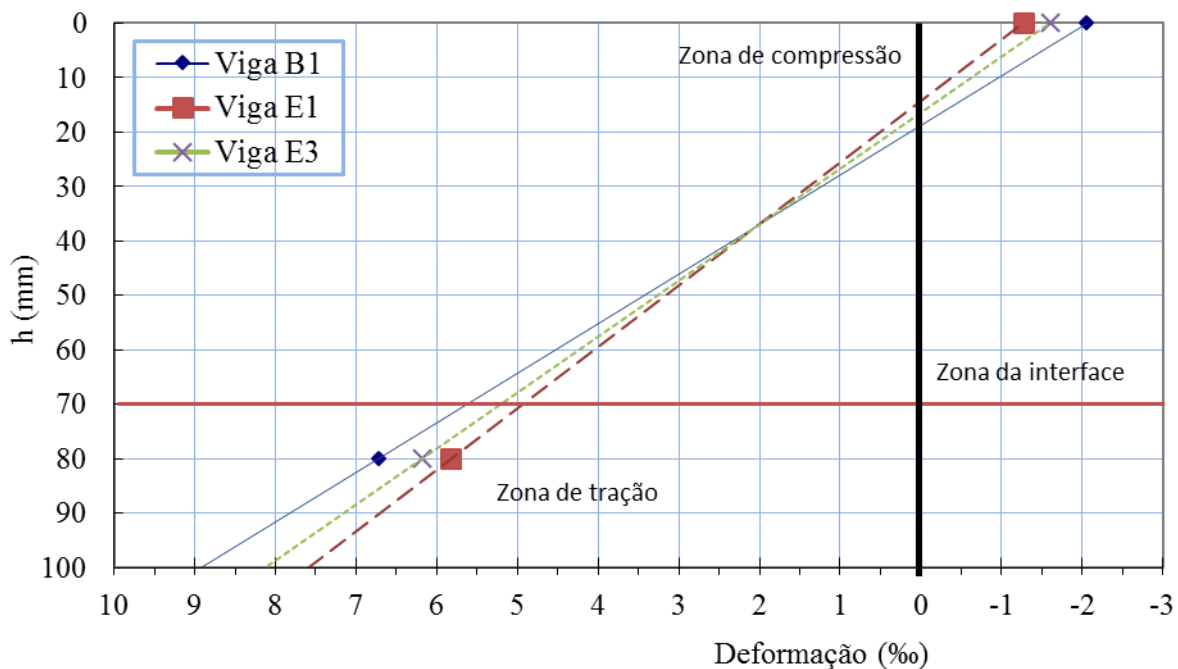


Gráfico 4.29 - Localização da linha neutra das vigas B1, E1 e E3 para as cargas últimas.

O Gráfico 4.30 permite verificar que as linhas neutras das vigas H1 e H3 reparadas com AGT1 e AGT2, respectivamente, desceram um pouco em relação à da B1, demonstrando que estas vigas foram discretamente reforçadas em relação à viga de referência B1.

Segundo Romero (2007) e Gallardo (2002), com adição de reforço, a linha neutra da viga abaixa. Não houve aumento ou diminuição consideráveis nas cargas de ruptura nas vigas recuperadas neste trabalho. No entanto, houve discreta mudança

na posição da linha neutra nas cargas últimas. Ranjbar *et al.* (2016) avaliou a altura da linha neutra e verificou que ela abaixou (nas cargas últimas) nas vigas compostas com concreto geopolimérico na zona de tração.

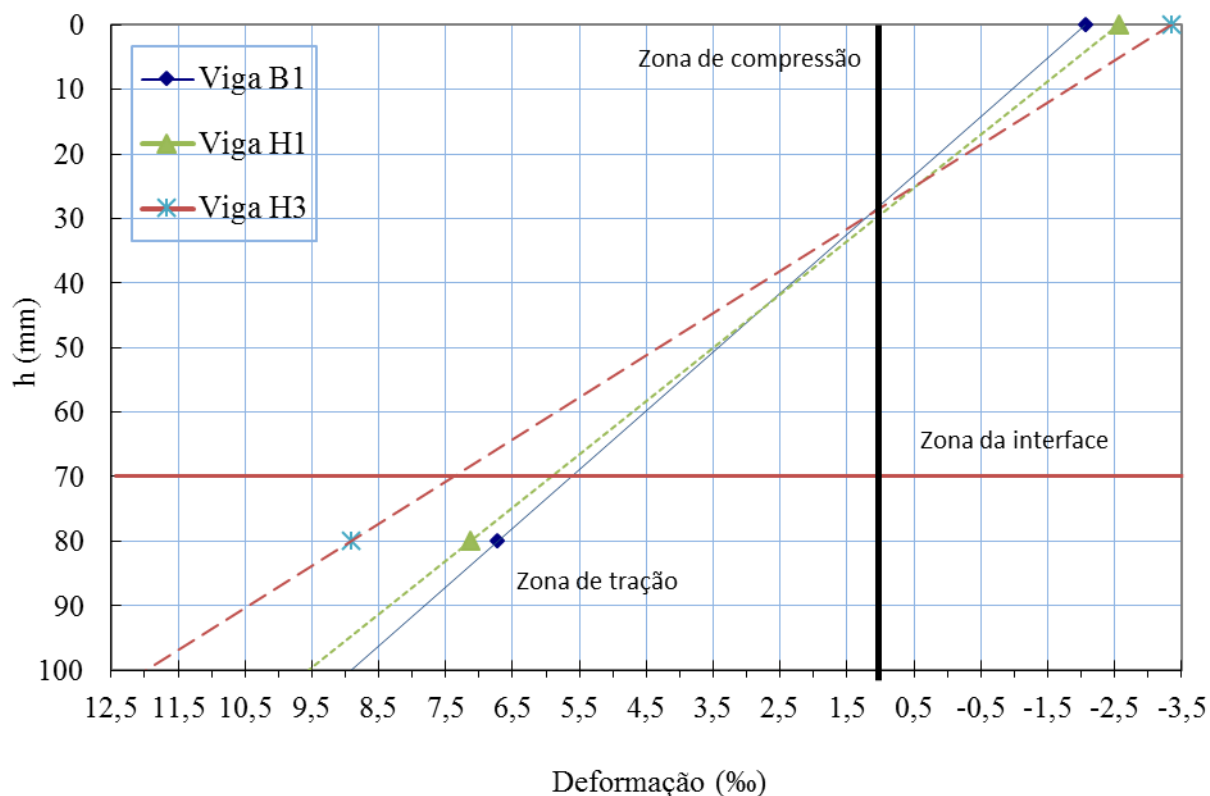


Gráfico 4.30 - Localização da linha neutra das vigas B1, H1 e H3 para as cargas últimas.

4.4.2.6. Momento de fissuração das vigas das séries B, E e H

Nas vigas das séries B e H, a primeira fissura foi detectada na zona de flexão após se atingir a carga aproximada de 13 kN. Fissuras de cisalhamento ocorreram acentuadamente na interface reparo/concreto nas vigas da série E (após a carga de 4 kN), confirmando os resultados de baixa aderência entre o concreto e a ACQT e a ACQU. Nas vigas H1 e H2 as fissuras ocorreram primeiramente (carga de 13 kN) na região de flexão e após a carga de 18 kN houve fissuração na interface reparo/substrato. Já na H3, a primeira fissura de flexão ocorreu quando a carga atingiu 15 kN. Nesta viga houve menos fissuração que nas da Série B e não houve fissuração na interface. Nas vigas H1 e H2 houve formação de fissuras de cisalhamento horizontal, refletindo a distribuição deste esforço ao longo da seção da interface,

porém ocorreram para uma carga superior (carga de 18 kN) às das vigas da série E.

O Gráfico 4.31 mostra os momentos de fissuração teóricos e experimentais. Nas vigas da série E, na E1 e na E2 o momento de fissuração ocorreu antes da viga E3.

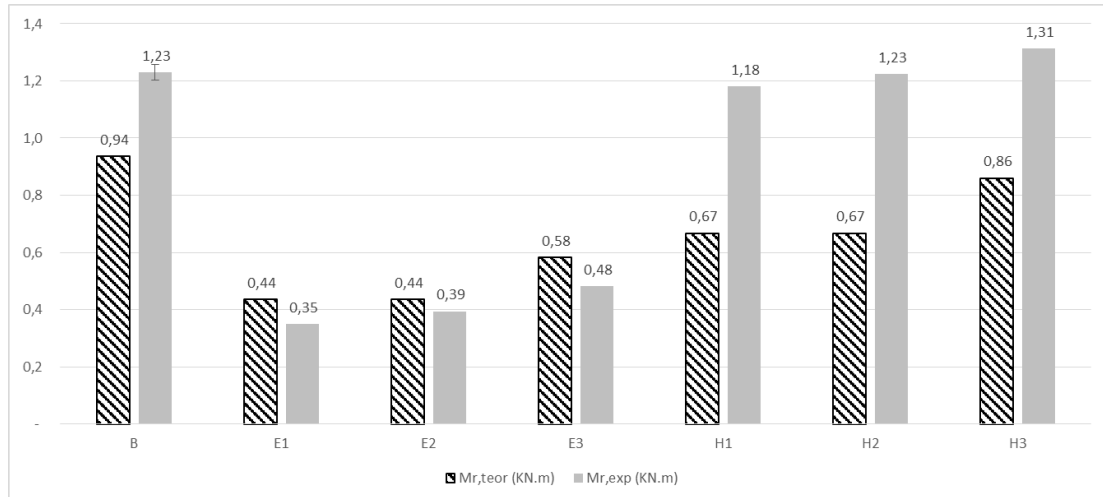


Gráfico 4.31 - Momentos de fissuração teóricos e experimentais.

4.4.2.7. Modo de ruptura das vigas das séries B, E e H

As vigas das séries B, E e H foram levadas ao colapso por deformação excessiva do aço, e não houve esmagamento do concreto. As Figuras 4.8 a 4.10 mostram estas vigas após o colapso.



a



b



c

Figura 4.8 - Vigas da série B após ruptura.



a



b



c

Figura 4.9 - Vigas da série E após ruptura.

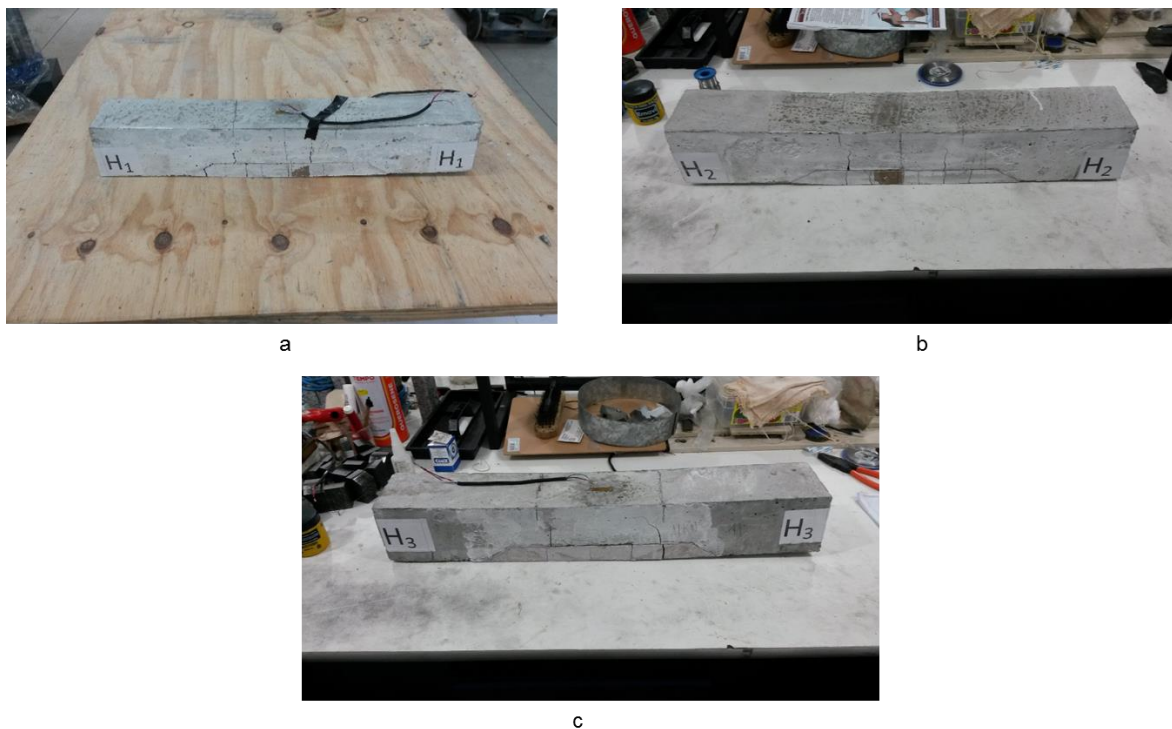


Figura 4.10 - Vigas da série H após ruptura.

4.4.3. Vigas das séries C, F e I

As vigas das séries C, F e I foram confeccionadas com armadura de flexão usando barras de aço lisas CA-25 e $\phi 6,3$ mm. Os detalhes da armadura dessas vigas estão no item 3.2.1. Os corpos de prova da série C eram monolíticos (sem reparo), os da série F receberam reparo com ACQT e com ACQU e os da série I foram recuperados com AGT1 e AGT2. Os resultados da série C são, em sua maioria, valores médios, por possuírem 3 vigas com mesmas características. Já os das séries F e I foram mostrados individualmente por possuírem 3 corpos de prova, sendo um deles com características diferentes. As especificidades das vigas estão descritas no item 3.12.3.6.

4.4.3.1. Carga de ruptura das vigas das séries C, F e I

Por meio do Gráfico 4.32 é possível observar que todas as vigas obtiveram carga de ruptura experimental muito superior às teóricas, diferentemente das vigas das séries A, B, D, E, G e H, que obtiveram cargas teóricas próximas às experimentais. Não foi encontrado nenhum fator nos cálculos teóricos que pudesse justificar essa

discrepância. No entanto, a utilização de barras lisas como armadura longitudinal de flexão não é convencional, podendo haver algum fenômeno desconhecido que levou a valores teóricos e experimentais tão diferentes. Esta discrepância também ocorreu para os valores das flechas teóricas e experimentais.

Mantendo o mesmo padrão de comportamento das vigas das séries A, B, D, E, G e H, as vigas das séries C e I foram as que tiveram comportamento mecânico mais semelhante, com desempenho pouco superior das vigas I reparadas com AGT1 e AGT2. O Gráfico 4.32 mostra que o maior valor de carga de ruptura ocorreu na viga I3 reparada com AGT2. As vigas da série D tiveram as menores cargas no colapso. Como foi amplamente abordado anteriormente, a aderência da ACQT e da ACQU levaram à perda de aderência entre as argamassas e o substrato, ocasionando ruptura precoce das vigas.

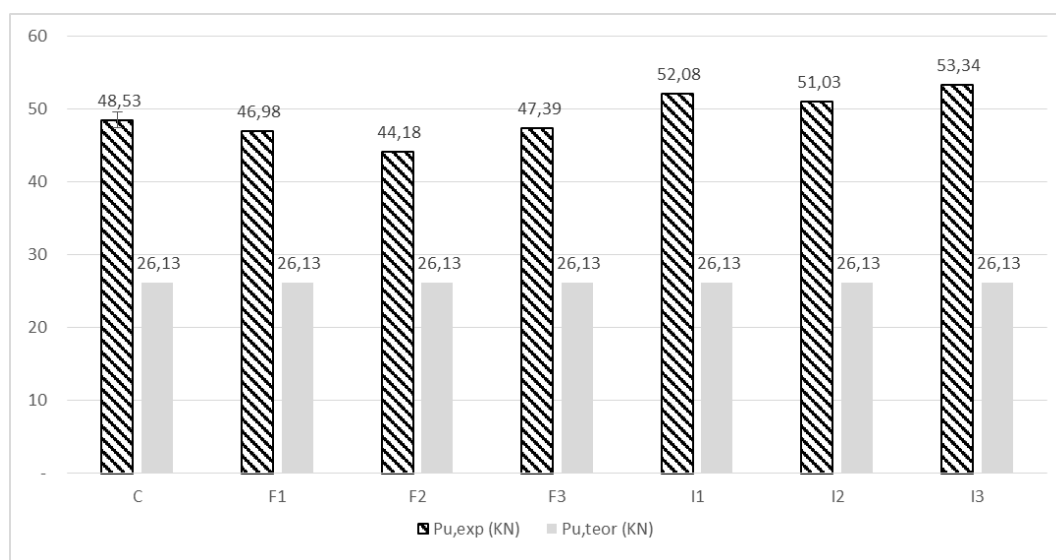


Gráfico 4.32 - Cargas de ruptura teóricas e experimentais.

O Gráfico 4.33 mostra que a viga I3 apresentou a maior relação entre a carga experimental e a teórica, com todas as vigas das séries com valores muito a favor da segurança, o que leva a crer que as equações utilizadas no cálculo teórico para barras lisas de aço são muito conservadoras (a favor da segurança).

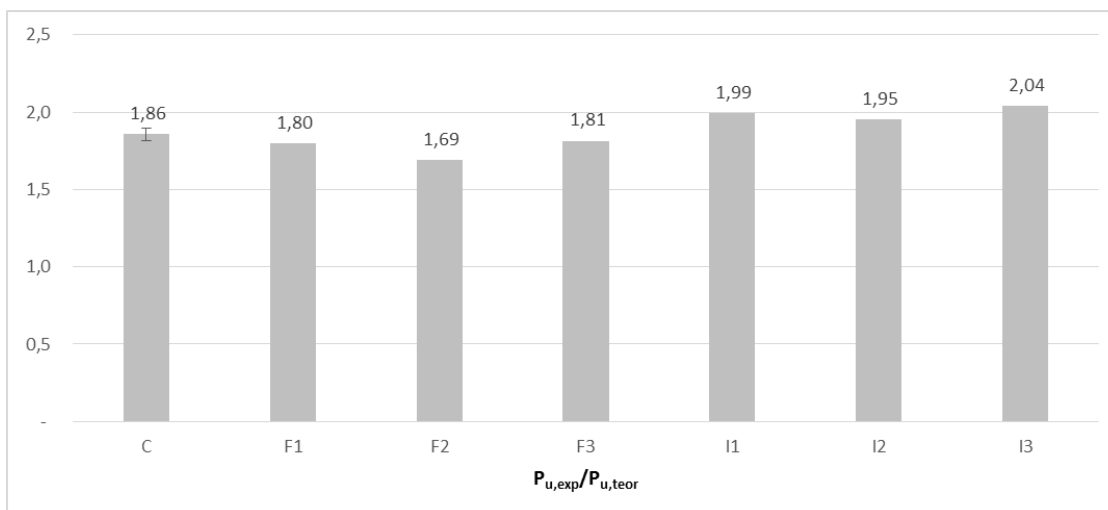


Gráfico 4.33 - Relação $P_{u,exp}/P_{u,teor}$ das séries C, F e I.

4.4.3.2. Carga versus flecha das vigas das séries C, F e I

As curvas de carga *versus* flecha mostradas no Gráfico 4.34 são resultados das leituras dos deslocamentos verticais do *LVDT* posicionado no meio do vão livre das vigas C1, F1, F3, I1 e I3. As curvas referentes às outras vigas destas séries são apresentadas no Anexo A.

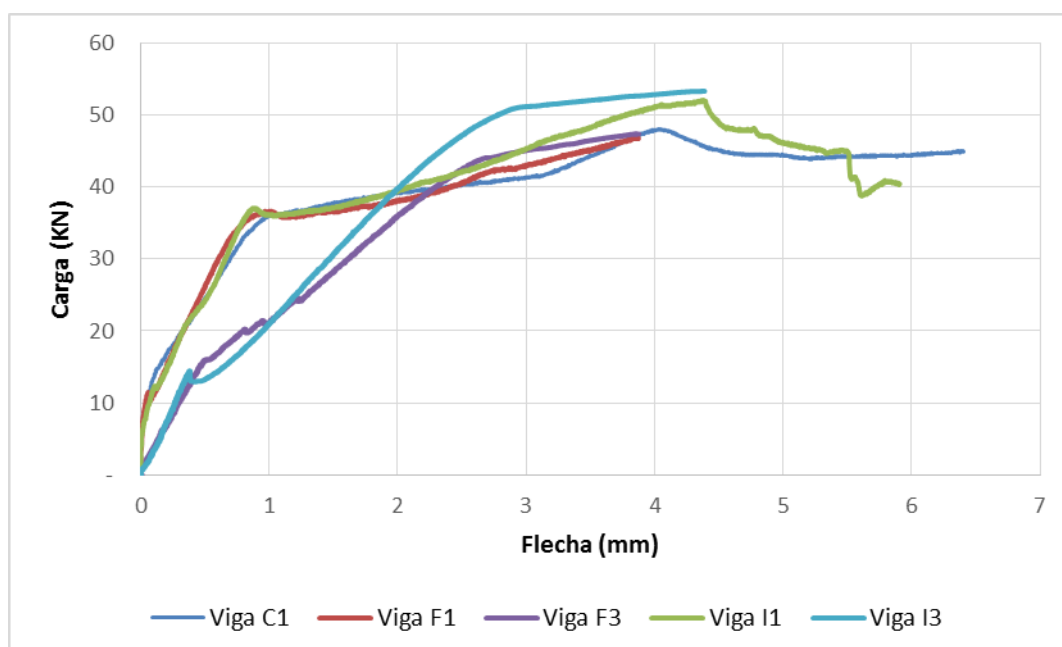


Gráfico 4.34 - Curvas carga *versus* flecha das vigas das séries C, F e I.

De acordo com o Gráfico 4.35, as maiores flechas ocorreram nas vigas da série I, por terem sido reparadas com AGT1 e AGT2, argamassas que possuíam os menores módulos de elasticidade entre as argamassas de reparo. As vigas da série F tiveram as menores flechas por causa das menores cargas de ruptura.

Semelhantemente ao que foi feito para as vigas das séries B, E e H, o ID1 e o ID2 foram calculados e são mostrados nos Gráficos 4.36 e 4.37, respectivamente. De acordo com estes gráficos, as vigas mais dúcteis foram as da série I.

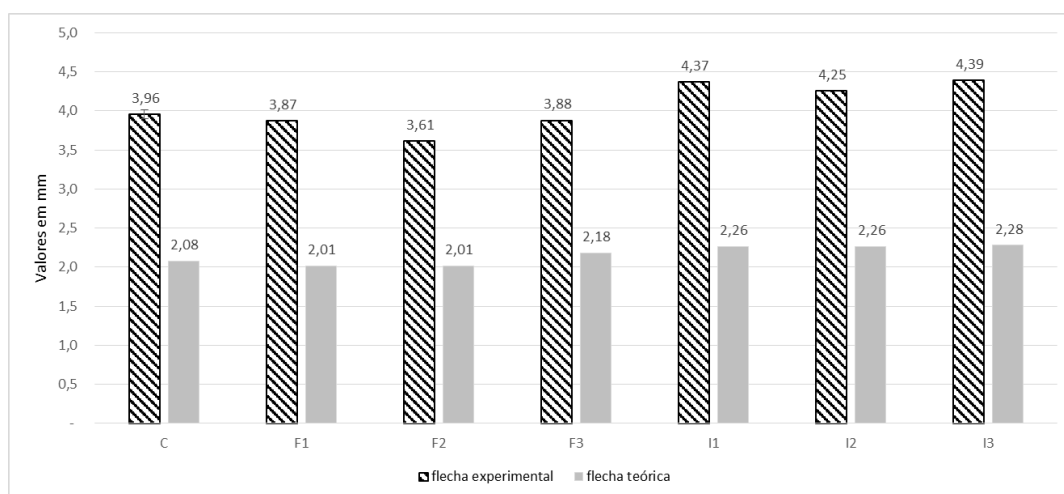


Gráfico 4.35 - Valores médios das flechas máximas das vigas da série C; e valores das flechas das vigas das séries F e I.

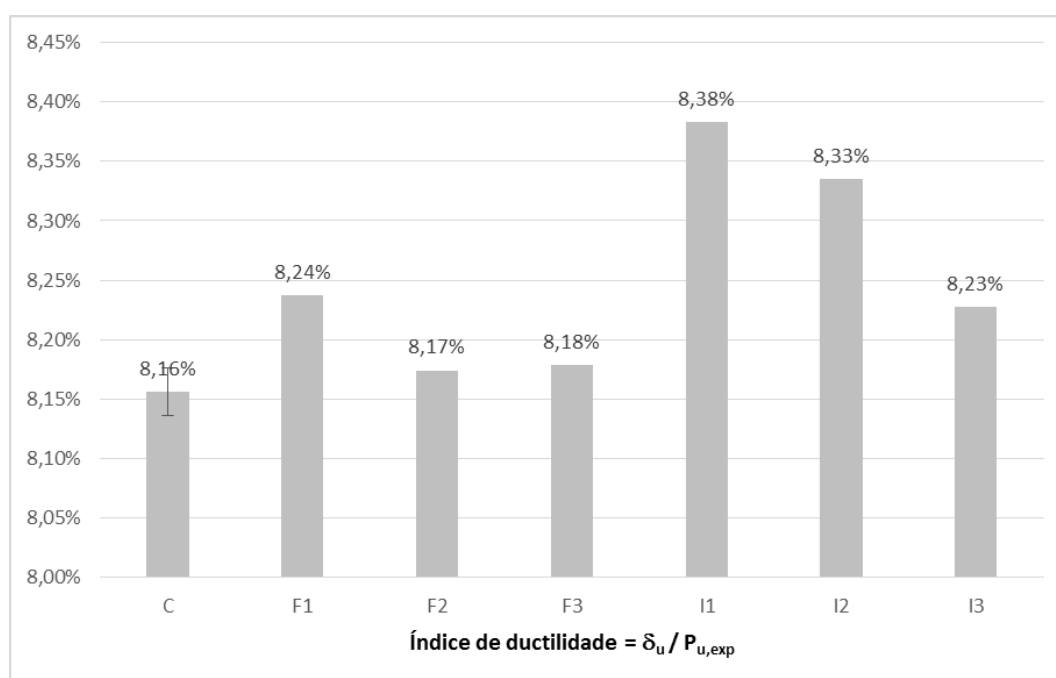


Gráfico 4.36 - Índice de ductilidade 1 das vigas das séries C, F e I.

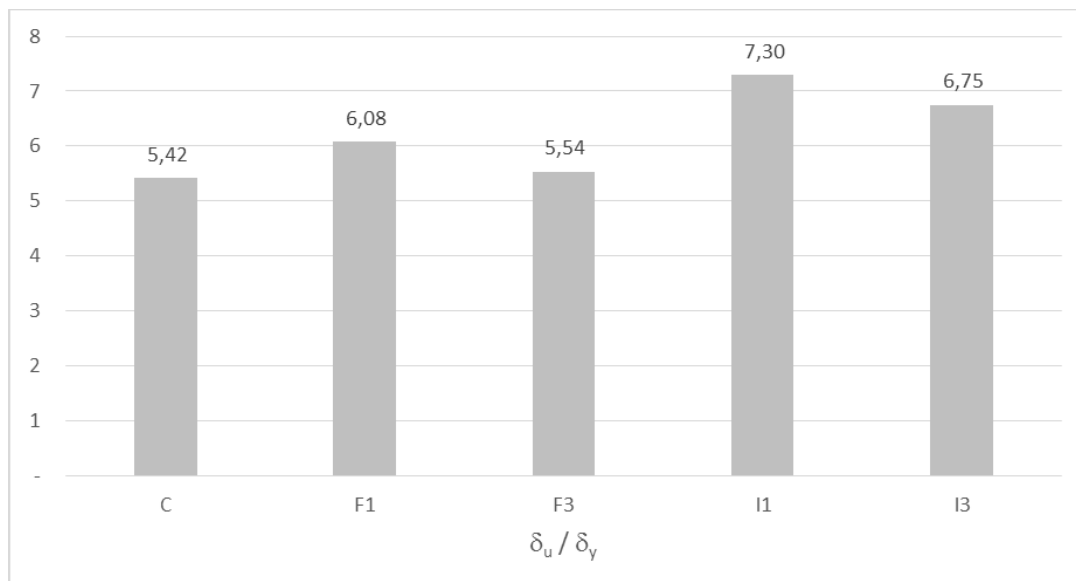


Gráfico 4.37 - Índice de ductilidade 2 das vigas das séries C, F e I.

4.4.3.3. Carga versus deformação na zona de compressão das vigas das séries C, F e I

O Gráfico 4.38 mostra as deformações na zona de compressão das vigas C1, F1, F3, I1 E I3.

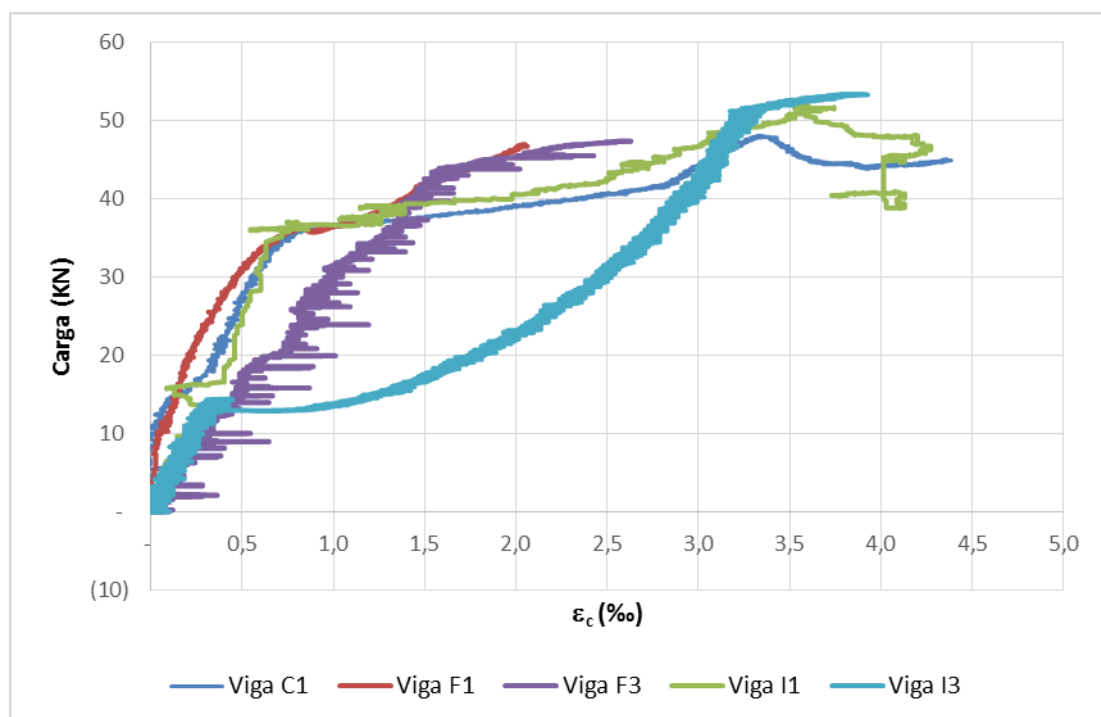


Gráfico 4.38 - Curvas carga versus deformação na zona de compressão das vigas C1, F1, F3, I1 E I3.

Com base no Gráfico 4.39, é possível verificar que as maiores deformações na zona de compressão do concreto convencional ocorreram para as vigas I1 e I3. Os resultados são coerentes com os valores das flechas do item anterior.

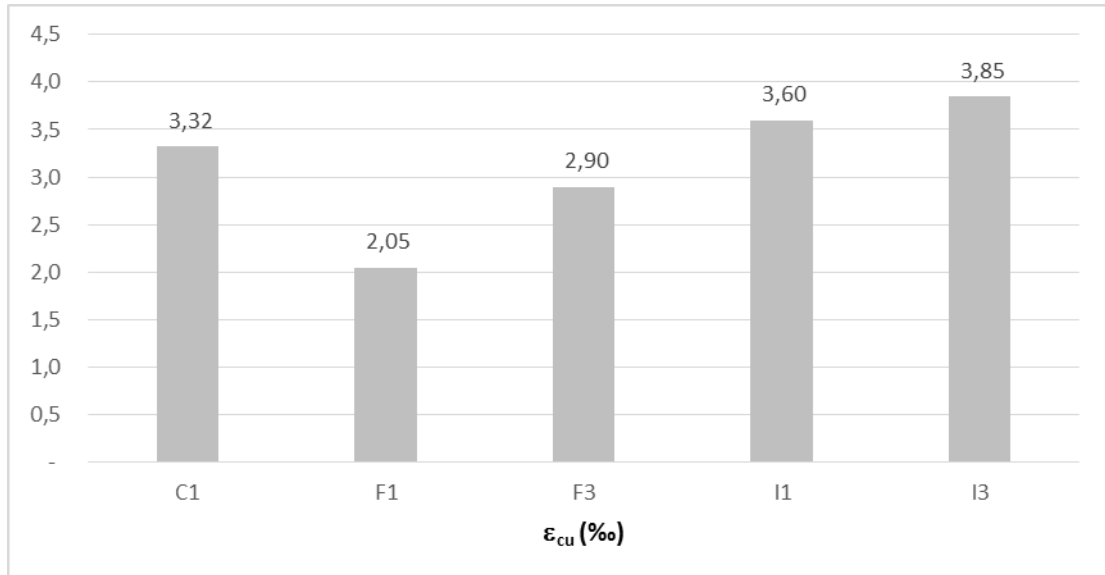


Gráfico 4.39 - Valores das deformações máximas (na zona de compressão) das vigas C1, F1, F3, I1 e I3.

4.4.3.4. Carga *versus* deformação na armadura de tração das vigas das séries C, F e I

O Gráfico 4.40 mostra as deformações na armadura de tração das vigas C1, F1, F3, I1 e I3.

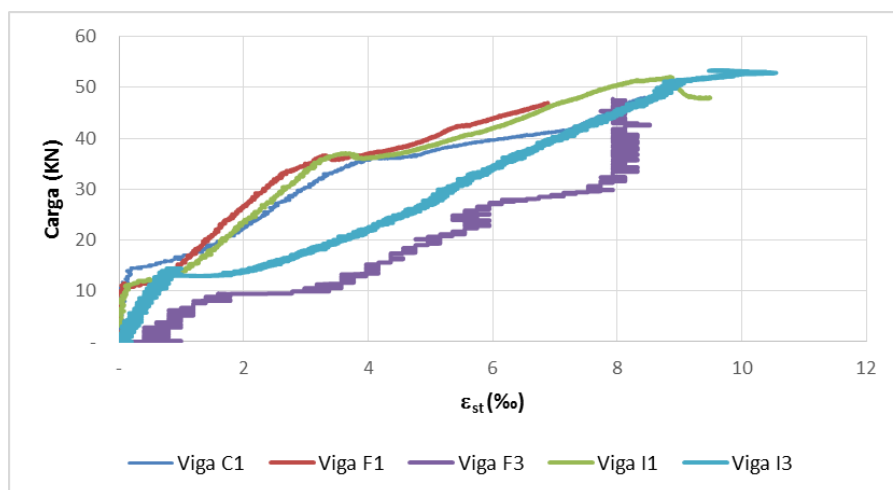


Gráfico 4.40 - Curvas carga *versus* deformação na armadura de tração das vigas C1, F1, F3, I1 e I3.

Do Gráfico 4.41 verifica-se que as maiores deformações na armadura de tração ocorreram para as vigas I1 e I3. Os resultados são coerentes com os valores das flechas do item anterior.

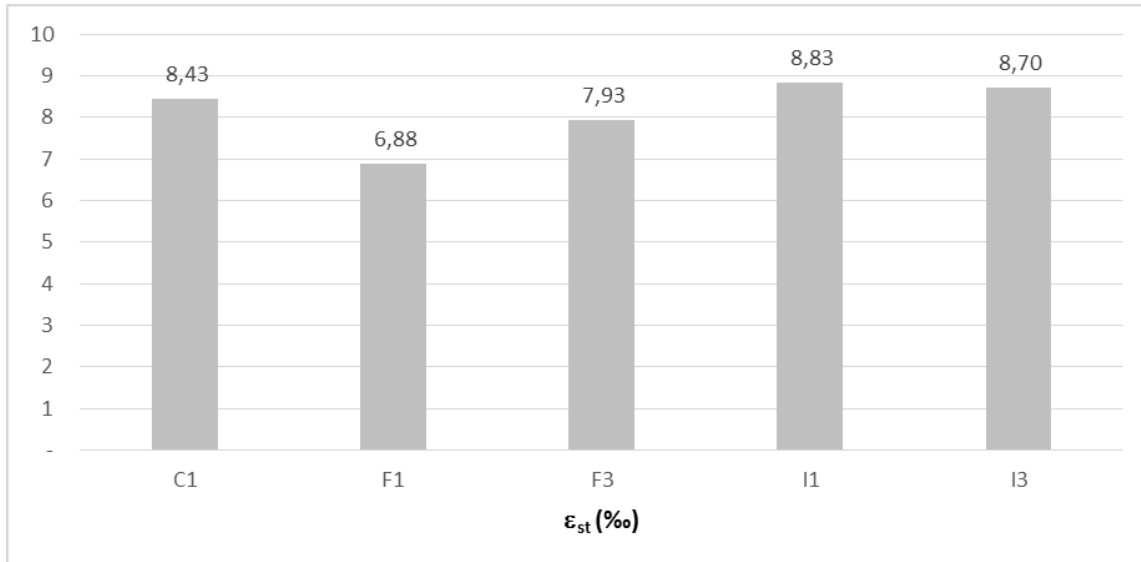


Gráfico 4.41 - Valores das deformações máximas na armadura de tração das vigas C1, F1, F3, I1 e I3.

4.4.3.5. Posição da linha neutra nas vigas das séries C, F e I

Com os dados das deformações últimas nas zonas de compressão do concreto e das armaduras de tração das vigas destas séries, foi possível elaborar os Gráficos 4.42 e 4.43. O Gráfico 4.42 permite verificar que as linhas neutras das vigas F1 e F3 reparadas com ACQT e ACQU, respectivamente, ficaram mais altas que a da C1, indicando que estas vigas tiveram menores resistências mecânicas que a viga de referência. Destaca-se que a viga F1 foi a menos resistente, pois foi reparada com a ACQT, de propriedades mecânicas inferiores à ACQU utilizada na viga F3.

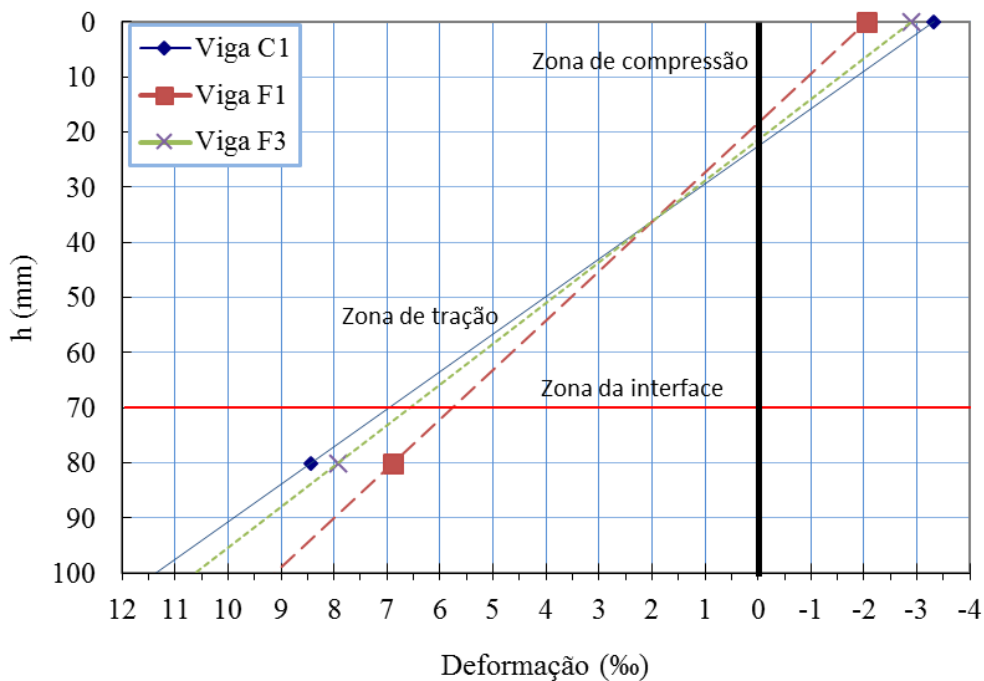


Gráfico 4.42 - Localização da linha neutra das vigas C1, F1 e F3 para as cargas últimas.

O Gráfico 4.43 permite verificar que as linhas neutras das vigas I1 e I3 reparadas com AGT1 e AGT2, respectivamente, ficaram mais baixas que a da C1, demonstrando que estas vigas foram discretamente reforçadas em relação à viga de referência.

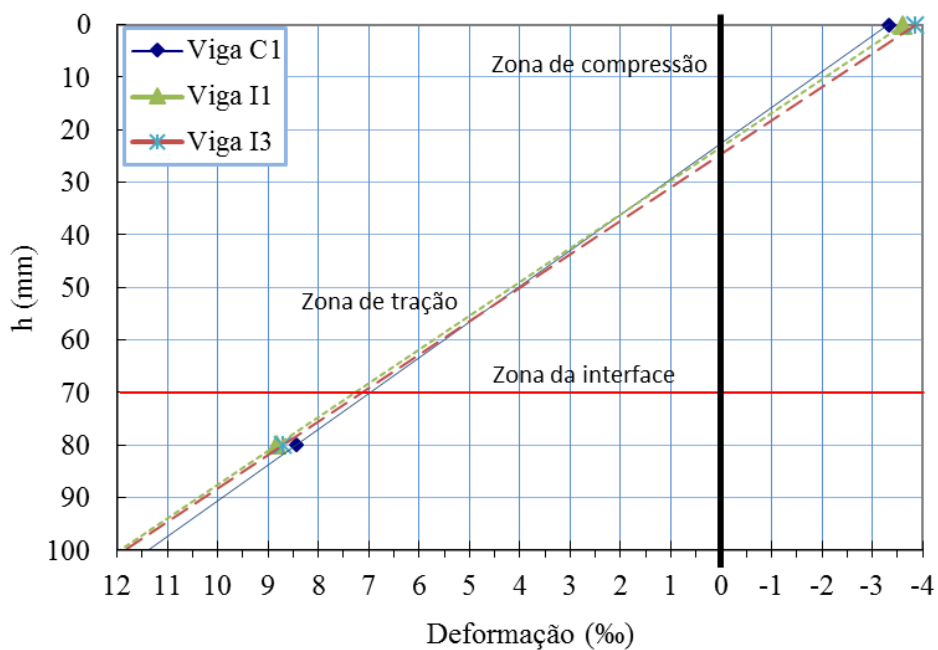


Gráfico 4.43 - Localização da linha neutra das vigas C1, I1 e I3 para as cargas últimas.

4.4.3.6. Momento de fissuração das vigas das séries C, F e I

A norma ABNT NBR 6118 (2014) preconiza que para vigas que utilizam barras lisas na armadura de flexão, o momento de fissuração teórico deve ser dividido por 2. Apesar de não haver explicação na norma para este procedimento de cálculo, deduz-se que ele tenha relação com a menor aderência das barras lisas ao concreto convencional do que as barras nervuradas, ocasionando menor valor de $M_{r,teor}$ para barras lisas em relação às barras nervuradas. Este procedimento foi adotado neste trabalho.

Nas vigas da série C, a primeira fissura de flexão ocorreu na carga de aproximadamente 7 kN. Ao se atingir a carga de 15 kN, a fissuração tornou-se mais acentuada. A primeira fissura nas vigas da série F ocorreu entre 3 kN a 4 kN, na região da interface reparo/substrato. Após atingir 10 kN, a fissuração ocorreu acentuadamente na interface reparo/concreto, confirmando os resultados de baixa aderência entre concreto e a ACQT ou a ACQU. Nas vigas da série I, as fissuras ocorreram na região de flexão (AGT1 e AGT2) entre 9 kN e 12 kN, e se propagaram para o concreto. Após atingir 17 kN, houve fissuração na interface reparo/concreto.

O Gráfico 4.44 mostra os momentos de fissuração teóricos e experimentais destas séries. Nas vigas da série I o momento de fissuração ocorreu com valores experimentais 150% superiores aos de cálculo. De acordo com este gráfico é possível afirmar que a divisão por 2 imposta pela norma para barras de aço lisas não se aplica às argamassas geopoliméricas usadas neste trabalho, o que demonstra a boa aderência destes materiais à estas barras de aço.

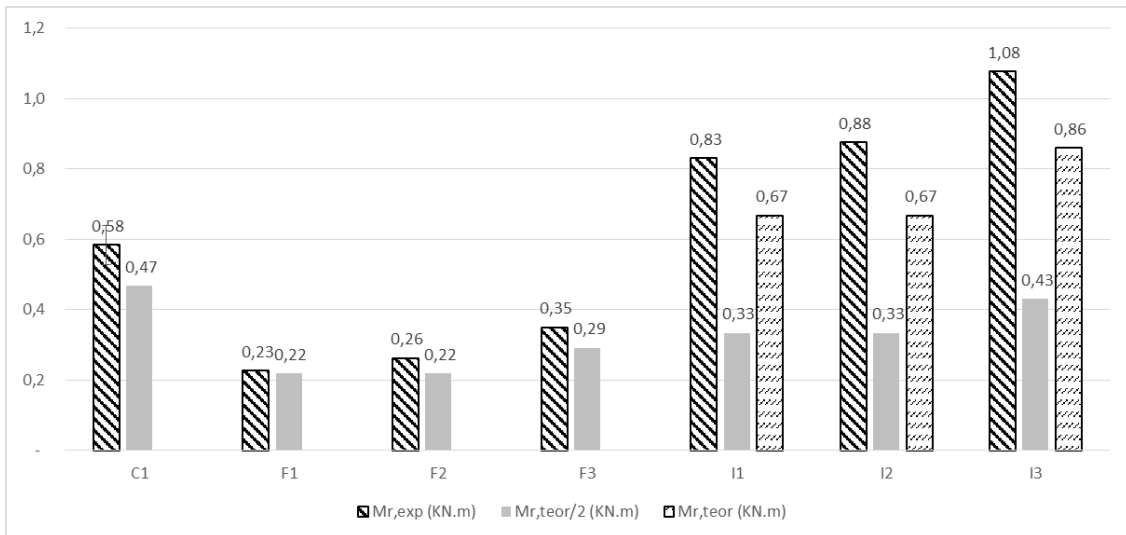


Gráfico 4.44 - Relação entre os momentos de fissuração experimentais e teóricos das séries C, F e I.

4.4.3.7. Modo de ruptura das vigas das séries C, F e I

As vigas das séries C, F e I foram levadas ao colapso por escoamento da armadura longitudinal de tração, seguido do esmagamento do concreto na região de momento fletor máximo. As Figuras 4.11 a 4.13 mostram a forma de ruptura destas vigas.

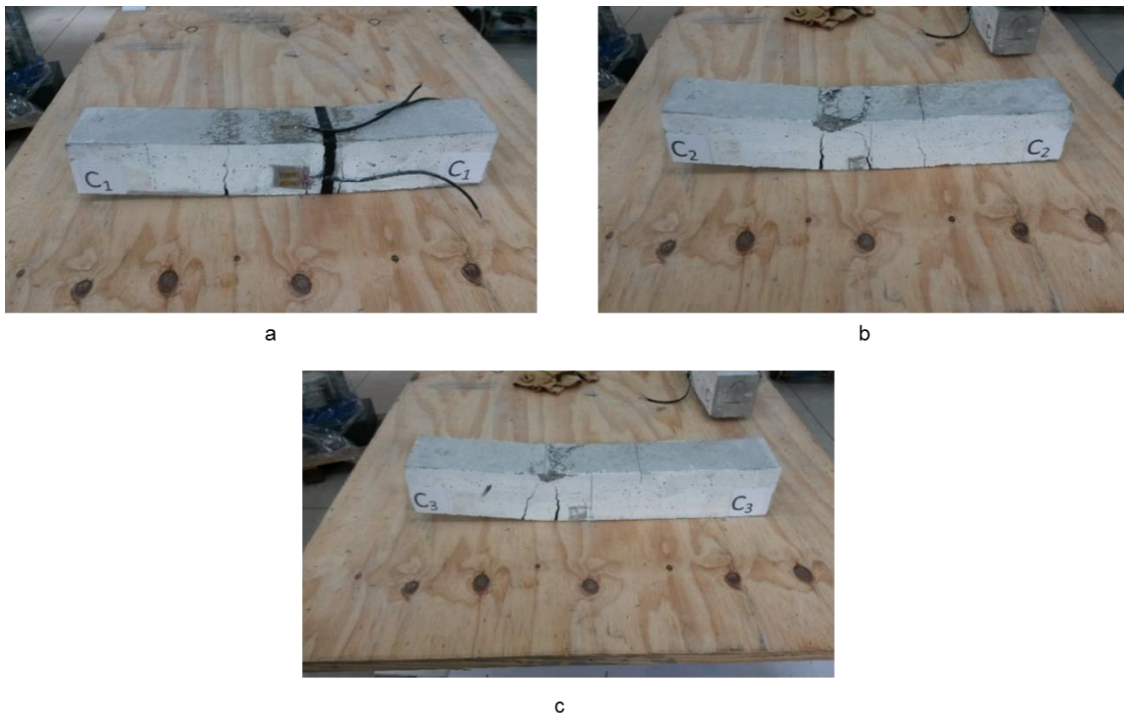


Figura 4.11 - Vigas da série C após colapso.



a



b



c

Figura 4.12 - Vigas da série F após colapso.



a



b



c

Figura 4.13 - Vigas da série I após colapso.

A Figura 4.14a mostra o momento em que a viga I2 sofre ruptura. A Figura 4.14b mostra a deformação excessiva do aço após a ruptura.



Figura 4.14 - (a) Momento da ruptura da viga I2; (b) deformação excessiva do aço após a ruptura da viga I2.

4.4.4. Resultados das vigas em serviço

Para verificar os valores de deslocamentos verticais e das deformações das vigas em serviço, foram anotados os dados para os carregamentos referentes a 60% dos valores das cargas últimas de cada viga.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), a flecha máxima permitida ($L/250$) de acordo com a aceitabilidade sensorial deve ser igual a 2,6 mm. Os dados mostrados nas Tabelas 4.14 e 4.15 indicam que todas as vigas não ultrapassaram o limite de deflexão permitido pela norma.

Tabela 4.14 - Flechas e deformações das vigas das séries B, E e H à 60% da carga de ruptura.

Vigas	$P_{60\%}$ (kN)	$\delta_{60\%}$ (mm)	$\epsilon_{c60\%}$ (‰)	$\epsilon_{st60\%}$ (‰)
B1	17,22	0,29	0,63	1,62
E1	14,98	0,39	0,54	1,22
E3	15,98	0,49	0,87	3,33
H1	16,71	0,66	0,44	2,43
H3	17,72	0,67	0,58	3,03

Tabela 4.15 - Flechas e deformações das vigas das séries C, F e I à 60% da carga de ruptura.

Vigas	$P_{60\%}$ (kN)	$\delta_{60\%}$ (mm)	$\epsilon_{c60\%}$ (‰)	$\epsilon_{st60\%}$ (‰)
C1	28,85	0,66	0,53	2,76
F1	28,19	0,57	0,41	2,15
F3	28,44	0,72	0,94	3,94
I1	31,25	0,69	0,59	2,81
I3	32,01	0,84	2,62	4,89

4.4.5. Comparação entre as séries (E e H) e (F e I)

Neste item são feitas algumas comparações entre os valores das resistências à tração na flexão ($f_{ct,f}$, obtida pela Equação 12) entre as séries com armadura de tração CA-60, barra nervurada de $\phi 4,2$ mm (séries E e H) e com armadura de tração CA-25, barra lisa de $\phi 6,3$ mm (séries F e I).

O Gráfico 4.45 mostra os resultados das resistências $f_{ct,f}$ e o Gráfico 4.46 os resultados de $f_{ct,f}/\phi$ de todas as vigas armadas. De acordo com estes gráficos, as vigas das séries F e I foram mais resistentes que às das séries E e H.

É importante destacar que os valores de cálculo das cargas de ruptura e das flechas foram muito diferentes dos experimentais para as séries C, F e I. Já para as séries B, E e H foram mais semelhantes. Como a ABNT NBR 6118 (2014) sugere a utilização de CA-50 para armadura de flexão e há escassez de estudos para os aços utilizados neste trabalho, é possível sugerir que as equações para cálculos teóricos são mais apropriadas para aços nervurados. Além disso, pode haver outras variáveis que influenciam os resultados e que não sejam previstas nas formulações das normas.

Quanto à aderência, para todas as séries, foi possível verificar que os resultados foram mais satisfatórios para as vigas recuperadas com a AGT1 e a AGT2. O que pode ser explicado através das micrografias obtidas por MEV (item 3.11.4) que mostram a argamassa comercial visualmente mais porosa que as argamassas geopoliméricas e a interface homogênea entre AGT1/substrato.

Como a região do reparo é o local em que as armaduras de flexão são mais solicitadas, as argamassas de reparo pouco contribuíram para aumentar a capacidade portante das vigas. No entanto, as vigas reparadas com a ACQT e a ACQU mostraram pequena redução da capacidade portante das vigas, enquanto que as reparadas com a AGT1 e a AGT2 fizeram com que as vigas se comportassem como as vigas monolíticas de referência.

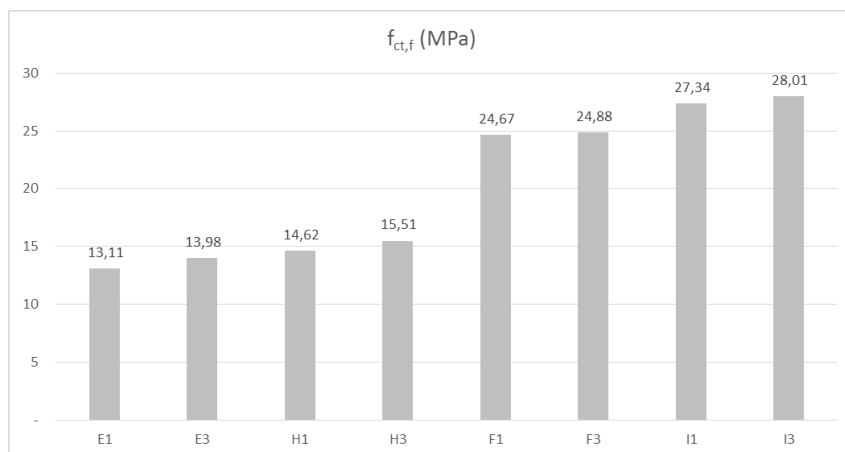


Gráfico 4.45 - Resistências à tração na flexão das vigas das séries E, H, F e I.

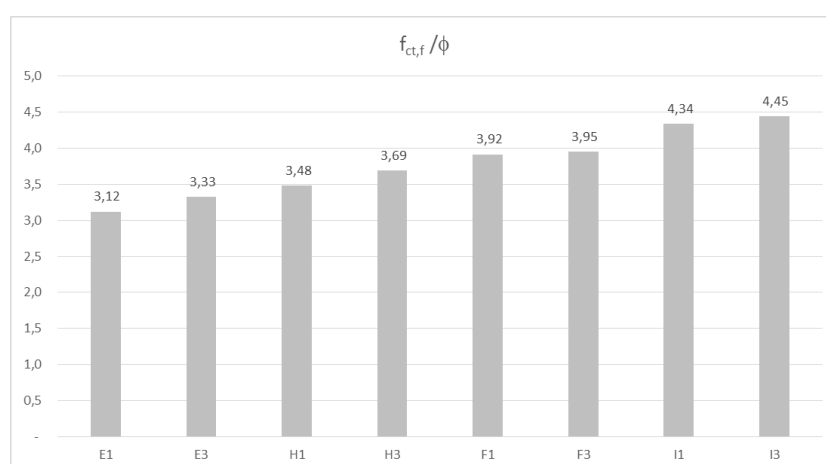


Gráfico 4.46 - Resistências à tração na flexão das vigas das séries E, H, F e I normalizadas em função do diâmetro das barras de aço das vigas de concreto armado.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Diferentes ensaios foram realizados neste trabalho a fim de verificar a eficiência de argamassas geopoliméricas (AGT1, com metacaulim e cimento Portland, e AGT2, com metacaulim e sem cimento Portland) no reparo de estruturas de concreto, com e sem armadura. Os principais resultados obtidos no programa experimental permitiram concluir:

- por meio da ruptura de corpos de prova mistos (sem armadura) foi possível determinar a resistência de aderência à tração na flexão. Verificou-se que a aderência da série CG (metade substrato de concreto convencional mais metade AGT1) foi 21% superior à da série CQ (metade substrato mais metade ACQT, argamassa comercial curada à temperatura ambiente). Já para a série CCG (duas metades de concreto convencional coladas com AGT1) a aderência foi 13% superior à da série CCQ (duas metades de concreto convencional coladas com ACQT);
- em relação aos materiais e aços usados, por meio do ensaio de tirantes, foi possível verificar que a aderência entre a AGT2 e o aço CA-60 (barra nervurada), bem como entre ela e o aço CA-25 (barra lisa), foram superiores em relação ao substrato e à ACQT, tanto para a formulação de Castro (2000) quanto para a de Silva (2015);
- nos ensaios de tração na flexão a quatro pontos e resistência de aderência ao cisalhamento, as vigas da série G (substrato sem aço e com reparo de AGT1) tiveram o mesmo comportamento das vigas da série A (referência, vigas monolíticas, ou seja, substrato sem aço e sem reparo). As maiores flechas ocorreram para os corpos de prova reparados com as AGT1 quando comparadas às vigas da série A. As vigas recuperadas com argamassa geopolimérica apresentaram-se monolíticas, ao contrário das recuperadas com ACQT e ACQU, que apresentaram descolamento da interface substrato/reparo;
- as vigas das séries H e I (vigas armadas com aço nervurado CA-60 ($\phi 4,2$ mm) e com aço liso CA-25 ($\phi 6,3$ mm) reparadas com argamassas geopoliméricas AGT1 e AGT2, respectivamente) também tiveram comportamentos similares

às vigas das séries B e C (vigas armadas de referência, monolíticas, ou seja, sem reparo e com aço nervurado CA-60 com $\phi 4,2\text{mm}$ e com aço liso CA-25 com $\phi 6,3\text{ mm}$, respectivamente), enquanto que às das séries E e F (vigas armadas com aço nervurado CA-60, $\phi 4,2\text{ mm}$ e com aço liso CA-25, $\phi 6,3\text{ mm}$ reparadas com argamassa comercial ACQT e ACQU, respectivamente), apesar de terem cargas de ruptura próximas às vigas de referência, tiveram momentos de fissuração precoces devido à baixa aderência entre o substrato e a argamassa comercial ACQT e ACQU;

- as vigas das séries C, F e I (vigas armadas com aço liso CA-25, $\phi 6,3\text{ mm}$ e $\rho=0,78\%$) apresentaram maior resistência mecânica do que as das séries B, E e H (com vigas armadas com aço nervurado CA-60, $\phi 4,2\text{ mm}$ e $\rho =0,35\%$). As flechas e índices de ductilidade (ID1 e ID2) também foram maiores para as vigas das séries C, F e I em comparação com as das séries B, E e H;
- quanto à aderência, em todas as séries, foi possível verificar que os resultados foram mais satisfatórios para as vigas recuperadas com as argamassas geopoliméricas (AGT1 e AGT2). Como a posição do reparo é o local onde as armaduras de flexão são mais solicitadas, as argamassas de reparo pouco contribuíram para aumentar a capacidade portante das vigas. No entanto, as vigas reparadas com argamassa comercial (ACQT e ACQU) mostraram discreta redução da capacidade portante, enquanto que as reparadas com AGT1 e AGT2 fizeram com que as vigas se comportassem como as vigas monolíticas de referência. Estes resultados podem ser associados às análises das micrografias por MEV descritas no Item 3.11.4 que apresentaram muitos poros para ACQT e a região homogênea da interface AGT1/substrato.

Assim, é possível afirmar que as argamassas geopoliméricas deste estudo podem ser utilizadas como material para reparo de vigas de concreto armado, devido às seguintes características: aderência satisfatória ao substrato; carga de ruptura compatível com as vigas de referência (monolíticas); menor rigidez e maior ductilidade em relação às vigas monolíticas e às reparadas com argamassa comercial. A maior parte dos resultados obtidos são mostrados nos gráficos e tabelas, permitindo concluir que houve boa aderência entre o substrato e as argamassas geopoliméricas.

Em resumo, a principal conclusão desta tese foi a comprovação do desempenho satisfatório das argamassas geopoliméricas na reabilitação de vigas de

concreto convencional, com e sem armadura, ressaltando que a resistência de aderência, e em menor escala a resistência à compressão do material utilizado, é um parâmetro muito importante no sistema de reparo.

Os resultados da pesquisa sugerem que as argamassas geopoliméricas utilizadas tem grande potencial para recuperar estruturas de concreto armado à base de cimento Portland. Porém, é necessária a continuidade de pesquisas nesta área de materiais geopoliméricos aplicados em conjunto com concretos convencionais de diferentes resistências mecânicas e barras de aço de diferentes tipos e diâmetros.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos nesse trabalho fornecem uma contribuição a respeito da aderência entre argamassas geopoliméricas de reparo e o concreto armado convencional. Estudos adicionais devem ser conduzidos para avaliar de maneira mais ampla o comportamento de argamassas e concretos geopoliméricos, de forma que estes possam ser utilizados em elementos construtivos de maneira confiável. Entre diversos temas sugeridos para pesquisas futuras, podem ser citados os seguintes:

- estudo da retração, permeabilidade e absorção de água das argamassas geopoliméricas de reparo;
- dosagem e aplicação de argamassas geopoliméricas de reparo à base de resíduos agroindustriais;
- ensaios de carregamento cíclico à flexão com vigas de concreto reparadas com argamassas geopoliméricas;
- avaliação da durabilidade de argamassas geopoliméricas submetidas a agentes agressivos, tais como ataques por sulfatos, íons cloretos, permeabilidade a gás e resistência ao desgaste;
- ensaios estruturais em vigas reparadas com argamassas geopoliméricas com diferentes vinculações (por exemplo, hiperestáticas);
- reparo com argamassas geopoliméricas na zona de compressão de vigas de concreto armado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULKAREEM, O. A.; AL BAKRI, A. M. M.; KAMARUDIN, H.; NIZAR, I. K.; 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.

ACI COMMITTEE 408. (1991) **Abstract of: State of the art report: Bond under Cyclic Loads.** *ACI Materials Journal*. 88: 669-73.

ALANAZI, H., YANG, M.J.; ZHANG, D.L.; GAO, Z.L. (2016) **Bond strength of PCC pavement repairs using metakaolin-based geopolymer mortar.** *Cement Concrete Composites*. 65: 75–82.

ALTUN, F. (2004) **An Experimental study of the jacketed reinforced concrete beams under bending.** *Construction and Building Materials*. 18: 611-618.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Performance Specification for Hydraulic Cement.** ASTM C1157/C1157M. West Conshohocken, 2017

ANDALIB, R.; HUSSIN, M.W.; MAJID, M.Z.A.; AZRIN, M.; ISMAIL, H.H. (2014) **Structural performance of sustainable waste palm oil fuel ash-fly ash geopolymer concrete beams.** *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 23: 115–119.

ANTUNES, R. P. N., JOHN, V., PILEGGI, R. G. (2005) **Propriedades Reológicas de Argamassas Avaliada por Squeeze-Flow.** *VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Aço destinado a estruturas de concreto armado - Especificação:** NBR 7480. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Agregados- determinação da composição granulométrica:** NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Agregado miúdo- determinação da massa específica e massa específica aparente:** NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo:** NBR NM 18. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Cimento Portland de alta resistência inicial:** NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Cimento Portland composto:** NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica:** NBR NM 23. Rio de Janeiro, 2001.

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 - **Concreto- Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão:** NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.

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 - **Concreto e argamassa- determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos:** NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Determinação da resistência à compressão:** NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos:** NBR 12142. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado:** NBR 7477. Rio de Janeiro, 1982.

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 - **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento: NBR 6118.** Rio de Janeiro, 2014.

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.** Bruxelas, 1992.

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.

BARBOSA, M. T. G. (2001) **Avaliação do comportamento da Aderência em Concretos de Diferentes Classes de Resistência.** Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

BARBOSA, V. F. F. (1999) **Síntese e Caracterização de Polissialatos.** Tese de doutorado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

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

BEBER, A. J. (2003) **Comportamento Estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BEIRAL, W.V. (2012) **Aderência entre concreto e barras lisas de polímero reforçado com fibra de vidro.** Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro.

- BIGNO, I. C. (2008) **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais**. Tese de doutorado em ciência dos materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- BOCA SANTA, R. A. A. (2012) **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. Dissertação de mestrado em engenharia química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BRISOTTO, D.S. (2011) **Um modelo elasto-plástico para a análise da aderência em peças de concreto armado**. Tese de Doutorado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CÁNOVAS, M. F. (1994) Patología y terapéutica del hormigón armado. 3a Edición. Editora Colegio de Ingenieros de Caminos.
- CARASEK, H., DJANIKIAN, J. G. (1997) **Aderência de Argamassas a Base de Cimento Portland a Unidades de Alvenaria**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, BT/PCC/179, São Paulo:
- CASTRO, P. F. (2000) **Notas sobre estudo da aderência aço-concreto**. Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- CHEN, W. F. (2007) **Plasticity in Reinforced Concrete**. J. Ross Publishing.
- COSTA, E. B. C. (2014) **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. Tese de doutorado em engenharia civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 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.
- CUIABANO, J. L. (2002) **Influência da temperatura no cimento geopolimérico**. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- DA COSTA J., A. M. (1996) **Resistência de Materiais Compósitos ao Impacto Balístico**. Tese de doutorado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- DAVIDOVITS, J. (1981) **European Patent 026687**.

DAVIDOVITS, J. (1991) **Geopolymers Inorganic Polymeric New Materials**. *Journal of Thermal Analysis*. 37: 1633–1656.

DAVIDOVITS, J. (1979) **Synthesis of new high-temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites**. Society of Plastic Engineers, Brookfield Center, USA.

DAWOOD, E.T.; RAMLI, M. (2014). **The effect of using high strength flowable system as repair material**. *Composites Part B: Engineering*. 57: 91–95.

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.

DUAN, P.; YAN, C.; LUO, W. (2016) **A novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer**. *Construction and Building Materials*. 124: 69–73.

DUCATTI, V. A. (1993) **Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura**. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade de São Paulo, São Paulo.

DUMÊT, T. B.; PINHEIRO, L. M. (2007) **Aderência de cordoalhas pré-tracionadas em concretos com e sem fibras de aço**. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*. 9: 21-43.

DUXSON, P.; MALLICOAT, S. W.; LUKEY, A.; KRIVEN, W. M.; VAN DEVENTER, J. S. J. (2007) **The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers**. *Colloids Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 292: 8-20.

ELIGEHAUSEN, R.; POPOV, E. P., BERTERO, V. V. (1983) **Local bond-slip relationship of deformed bars under generalized excitations**. Report n° UCB/EERC 83/23, University of California, College of Engineering, Earthquake Engineering Research Center, Berkley California, USA.

EMMONS, P.H.; VAYSBURD, A.M. (1994) **Factors affecting the durability of concrete repair: the contractor's viewpoint**. *Construction and Building Materials*. 8 (1): 5–16.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. (2012) **MODEL CODE 2010 – Final draft**. Lausanne, Switzerland.

FELIZARDO, V.; NANDI, V. S.; DONADEL, K.; NOVAIS, R.; LABRINCHA, J.; ZACCARON, A. **Desenvolvimento de geopolímeros de baixa condutividade térmica**. *Matéria*. 21 (2): 429-436.

FERNANDES, R. M. (2000) **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade de São Paulo, São Carlos.

FRANÇA, V. H. (2004) **Aderência aço-concreto – uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. Dissertação de mestrado em engenharia civil em engenharia civil. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira.

FUSCO, P. B. (1995) **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo. Editora Pini.

GALLARDO, S. M. A. G. (2002) **Reforço a flexão em vigas de concreto utilizando polímeros reforçados com fibras de carbono**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GALLETTO, A. (2005) **Reparo de estruturas de concreto: contribuição ao estudo da aderência**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GAVA, G.P.; PIERI, T.S.; PRUDENCIO JR, L.R.; (2004) **Ensaio de flexão de vigas de concreto reforçado com fibras de aço: influência da presença e posicionamento do entalhe e do número de fibras na seção fissurada**. *Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil*. 1(2): 114-127.

GHOSH, S. (2012) **Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of Fly ash based geopolymer mortar**. *International journal of civil and structural engineering*. 3(1): 168-177.

GOLIATH, K. B. (2017) **Comportamento de colunas curtas reforçadas com compósitos de resina geopolimérica e fibras de carbono**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

- GOURLEY, J.; JOHNSON, G. (2005) **Developments in geopolymer precast concrete**. *Proceedings of fourth World Congress geopolymer*.
- GRANTHAM, M. G. (2011) **Concrete Repair: A Practical Guide**. Taylor & Francis. Spon Press.
- GOTO, Y. (1971) **Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars**. *Journal of the ACI*. 68: 244-251.
- GOURLEY J.; JOHNSON, G. (2005) **Developments in geopolymer precast concrete**. *World Congress Geopolymer*.
- GUERRANTE, I. F. (2013) **Estudo teórico e experimental da junção de concretos de diferentes resistências por meio de adesivo epóxi**. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- 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.
- 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.
- HELENE, P. R. L. (1992) **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. Editora. Pini.
- JANNIE, D.G.B.; VAN DEVENTER S.J.; SUSAN, A. (2013) **Development, Standardization, and Applications of Alkali-activated Concretes**. *RILEM state of the art reports*.
- KOBAYASHI, K.; IIZUKA, T.; KURACHI, H.; ROKUGO, K. (2010) **Corrosion protection performance of high performance fiber reinforced cement composites as a repair material**. *Cement and Concrete Composites*. 32: 411–420.
- KOMMITSAS K., ZAHARAKI D. (2007) **Geopolymerisation: A Review and Prospects for the Minerals Industry**. *Minerals Engineering*. 20: 1261–1277.
- KONG, D.L.Y.; SANJAYAN, J.G.; SAGOE-CRENTSIL K. (2007) **Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure**

to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research.* 37(12):1583–1589.

KUDLANVEC JUNIOR, V. L.; COSTA, M. R. M. M.; RIEKE, G. T. (2016) **Utilização do ensaio de tração na flexão para avaliação de aderência de argamassas de reparo em substrato de concreto.** *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia.* Foz do Iguaçu.

KUENZEL C; VANDEPERRE, L.J.; DONATELLO, S.; BOCCACCINI, A.R.; CHEESEMAN, C. (2012) **Ambient temperature drying shrinkage and cracking in metakaolin-based geopolymers.** *Journal of the American Ceramic Society.* 95(10):3270–3277.

LASKAR, S. M; TALUKDAR, S. (2017) **Development of ultrafine slag-based geopolymer mortar for use as repairing mortar.** *Journal of Materials in Civil Engineering.* 29.

LEE, M.G.; WANG, Y.C.; CHIU, C.T. (2007). **A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material.** *Construction and Building Materials.* 21: 182–189.

LEONHARDT, F.; MONNIG, E. (1977) **Construções de concreto: princípios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto armado.** Editora Interciência. Volume 1.

LI, Z; DING, Z; ZHANG, Y. (2004) **Development of sustainable cementitious materials.** *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology.* Beijing, China.

LIEW, Y.M.M.; AL BAKRI, A.M.M.; NIZAR, I.K. (2012) **Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers.** *Construction and Building Materials.* 35: 912–922.

LIMA, F. T. (2004) **Caracterização Micro e Nanoestrutural de Compósitos Geopoliméricos Metacauliníticos.** Mestrado em ciências dos materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

LIU, C.T.; HUANG, J.S. (2008). **Highly flowable reactive powder mortar as a repair material.** *Construction and Building Materials.* 22: 1043–1050.

- LONGHI, M. A. (2015) **Álcali-ativação do lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. Dissertação de Mestrado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LUTZ, L. A.; GERGELY, P. (1967) **Mechanics of bond and slip of deformed bars in Concrete**. *ACI Journal*. 64: 711-721.
- MAURI, J.; DIAS, D. P.; CORDEIRO, G. C.; DIAS, A. A. (2009) **Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico**. *Revista Matéria*. 14: 1039 – 1046.
- 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.
- MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. (2008) **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Editora Ibracon.
- MEHTA, A.; SIDDIQUE, R. (2017) **Strength, permeability and micro-structural characteristics of low-calcium fly ash based geopolymers**. *Construction and Building Materials*. 141: 325–334.
- MELO, L. G. A. (2011) **Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos**. **Dissertação de mestrado em ciências dos materiais**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- MONTEIRO, P.; MEHTA, P. (1986) **Interaction between carbonate rock and cement paste**. *Cement and Concrete Research*. 16: 127–134.
- MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E. (2004) **The function of fillers in concrete**. *Materials and Structures*. 37: 74–81.
- MORENO, J. R; SELMO, S. M. S. (2007) **Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- MORGAN, D. R. (1996) **Compatibility of concrete repair materials and systems**. *Construction and Building Materials*. 10: 57-67.

- NAGEM, N. F. (2013). **Geopolímero a partir de resíduos oriundos da indústria de alumínio para reutilização e coprocessamento**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- NATH, P; SARKER, P. (2016) **Permeability of ambient cured fly ash geopolymer concrete blended with additives: Concrete with Supplementary Cementitious materials**. *Pro* 113: 393-401.
- 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.
- OLIVEIRA, K. R. S. (2006) **Aderência da armadura ao concreto leve com adição de resíduos**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- OLLIVIER, J. P.; MASO, J. C.; BOURDETTE, B. (1995) **Interfacial transition zone in concrete**. *Advanced Cement Based Materials*. 2: 30–38.
- PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.P.; JALALI, S. (2008) **Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment**. *Construction and Building Materials*. 22: 154–161.
- PEREIRA, D. S. (2003) **Estudo do comportamento de pavimentos de concreto simples em condições de aderência entre placa de concreto e base cimentada ou asfáltica**. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PEREIRA, D. S. T. (2006) **Concreto de cimento geopolimérico reforçado com fibras de aço para pavimentação**. Dissertação de mestrado em ciências dos materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- PETCHERDCHOO, A. (2015) **Repairs by fly ash concrete to extend service life of chloride exposed concrete structures considering environmental impacts**. *Construction and Building Materials*. 98: 799–809.
- PHOO-NGERNKHAM, T.; SATA, V.; HANJITSUWAN, S.; RIDTIRUD, C.; HATANAKA, S.; CHINDAPRASIRT, P. (2015) **High calcium fly ash geopolymer mortar**

containing Portland cement for use as repair material. *Construction and Building Materials*. 98: 482–488.

PINTO, E.N.M.G. (2007) **Ativação de pastas geopoliméricas com tetraborato de sódio e látex não iônico para cimentação de poços de petróleo.** Dissertação de mestrado do em ciências e engenharia de materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

PROVIS, J.L. (2013) **Alkali-activated binders and concretes: the path to standardization.** *ASTM Special Technical Publication*. 1566: 185–195.

PROVIS, J. L.; LUKEY, G.C.; VAN DEVENTER, J.S.J. (2005) **Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results.** *Chemistry and Materials*.17: 3075–3085.

QIAN, J.S.; YOU, C.; WANG, Q.Z.; WANG, H.T.; JIA, X.W. (2014) **A method for assessing bonding performance of cement-based repair materials.** *Construction and Building Materials*. 68: 307–313.

QIAO, F.; CHAU, C.K.; LI, Z.J. (2010) **Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material.** *Construction and Building Materials*. 24: 695–700.

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

RASHID, K; UEDA, T; ZHANG, D; MIYAGUCHI, K; HIROSHI, N. (2015) **Experimental and analytical investigations on the behavior of interface between concrete and polymer cement mortar under hygrothermal conditions.** *Construction and Building Materials*. 94 (1): 414-425.

RECUM, A. F. V.; SHANNON, C. E.; CANNON, C. E. (1996) **Surface Roughness, Porosity, and Texture as Modifiers of Cellular Adhesion.** *Tissue Engineering*. 2(4): 241–253.

REINHART, F. W. (1954) **Nature of adhesion.** *Journal of Chemical Education*. 31:128.

- REIS, L. S. N. (2001) **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- RIBEIRO, J. L. S. (2009) **Contribuição para a avaliação da compatibilidade eletroquímica entre argamassas de reparo e concreto carbonatado**. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- RILEM/CEB/FIP-RC6. (1983) **Bond Test for Reinforcement Steel: 2. Pull-Out Test (Revised Edition)**. CEB Manual on Concrete Reinforcement Technology, Lausanne.
- ROCHA, T. S. (2017) **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.
- ROMERO, D. V. S. (2007) **Reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio de protensão externa**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ROSSI, N. (2002) **Resistência de aderência concreto-aço: efeitos da resistência à compressão do concreto e do comprimento de aderência**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SANTANA, L. A. S. (2004) **Estudo da aderência entre concretos de diferentes idades**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.
- SANTOS, E. W. F. (2006) **Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SATOH, A; YAMADA, K. (2016) **FEM simulation of tension struts on adhesion performance of mortar–repair interface**. *Engineering Fracture Mechanics*. 167: 84-100.
- 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, A. C. R. (2006) **Comportamento do concreto geopolimérico para**

pavimento sob carregamento cíclico. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

SILVA, F. J. (2000) **Reforço e fratura em compósitos de matriz álcali-ativada.** Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

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.

SIMÕES, M. L. F. (2007) **Reforço à flexão de vigas de concreto armado por encamisamento parcial.** Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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

SMIDERLE, A. P. R. S. M. (2016) **Avaliação da durabilidade e propriedades mecânicas de concretos expostos ao ataque ácido por vinhoto.** Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

SOARES, J. C. (2006) **Aço-concreto geopolimérico: correlação entre tensão de aderência e comprimento de ancoragem.** Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

SOMNA K, JATURAPITAKKUL C, KAJITVICHYANUKUL P, CHINDAPRASIRT P. (2011) **NaOH activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature.** *Fuel.* 90: 2118–2124.

SONGPIRIYAKIJ, S.; PULNGERN, T.; PUNGPREMTRAKUL, P.; JATURAPITAKKUL, C. (2011) **Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste.** *Materials and Design.* 32: 3021– 3028.

SOUZA, B. P. (2015) **Aderência de barras de aço tipo CA em concreto sustentável.** Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

SOUZA, L. G. (2005) Geopolímeros à base de resíduos industriais. Tese de doutorado em ciência dos materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

SOUZA, V. C., RIPPER, T. (1998) **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. Editora Pini.

THOMAZ, E. C. S. (2000) **Desempenho do concreto geopolimérico**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

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.

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.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, L. S. J.; LORENZEN, L. (1998) **Factors affecting the immobilization of metal in geopolymerized fly ash**. *Metallurgical and materials transactions*. 29: 283–291.

VAYSBURD, A.M.; EMMONS, P.H. (2006) **Concrete repair – a composite system: philosophy, engineering and practice**. *Procedure of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*.

VAZ, A. P. R. (2013) **Comportamento de Vigas Reforçadas Submetidas a Carregamento Cíclico**. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WALLAH, S. E.; RANGAN, B. V. (2006) **Low-calcium fly ash based geopolymer concrete: longterm properties**. Research Report GC 2, Curtin University of Technology, Australia.

WU, H.; ZHU, M.J.; LIU, Z.; YIN, J. (2015) **Developing a polymer-based crack repairing material using interpenetrate polymer network (IPN) technology**. *Construction and Building Materials*. 84: 192–200.

WU, S. (1982) **Polymer interface and adhesion**. Marcel Dekker.

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. (2016) **Cement hydration and microstructure in concrete repairs with cementitious repair materials.** *Construction and Building Materials*. 112: 765-772.

ZHANG, H. Y.; KODUR, V.; Qi, S. L.; WUA, B. (2015) **Characterizing the bond strength of geopolymers at ambient and elevated temperatures.** *Cement & Concrete Composites*. 58: 40-49.

ZHOU, J.; YE, G.; SCHLANGEN, E.; van BREUGEI, K. (2008) **Modelling of stresses and strains in bonded concrete overlays subjected to differential volume changes.** *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 49 (2): 199–205.

ZHOU, Y. (2016) **Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers.** *Ceramics International*. 42: 6184–16190.

ANEXO A

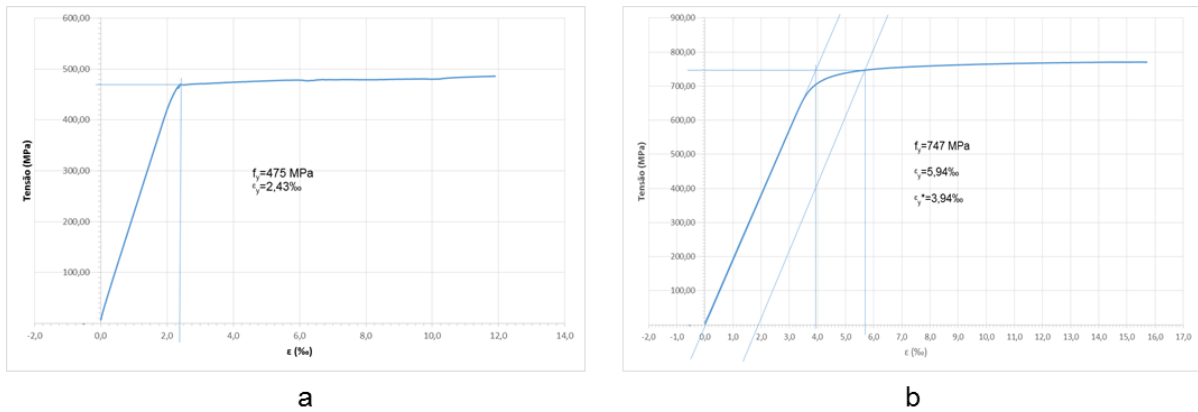


Figura A.1 - (a) Curva tensão *versus* deformação do corpo de prova 4 de aço CA-25; (b) Curva tensão *versus* deformação do corpo de prova 4 de aço CA-60.

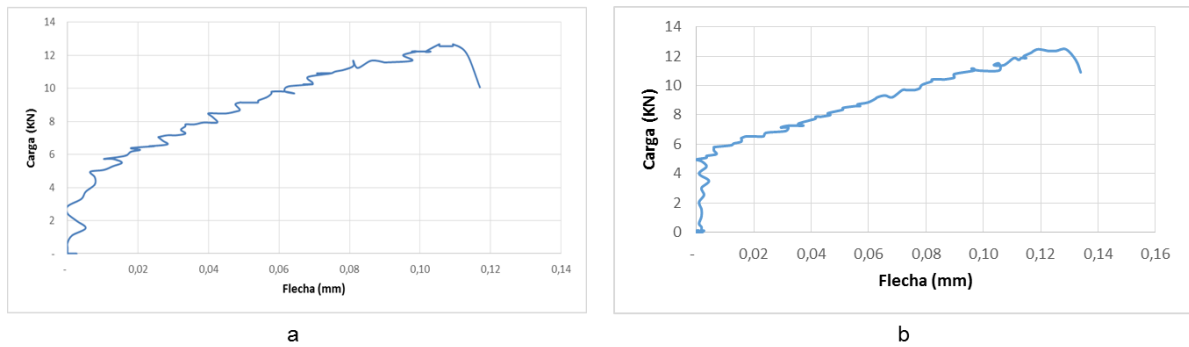


Figura A.2 – (a) Curva carga *versus* flecha da viga A2; (b) Curva carga *versus* flecha da viga A3.

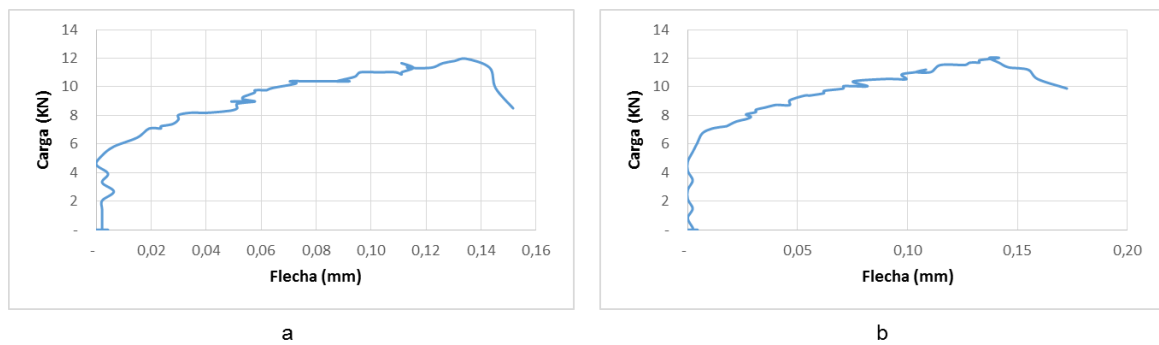
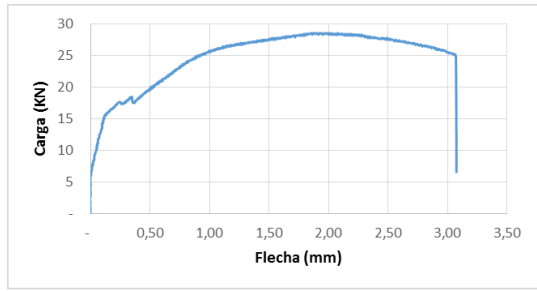
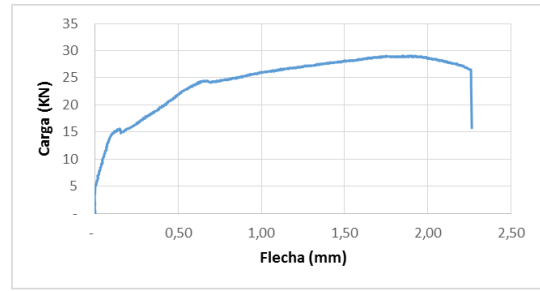


Figura A.3 – (a) Curva carga *versus* flecha da viga G2; (b) Curva carga *versus* flecha da viga G3.

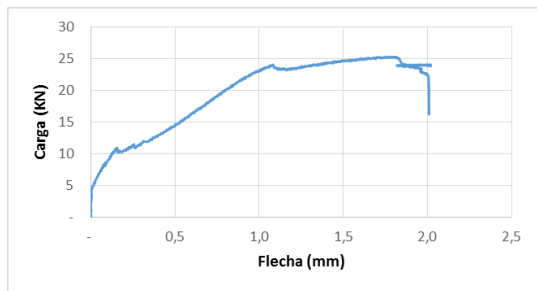


a

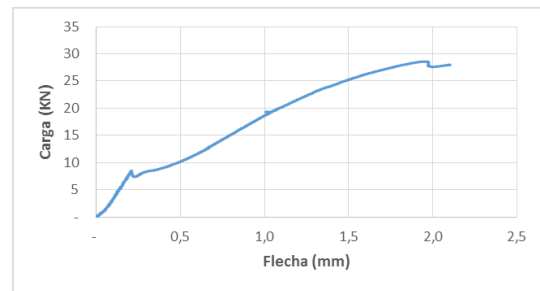


b

Figura A.4 – (a) Curva carga *versus* flecha da viga B2; (b) Curva carga *versus* flecha da viga B3.

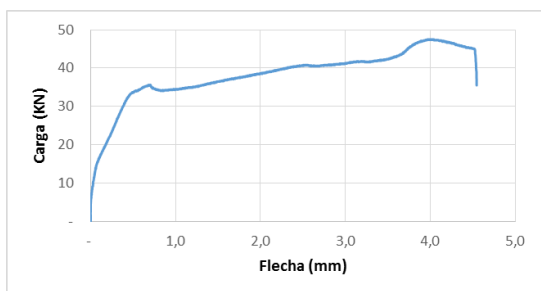


a

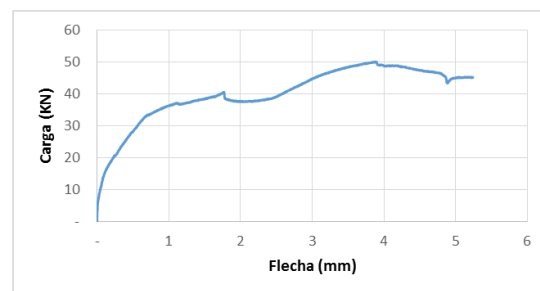


b

Figura A.5 – (a) Curva carga *versus* flecha da viga E2; (b) Curva carga *versus* flecha da viga H2.

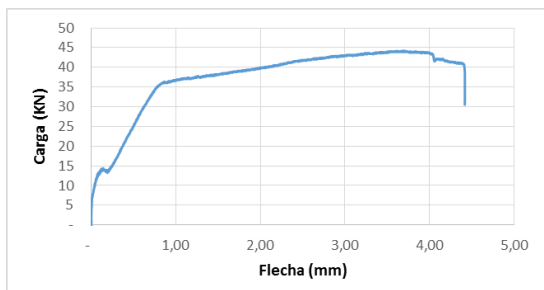


a

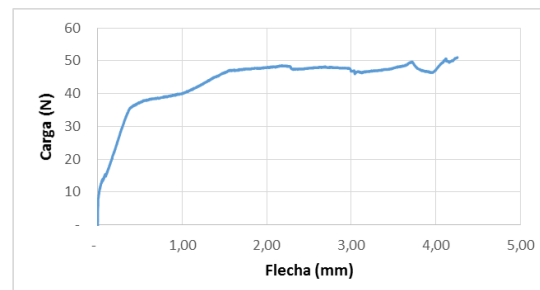


b

Figura A.6 – (a) Curva carga *versus* flecha da viga C2; (b) Curva carga *versus* flecha da viga C3.



a



b

Figura A.7 – (a) Curva carga *versus* flecha da viga F2; (b) Curva carga *versus* flecha da viga I2.

ANEXO B



DEPTO. TÉCNICO – CONTROLE DE QUALIDADE

ATESTADO DE QUALIDADE WEBER.TEC REPARO ESTRUTURAL QUARTZOLIT

1. OBJETIVO

O presente relatório indica o desempenho médio do produto Weber.tec Reparo Estrutural, produzido na unidade Weber Saint-Gobain em Jandira/SP, testado segundo metodologia descrita a seguir.

2. METODOLOGIA

REQUISITOS E CRITÉRIOS:

Não há requisitos e critérios em norma brasileira que classifiquem produtos destinados a recuperação e reparo de estruturas. No entanto, para o produto Weber.tec Reparo Estrutural, a Weber Saint-Gobain faz cumprir algumas metodologias já contempladas e definidas em normalização brasileira de argamassas, cimentos e concretos:

2.1 NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

2.2 NBR 13278 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

2.3 NBR 13280 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.

2.4 NBR 15281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear).

2.5 NBR 5739 – Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

2.6 NBR 14992 - Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas - Requisitos e métodos de ensaios

3. RESULTADOS OBTIDOS

Tabela 1 – Resultados de desempenho nos estados fresco e endurecido no produto

NORMA	ENSAIO	RESULTADO
NBR 13276	Relação água/argamassa (mL/kg)	130
NBR 13278	Densidade a fresco (kg/m ³)	2088
NBR 5739	Compressão (MPa) 28 dias	49,2
NBR 14992	Permeabilidade (cm ³)	0,5
NBR 13280	Densidade endurecida(kg/m ³)	2044
NBR 15261	Variações Dimensionais (mm/m)	-1,2
	Variações de Massa (%)	-2,0

4. CONCLUSÃO

Os resultados acima apresentam conformidade e encontram-se dentro das especificações internas.

Salientamos que a unidade de Jandira da Weber Saint-Gobain é certificada ISO 9001, ISO 14001 e OHSAS 18001.

À disposição para quaisquer esclarecimentos.

Jandira, 15 de março de 2017.



Rafaela Fernanda Camargo
Gerente de Controle de Qualidade