

ANDERSON CAETANO GUSMÃO

**UTILIZAÇÃO DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS COMO
MATERIAL DE REPARO - ÊNFASE NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

VIÇOSA
MINAS GERAIS- BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

G982u
2017
Gusmão, Anderson Caetano, 1978-
Utilização do concreto de pós reativos como material de
reparo - Ênfase na resistência de aderência / Anderson Caetano
Gusmão. – Viçosa, MG, 2017.
xxi, 143f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: José Luiz Rangel Paes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.115-123.

1. Concreto. 2. Aderência. 3. Análise estrutural.
4. Engenharia de estrutura. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.15

ANDERSON CAETANO GUSMÃO

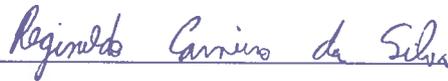
**UTILIZAÇÃO DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS COMO
MATERIAL DE REPARO - ÊNFASE NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

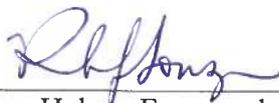
APROVADA: 20 de fevereiro de 2017.



Leonardo Gonçalves Pedroti
(Coorientador)



Reginaldo Carneiro da Silva



Regina Helena Ferreira de Souza



José Luiz Rangel Paes
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pela saúde, força e determinação para concluir a pesquisa.

A minha família em especial a minha amada esposa **Zayne agradeço pela** e compreensão, meus filhos **Daniel e Breno** minhas fontes de inspiração e motivação, aos meus familiares pelo apoio sem o qual não teria conseguido concluir a pesquisa.

Aos meus queridos professores orientadores, em especial o Prof. Dr. **Jose Luiz Rangel** e não menos importante o Prof. Dr. **Leonardo Goncalves Pedroti** e Prof. Dr. **Gustavo Verissimo**, por todo conhecimento e experiência transmitida ao longo desses anos, pela atenção e paciência dedicada ao desenvolvimento dessa pesquisa.

A empresa **Pedreira Um Valemix Ltda**, em especial aos diretores **Arthur Azevedo, Celio Junior Azevedo** e ainda a **Romério Sales Pereira**, pela compreensão e liberdade para realização da pesquisa e ainda pela doação de alguns dos materiais que foram utilizados;

Aos amigos e parceiros de pesquisa **André Luiz Candian, Gustavo Emilio Soares de Lima** e **Roseli Oliveira Guedes** e ainda **Eduardo Lins de Moura e Silva, Sérgio Luiz da Silva**, pela amizade e dedicação, dando apoio para a realização dos ensaios.

A empresa **Companhia Nacional de Cimento** localizada em sete lagoas-MG em especial aos amigos **Ednaldo Ribeiro Martins** e **Tiago Andrade Couto** pelo apoio técnico recebido.

Aos profissionais lotados no **Laboratório de Materiais de Construção** da Universidade Federal de Viçosa –MG, em especial aos técnicos **Wellington Fernandes** e **Jose Carlos**, por todo apoio e suporte técnico dado.

A todos os **professores e colegas** que, de alguma forma contribuíram para a realização dessa pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xvii
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Justificativa e relevância do tema.....	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 Considerações Gerais	6
2.2 Concretos de pós reativos	8
2.2.1 Breve histórico e aplicações.....	8
2.2.2 Materiais componentes dos concretos de pós reativos	10
2.2.3 Dosagem dos concretos de pós reativos.....	14
2.2.4 Características dos concretos de pós reativos.....	14
2.3 Microestrutura do Concreto	15
2.3.1 Considerações preliminares.....	15
2.3.2 Microestrutura da fase agregado.....	16
2.3.3 Microestrutura da pasta de cimento hidratada (pasta de cimento Portland)	16
2.3.4 Microestrutura da zona de transição da interface	17
2.4 Aderência do Concreto	18
2.4.1 Considerações preliminares.....	18

2.4.2 Aderência aço-concreto.....	19
2.4.3 Aderência concreto-concreto.....	19
2.5 Métodos para Avaliação Experimental da Aderência	22
2.5.1 Considerações preliminares.....	22
2.5.2 Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão.....	23
2.5.2.1. Ensaio de reconstituição do prisma	23
2.5.2.2. Ensaio de reconstituição do cilindro	25
2.5.3 Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão	29
2.5.4 Resistência de aderência ao cisalhamento direto.....	31
2.5.4.1 Ensaio de corpo de prova composto de três prismas.....	31
2.5.4.2 Ensaio de corpo de prova de um único prisma	32
2.5.5 Resistência de aderência à tração direta.....	33
2.6 Procedimentos de Preparação de Superfícies para Avaliação da Aderência	35
2.6.1 Considerações Preliminares	35
2.6.2 Tipos de Preparação da superfície do substrato	37
2.7 Requisitos de desempenho para produtos de reparação estrutural	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 Considerações Preliminares	40
3.2 Características dos materiais utilizados para produção dos concretos e argamassas	42
3.2.1 Cimento.....	42
3.2.2 Agregados miúdos	43
3.2.2.1 Areia de quartzo	44
3.2.2.2 Areia artificial	45

3.2.3 Sílica ativa	46
3.2.4 Pó de quartzo	47
3.2.5 Aditivos	48
3.2.5.1 Aditivo superplastificante	48
3.2.5.2 Aditivo expansor	49
3.2.6 Água	49
3.3 Características e produção dos concretos e argamassas	50
3.3.1 Dosagem dos concretos e argamassas.....	50
3.3.1.1 Concreto base (CB)	50
3.3.1.2 CPR	51
3.3.1.3 Argamassas de reparo.....	51
3.3.2 Produção dos concretos e argamassas.....	53
3.3.2.1 Planejamento dos ensaios	53
3.3.2.2 Produção do concreto base	54
3.3.2.3 Produção do CPR.....	56
3.3.2.4 Produção das argamassas ARQ, ARZ e ARE.....	58
3.3.2.5 Cura dos corpos de prova	60
3.3.3 Caracterização dos concretos e argamassas estado fresco	60
3.3.4 Caracterização dos concretos e argamassas estado endurecido	62
3.4 Avaliação experimental da aderência	66
3.4.1 Preparo das superfícies.....	66
3.4.2 Reparação e cura dos corpos de prova reparados	67
3.4.3 Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão	68

3.4.3.1	Ensaio de reconstituição do prisma	68
3.4.3.2	Ensaio de reconstituição do cilindro	70
3.4.4	Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão	71
3.4.5	Resistência de aderência ao cisalhamento direto.....	72
3.4.6	Resistência de aderência à tração	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1	Características dos materiais no estado fresco	77
4.2	Características dos materiais no estado endurecido	78
4.2.1	Resistência à compressão	78
4.2.1	Módulo de elasticidade	80
4.2.2	Resistencia à tração.....	82
4.2.3	Absorção por capilaridade.....	83
4.2.4	Relação entre as características mecânicas dos materiais	83
4.2.5	Discussão dos resultados.....	85
4.3	Avaliação da compatibilidade dimensional	87
4.3.1	Compatibilidade dimensional (ensaio de longa duração)	87
4.3.2	Compatibilidade dimensional (ensaio de curta duração)	88
4.3.3	Discussão dos resultados.....	90
4.4	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA ADERÊNCIA	91
4.4.1	Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão.....	91
4.4.1.1	Ensaio de reconstituição do prisma- <i>Slant Shear</i>	91
4.4.1.2	Ensaio de reconstituição do cilindro	94
4.4.2	Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão	99
4.4.3	Resistência de aderência ao cisalhamento direto.....	100

4.4.4 Resistência de aderência à tração direta.....	102
4.4.5 Discussão dos resultados.....	106
5 CONCLUSÕES.....	110
5.1 Conclusões gerais	110
5.2 Conclusões específicas	112
5.3 Sugestões para trabalhos futuros	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
APÊNDICE A- Resultados para os ensaios de compatibilidade dimensional	124
APÊNDICE B - Resultados dos ensaios de compressão e modulo de elasticidade aos 28 dias.....	130
APÊNDICE C – Análise estatística ANOVA - TUKEY	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características químicas e físicas do cimento CP V-ARI da Holcim.	42
Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios de caracterização do cimento.....	43
Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de caracterização da areia de quartzo.....	44
Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios de caracterização da areia artificial.	45
Tabela 3.5 - Composição granulométrica da areia artificial.	45
Tabela 3.6 - Características físicas da sílica ativa da empresa Elkem.	46
Tabela 3.7 - Resultados dos ensaios de caracterização da sílica ativa.	47
Tabela 3.8 - Características físicas e químicas do pó de quartzo, Mineração Jundu.....	47
Tabela 3.9 - Resultados dos ensaios de caracterização do pó de quartzo.	48
Tabela 3.10 - Características físicas e químicas do aditivo superplastificante Glenium 51 da Basf.	49
Tabela 3.11 - Dados técnicos do aditivo MC-Quellmittel, da empresa MC-Bauchemie.	49
Tabela 3.12 - Traço do concreto base em massa produção de 1,0 m ³	50
Tabela 3.13 - Traço do CPR, em massa para produção de 1,0 m ³	51
Tabela 3.14 - Traço da ARE em massa para produção de 1,0 m ³	52
Tabela 3.15 - Quantitativo de corpos de prova para realização dos ensaios.	53
Tabela 3.16 - Procedimentos de moldagem dos corpos de prova de concreto base.	55
Tabela 3.17 - Procedimento de mistura do CPR.....	57
Tabela 3.18 - Procedimento de mistura da ARQ.	58
Tabela 3.19 - Procedimento de mistura da ARE.	59
Tabela 3.20 - Procedimento de mistura da ARZ.	59

Tabela 3.21 - Procedimentos de reparação dos corpos de prova.....	68
Tabela 4.1 - Características dos materiais no estado fresco.....	77
Tabela 4.2 - Valores médios da resistência à compressão dos concretos e argamassas de reparo.....	79
Tabela 4.3 - Valores médios do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) dos concretos e argamassas de reparo.	81
Tabela 4.4 - Valores médios da resistência à tração por compressão diametral dos concretos e argamassas de reparo aos 28 dias.	82
Tabela 4.5 - Valores médios da resistência à tração na flexão do CPR e argamassas de reparo aos 28 dias.	83
Tabela 4.6 - Valores médios da absorção dos concretos e argamassas de reparo aos 28 dias.	83
Tabela 4.7 - Valores médios da retração/expansão (%) dos concretos e argamassas de reparo (ensaio de longa duração).....	87
Tabela 4.8 - Valores médios da retração/expansão (%) dos concretos e argamassas de reparo (ensaio de curta duração).....	89
Tabela 4.9 - Valores médios da tensão normal de ruptura nos corpos de prova prismáticos.....	91
Tabela 4.10 - Valores médios da resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova prismáticos reconstituídos.....	92
Tabela 4.11 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão para corpos de prova prismáticos.....	92
Tabela 4.12 - Tipos de ruptura observados nos corpos de prova prismáticos reconstituídos.....	93
Tabela 4.13 - Valores médios da resistência à compressão uniaxial (f_c) nos corpos de prova cilíndricos.	95
Tabela 4.15 - Valores médios da resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm reconstituídos.	95
Tabela 4.16 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão para corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm.	96

Tabela 4.17 - Valores médios da resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm reconstituídos.	96
Tabela 4.18 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão para corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm.	97
Tabela 4.19 - Tipos de ruptura observados nos corpos de prova cilíndricos reconstituídos.....	97
Tabela 4.22 - Valores médios da resistência de aderência ao cisalhamento direto.	101
Tabela 4.23 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência ao cisalhamento direto.	101
Tabela 4.24 - Valores médios da resistência de aderência à tração direta.	103
Tabela 4.25 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência à tração.	103
Tabela 4.26 - Formas de ruptura observados nos corpos de prova cilíndricos ensaiados.	104
Tabela 4.27 - Valores médios do teor de umidade dos corpos de prova obtidos nos ensaios de resistência de aderência à tração.	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aspectos gerais da passarela Sherbrooke - Canadá (CHRIST, 2011).	9
Figura 2.2 - Estação de trem de Shawnessy - Canadá (CHRIST, 2011).....	9
Figura 2.3 - Passarela em Seonyu, Seul - Coreia do Sul (TUTIKIAN, 2011).	10
Figura 2.4 - Torre do sino, Laval - França (FORMAGINI, 2006).	10
Figura 2.5 - Representação esquemática da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA E MONTEIRO, 2008).	15
Figura 2.6 - Transferência de carga, mecanismo de aderência (SOUZA, 1990).....	20
Figura 2.7 - Esquema da zona de transição entre concreto novo e substrato de concreto (EMMONS e VAYSBURD, 1996).....	21
Figura 2.8 - Esquema do corpo de prova prismático utilizado no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão segundo a BS EN 12615:1999: a) vista lateral; b) perspectiva (dimensões em milímetros).....	24
Figura 2.9 - Esquema do corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (HELENE, 1988) (dimensões em milímetros).	26
Figura 2.10 - Esquema do corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão segundo a ASTM C882:2005(dimensões em milímetros).	27
Figura 2.11 - Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em juntas de concreto inclinadas ligadas com adesivo, entre concretos de diferentes resistências (GUERRANTE, 2013) (dimensões em milímetros).....	28
Figura 2.12 - Esquema do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (adaptado de MORENO JR e SELMO, 2007).	29
Figura 2.13 - Possíveis tipos de ruptura no ensaio aderência ao cisalhamento na flexão (MORENO JR e SELMO, 2007).....	30
Figura 2.14 - Esquema do ensaio de resistência ao cisalhamento direto em corpo de prova composto de três primas (HELENE, 1988) (dimensões em milímetros).	31

Figura 2.15 - Esquema do ensaio de resistência ao cisalhamento direto em corpo de prova composto de um único prima (SANTANA, 2004) (dimensões em milímetros). .	33
Figura 2.16 - Configurações utilizadas para o ensaio de resistência de aderência à tração direta (SANTANA, 2004) (dimensões em milímetros).	34
Figura 2.17 - Anatomia de um reparo em uma estrutura de concreto (EMMONS e VAYSBURD, 1996).	36
Figura 3.1 - Síntese do programa experimental desenvolvido.	41
Figura 3.2 - Aspecto geral da areia de quartzo.	44
Figura 3.3 - Aspecto geral da sílica ativa.	46
Figura 3.4 - Aspecto geral do pó de quartzo.	48
Figura 3.5 - Coleta do concreto base para moldagem dos corpos de prova.	54
Figura 3.6 - Moldagem dos corpos de prova de concreto base.	55
Figura 3.7 - Argamassadeira de eixo vertical utilizada para produção do CPR.	56
Figura 3.8 - Moldagem dos corpos de prova de CPR.	57
Figura 3.9 - Corpos de prova de argamassa.	60
Figura 3.10 - Aspecto do ensaio de abatimento do tronco de cone (<i>slump test</i>) para o concreto base.	61
Figura 3.11 - Aspecto do ensaio de consistência (<i>flow table</i>) para o CPR e argamassas.	61
Figura 3.12 - Aspecto do ensaio de determinação da densidade e do teor de ar incorporado do CPR e das argamassas.	62
Figura 3.13 - Ensaio para determinação da resistência à compressão: (a) detalhe do corpo de prova; (b) detalhe da máquina de ensaio.	63
Figura 3.14 - Aspecto do ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto e argamassas.	63
Figura 3.15 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compatibilidade dimensional.	64
Figura 3.16 - Aspecto geral do ensaio de compatibilidade dimensional.	65

Figura 3.17 - Aspecto do ensaio de resistência à tração na flexão.	66
Figura 3.18 - Aspecto geral da superfície de um corpo de prova antes da aplicação do material de reparação.	67
Figura 3.19 - Preparação do corpo de prova para o ensaio de reconstituição do prisma.	69
Figura 3.20 - Aspecto geral do ensaio de reconstituição do prisma.	69
Figura 3.21 - Corte do corpo de prova para o ensaio de reconstituição do cilindro.	70
Figura 3.22 - Aspecto dos corpos de prova para realização do ensaio de reconstituição do cilindro.....	71
Figura 3.23 - Aspecto da fôrma e do corpo de prova para realização do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão.: (a) fôrma para moldagem dos corpos de prova; (b) corpo de prova moldado.....	72
Figura 3.24 - Aspecto geral do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão.....	72
Figura 3.25 - Aspecto da moldagem do corpo de prova composto de três prismas para o ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto.....	73
Figura 3.26 - Aspecto geral do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto: (a) realização do ensaio; (b) detalhe do corpo de prova.	74
Figura 3.27 - Placa de concreto base para produção dos corpos de prova para o ensaio de resistência de aderência à tração.	75
Figura 3.28 - Aspecto geral do ensaio de resistência de aderência à tração: (a) máquina de ensaio; (b) corpo de prova ensaiado.	75
Figura 4.1 - Teste de aplicação realizado em substrato de concreto na posição vertical.	78
Figura 4.2 - Variação da resistência à compressão média ao longo do tempo.	80
Figura 4.3 - Variação do módulo de elasticidade médio ao longo do tempo.	82
Figura 4.4 - Relação entre a resistência à compressão média dos materiais de reparo e o concreto base aos 28 dias.	84

Figura 4.5 - Relação entre o módulo de elasticidade secante médio dos materiais de reparo e o concreto base aos 28 dias.	84
Figura 4.6 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral média dos materiais de reparo e concreto base aos 28 dias.	85
Figura 4.7 - Variação da retração/expansão ao longo do tempo (ensaio de longa duração).	88
Figura 4.8 - Variação da retração/expansão ao longo do tempo (ensaio de curta duração).	89
Figura 4.9 - Aspecto da ruptura monolítica de um corpo de prova; (a) e (b) reparado com CPR; (c) reparado com ARZ.	93
Figura 4.10 - Aspecto da ruptura adesiva de um corpo de prova: (a) reparado com ARZ; (b) reparado com ARQ.	94
Figura 4.11 - Aspecto da ruptura adesiva de um corpo de prova: (a) reparado com ARE; (b) reparado com ARQ.	94
Figura 4.12 - Aspecto de ruptura monolítica de corpos de prova cilíndricos reparados.	98
Figura 4.13 - Aspecto da ruptura monolítica de corpos de prova cilíndricos reconstituídos com argamassa de reparo ARE.	98
Figura 4.14 - Aspecto da ruptura monolítica de um corpo de prova: (a) reparado com ARE; (b) reparado com ARQ.	99
Figura 4.15 - Aspectos de corpos de prova prismáticos reparados com CPR.	100
Figura 4.16 - Aspectos de corpos de prova prismáticos reparados com argamassa ARE.	100
Figura 4.17 - Aspectos de corpos de prova preenchidos com CPR.	102
Figura 4.18 - Aspectos dos corpos de prova preenchidos com argamassas de reparo.	102
Figura 4.19 - Aspectos dos corpo de prova de CPR após o ensaio de aderência a tração.	104
Figura 4.20 - Aspectos dos corpo de prova de ARQ após o ensaio de aderência a tração.	105

Figura 4.21- Aspectos dos corpo de prova de ARE após o ensaio de aderência a tração.	105
Figura 4.22 - Aspectos dos corpo de prova de ARZ após o ensaio de aderência a tração.	106
Figura A- 1. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do CB.	125
Figura A- 2. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do CPR.	126
Figura A- 3. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do ARQ.	127
Figura A- 4. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do ARZ.	128
Figura A- 5. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional da ARE.	129
Figura B- 1 . Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do CB. ...	131
Figura B- 2. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do CPR. ..	132
Figura B- 3. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do ARQ. .	133
Figura B- 4. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do ARZ...	134
Figura B- 5. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do ARE...	135
Figura A - 1. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do CB.	125
Figura A - 2. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do CPR.	126
Figura A - 3. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do ARQ.	127
Figura A - 4. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do ARZ.	128
Figura A - 5. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional da ARE.	129
Figura B- 1 . Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do CB. ...	131

Figura B- 2. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do CPR..	132
Figura B- 3. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do ARQ. .	133
Figura B- 4. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do ARZ...	134
Figura B- 5. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade até a ruptura do ARE...	135

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

E_{cs}	módulo de elasticidade secante do concreto
$E_{cs,CB}$	módulo de elasticidade secante do concreto base
$f_{ct,D}$	resistência à tração por compressão diametral do concreto
$f_{ct,D CB}$	resistência à tração por compressão diametral do concreto base
$f_{ct,f}$	resistência à tração na flexão
f_c	resistência à compressão do concreto
$f_{c,CB}$	resistência à compressão do concreto base
f_{ck}	resistência à compressão característica do concreto
$f_{b60,pr}$	resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (corpo de prova prismático ângulo de 60 ° com a horizontal)
$f_{b30,cil}$	resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (corpo de prova cilíndrico ângulo de 30 ° com a horizontal)
$f_{b,tf}$	resistência de aderência ao cisalhamento na flexão
$f_{b,cd}$	resistência de aderência ao cisalhamento direto
$f_{b,td}$	resistência de aderência a tração direta
R_a	resistência de aderência à tração
a/c	relação água/cimento
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARQ	Argamassa de Reparo Q
ARZ	Argamassa de Reparo Z
ARE	Argamassa de Reparo E
ANOVA	Análise de variância
BS	<i>British Standards</i>
CRD	<i>Concrete Research Division</i>
CPR	Concreto de Pós Reativos
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicatos de Cálcio Hidratados
CA	Compressão Axial
CV	Coeficiente de Variação
DP	Desvio Padrão
E_{cs}	Módulo de Elasticidade Secante
EN	<i>European Standards</i>
gl	Graus de Liberdade
HPC	<i>high performance concrete</i>
MQ	Média Quadrada
SST	<i>Slant Shear Test</i>
SQ	Soma de Quadrados

TF Aderência por cisalhamento na flexão

UH Umidade relativa

RESUMO

GUSMÃO, Anderson Caetano, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Utilização do concreto de pós reativos como material de reparo - ênfase na resistência de aderência.** Orientador: José Luiz Rangel Paes. Coorientadores: Leonardo Gonçalves Pedroti e Gustavo de Souza Veríssimo.

O mercado oferece diversos tipos de produtos para recuperação de estruturas. Devido aos diferentes tipos de problemas patológicos, tipos de substrato e condições ambientais, nem sempre é possível encontrar um produto que atenda a todas as exigências técnicas concomitantemente. O concreto de pós reativos (CPR) constitui-se uma boa opção como material de recuperação, por apresentar características como baixa permeabilidade e elevada resistência mecânica. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência de aderência do CPR ao concreto convencional, com vistas a examinar seu potencial de uso como material de reparo estrutural. Como parte do programa experimental desenvolvido, foi realizada a caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos e argamassas de reparo selecionadas para o estudo. Em seguida foram definidos os traços utilizados para a produção do concreto base, do CPR e da argamassa de reparo com aditivo expansor (ARE) e foi realizada a caracterização desses materiais no estado fresco e endurecido. Para efeitos de comparação, os corpos de prova foram reparados com CPR, a argamassa ARE e duas argamassas industrializadas (ARQ e ARZ). Foram realizados ensaios de avaliação da resistência de aderência com a devida caracterização do método de preparo das superfícies e dos procedimentos de reparação e cura dos corpos de prova. De acordo com os resultados, o CPR apresentou a menor absorção de água entre os materiais estudados. Este é um comportamento desejável para um bom material de reparo, tendo em vista que a absorção está intimamente ligada à durabilidade do material. Quanto à estabilidade dimensional, observou-se que para as primeiras horas o CPR apresentou uma retração maior do que as argamassas de reparo. Com base nos resultados dos ensaios de longa duração, observou-se também que o CPR se expandiu nas primeiras idades, enquanto que as argamassas de reparo industrializadas apresentaram um aumento significativo de retração ao longo do tempo. Quando à avaliação da resistência de aderência, de uma forma geral, para os diversos métodos utilizados o CPR apresentou um melhor desempenho quando comparado com os demais materiais de reparo estudados. Apesar da alta resistência à compressão e do elevado módulo de elasticidade, o CPR apresentou uma resistência de aderência igual ou superior às argamassas de reparo avaliadas, contrariando a ideia estabelecida no meio técnico de que o material de reparo não deve apresentar características mecânicas muito superiores ao do material de substrato. Os resultados alcançados indicam o bom potencial de uso do CPR como material de reparo estrutural.

ABSTRACT

GUSMÃO, Anderson Caetano, M.Sc., Federal University of Viçosa, February, 2017. **Use of reactive powders concrete as repair material - emphasis on adhesion resistance.** Advisor: José Luiz Rangel Paes. Co-advisors: Leonardo Gonçalves Pedroti and Gustavo de Souza Veríssimo.

The market offers several types of structures recovery products. Due to the distinct types of pathological problems, substrate types and environmental conditions, it is not always possible to find a product that meets with comply with all the technical requirements concomitantly. Reactive Powder Concrete (RPC) is an appropriate choice as a recovery material because it presents characteristics such as low permeability and high mechanical resistance. The objective of this work study was to evaluate the adhesion strength of RPC to conventional concrete, in order to examine its potential of use as structural repair material. As part of the experimental program developed, was performed the characterization of the materials used in the production of concrete and repair mortars selected for the study was carried out. Then, the traces used to produce the base concrete, the RPC and the repair mortars with the expander additive (ARE) were defined and the characterization of these materials in the fresh and hardened state was also carried out characterized. For comparison purposes, the specimens were repaired with RPC, ARE mortars and two industrialized mortars (ARQ and ARZ). Adhesion strength tests were performed with proper characterization of the surface preparation method and the repair and curing procedures of the specimens. According to the results, RPC presented the lowest water absorption among the studied materials. This is a the desirable behavior for good repair material, since absorption is closely linked to the durability of the material. As for Concerning dimensional stability, it was observed that, for the first hours, the RPC presented a larger retraction than the repair mortars. Based on the results of the long-term tests, it was also observed that RPC expanded at the earliest ages, while industrialized repair mortars showed a significant increase of retraction over time. When evaluating the adhesion strength, in general, for the different methods used, the RPC presented a better performance when compared to the other repair materials studied. Despite the high compressive strength and the high modulus of elasticity, the RPC showed a resistance of adhesion equal to or greater than the repair mortars evaluated, contrary to the idea established in the technical environment that the repair material should not present mechanical characteristics much higher than the ones of the substrate material. The results indicate the good potential of using RPC as structural repair material.

1

INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado podem ter o seu desempenho quanto à durabilidade comprometido em função de diversas causas como por exemplo: erros de execução, falhas na concepção estrutural, utilização de materiais inadequados, carregamentos impostos, danos provocados por acidentes, agentes agressivos, dentre outros.

Visando reestabelecer o desempenho da estrutura e impedir o avanço do processo de deterioração, geralmente são necessárias intervenções corretivas. Para uma correta escolha das técnicas e dos materiais de recuperação é importante a correta identificação

das fontes causadoras dos danos aos materiais e uma ampla avaliação das condições estruturais.

No mercado encontram-se disponíveis diversos produtos destinados à recuperação de estruturas. Entretanto, devido às diversas fontes de deterioração, tipos de substrato e condições ambientais, nem sempre é possível encontrar um produto que atenda a todas as exigências técnicas concomitantemente. Nesse sentido, fica evidente que existe um potencial de desenvolvimento de pesquisas que busquem propor novos materiais de recuperação ou mesmo a definição de novas aplicações para materiais já existentes.

Neste contexto, o concreto de pós reativos (CPR) mostra-se como uma boa opção para ser empregada como material de recuperação, por apresentar características como baixa porosidade, elevada resistência à penetração de agentes agressivos e alta resistência mecânica. O CPR é composto por uma mistura de pós cujos diâmetros máximos são inferiores a 2 mm, dentre os quais tem-se o cimento Portland, sílica ativa e pós minerais ultrafinos. São incorporados ainda aditivos de alta eficiência e água. É um material com o mínimo de defeitos em sua microestrutura, tais como microfissuras e poros, o que permite resistir a maiores tensões.

Dentre as diversas propriedades requeridas para que um material seja aplicado em trabalhos de recuperação estrutural com um desempenho satisfatório, a aderência e a retração devem ser tratadas com especial atenção. Essas propriedades estão ligadas à capacidade de ligação do material de recuperação ao substrato e a estabilidade dimensional da região recuperada. Cabe destacar que um material com elevada retração e baixa resistência de aderência não é adequado para uso em reparos estruturais, pois a instabilidade dimensional do material possivelmente induziria tensões que causariam deslocamento da camada de recuperação.

Neste trabalho, propõe-se avaliar a resistência de aderência do CPR ao concreto convencional, com vistas ao potencial de uso como material de reparo estrutural.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a resistência de aderência entre o concreto convencional e concreto de pós reativos por meio de ensaios mecânicos.

Os objetivos específicos são:

- identificar e selecionar materiais de reparo para estruturas de concreto, com características diferentes, disponíveis no mercado, que possam ser tomados como parâmetros de comparação para o presente estudo;
- avaliar as propriedades mecânicas do concreto convencional, do concreto de pós reativos e dos materiais de reparo selecionados;
- avaliar a resistência de aderência do concreto de pós reativos e dos materiais de reparo selecionados ao concreto convencional, por meio de diferentes métodos de ensaio;
- avaliar criticamente o potencial de aplicação do CPR como material de reparo de estruturas de concreto armado, quando comparado com os materiais de reparo selecionados.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

Há uma grande preocupação do mercado da construção civil com os aspectos relacionados à durabilidade, manutenção e a adequação das edificações a novos parâmetros e requisitos estabelecidos por normas.

Tem sido cada vez mais frequente a ocorrência de construções que apresentam problemas patológicos de forma precoce. Isso tem motivado novos estudos que buscam o desenvolvimento de tecnologias e parâmetros para aumentar o desempenho e durabilidade das estruturas de concreto armado.

Por outro lado, as manifestações patológicas já existentes requerem tratamentos adequados, que garantam sua estabilidade e durabilidade. Logo esta área também tem

motivado um número cada vez mais frequente de estudos que visam desenvolver e aprimorar o uso de materiais para reparo de estrutura de concreto armado.

O CPR possui algumas características que o credencia como um material de reparo em potencial. Entretanto se faz necessário conhecer mais profundamente suas propriedades quanto à aderência antes de efetivar sua utilização como material de reparo.

Nesse sentido, com o desenvolvimento do presente trabalho busca-se estudar a aderência do CPR com o substrato de concreto, com o intuito de contribuir para o desenvolvimento de uma linha de pesquisa relacionada ao desenvolvimento de materiais de reparação no âmbito da Área de Concentração em Engenharia da Construção do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 apresenta-se uma fundamentação teórica abordando todo o assunto que propicia o embasamento técnico e teórico para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, são analisadas as considerações gerais sobre o concreto e seus componentes. Ainda, foi elaborado um estudo sobre a microestrutura do concreto. Em seguida, foi feito um estudo do CPR e algumas de suas aplicações. Também foi elaborado o estudo da aderência do concreto com a argamassa. Por fim, são apresentadas considerações gerais para a caracterização dos métodos de reparo, incluindo as técnicas de recuperação, o preparo da superfície, os reparos superficiais, as pontes de aderência e a compatibilidade dos sistemas e materiais de reparo.

No Capítulo 3 é descrito todo o estudo experimental, apresentando-se as características de avaliação dos materiais utilizados, a fim de verificar as suas propriedades, e em conjunto, a sua aderência. Com a finalidade de estudo das caracterizações das propriedades dos materiais, serão especificados os ensaios realizados com os materiais utilizados na produção dos concretos e argamassas de reparo seguindo as diretrizes estabelecidas pelas normas vigentes. Ainda neste capítulo, são descritas as etapas de realização dos ensaios no estado fresco e endurecido.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os concretos e argamassas de reparo no estado fresco, endurecido. Na sequência apresenta-se uma análise estatística e uma discussão acerca dos resultados obtidos.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões gerais do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Quando as condições de serviço e/ou de segurança de uma estrutura de concreto são ameaçadas é necessário realizar algum tipo de recuperação, por meio de reparações ou de reforço. Segundo Souza (2009), as reparações referem-se, em geral, aos tratamentos das superfícies e das fissuras, à adição localizada de concreto, argamassas ou armaduras e à proteção dos materiais envolvidos. Já o reforço refere-se à adição de chapas coladas, à adição de armaduras ordinárias ou protendidas, ao encamisamento com concreto, argamassas especiais ou concreto projetado, à incorporação de perfis metálicos ou de

diferentes tipos de compósitos, dentre outros, que promovem o enrijecimento global da estrutura por adição de novos elementos.

De maneira geral, espera-se que os materiais de recuperação estrutural sejam capazes de restaurar a integridade dos elementos, de permitir um bom acabamento superficial e de evitar que a estrutura continue a se deteriorar. Para que isto seja possível, os materiais de recuperação devem apresentar as seguintes características (RIBEIRO, 2009):

- a) compatibilidade dimensional, química e eletroquímica;
- b) resistência mecânica compatível com a estrutura a ser recuperada;
- c) boa aderência;
- d) durabilidade;
- e) facilidade de aplicação.

No contexto da recuperação das estruturas de concreto, os concretos de pós reativos (CPR) podem ser entendidos como uma alternativa de material de reparação de elementos estruturais devido às características físicas, químicas e mecânicas que apresentam.

Um estudo realizado por Lee *et al.* (2007), avaliou o uso do concreto de pós reativos como material de reparo, buscando analisar a durabilidade e a qualidade da aderência ao concreto existente. As amostras foram avaliadas quanto as suas características mecânicas através de ensaios destrutivos e os resultados obtidos demonstraram que o CPR apresenta um grande potencial para ser utilizado como material de reparo.

Tayeh *et al.* (2015) avaliou a qualidade da aderência do concreto de pós reativos ao substrato de concreto convencional, tendo obtido resultados que atestam um bom desempenho de aderência do CPR como material de reparo.

Neste Capítulo são apresentados os fundamentos teóricos essenciais para desenvolvimento do presente trabalho. Apresenta-se um breve relato sobre as origens, aplicações, materiais componentes e características mecânicas dos concretos de pós reativos. Tendo em vista o foco do trabalho, em seguida são apresentados alguns fundamentos relacionados à aderência aço-concreto e concreto-concreto. Por último são apresentados os procedimentos para a avaliação experimental da aderência.

2.2 CONCRETOS DE PÓS REATIVOS

2.2.1 Breve histórico e aplicações

O concreto de pós reativos (CPR) surgiu inicialmente na França por meio de pesquisas realizadas desde de 1990, por iniciativa de um grupo de pesquisadores da École Centrale de Nantes e da École Nationale Supérieure de Cachan. Posteriormente, a colaboração científica entre os pesquisadores franceses e pesquisadores da Université de Sherbrooke Canadá, propiciou um avanço nos estudos relacionados ao CPR e sua primeira aplicação em obras. O CPR foi desenvolvido com o objetivo principal de substituir o concreto de alto desempenho, diminuir ou até eliminar o uso de armaduras e atender algumas exigências específicas das estruturas de concreto pré-moldado submetidas a ambientes agressivos. Em virtude de suas características mecânicas, o CPR também passou a ser estudado e utilizado para atender às exigências de obras para militares.

O primeiro registro sobre o uso do CPR refere-se à passarela de Sherbrooke - Canadá, projetada pela empresa Le Groupe Teknika. Trata-se de uma estrutura composta por uma viga inferior sem armaduras passivas, com 96 cm largura e 38 cm de altura. Nessa viga estão conectados tubos de aço, preenchidos com CPR, que suportam uma casca de 3 cm de espessura por 3,30 m de largura (CHRIST, 2011). Figura 2.1 apresenta-se o aspecto geral desta passarela.



Figura 2.1 - Aspectos gerais da passarela Sherbrooke - Canadá (CHRIST, 2011).

Outra obra feita com o CPR foi a estação de trem de Shawnessy, em Calgary - Canadá, cuja cobertura é composta por cascas côncavas em CPR. Nessa obra havia a necessidade de um concreto com alta resistência estrutural e de uma estrutura leve, conforme observa-se na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Estação de trem de Shawnessy - Canadá (CHRIST, 2011).

O CPR também foi utilizado em uma passarela em Seonyu, Seul - Coreia do Sul, construída com um material denominado *Ductal*, uma marca comercial de concreto de pós reativos. O arco central da passarela possui 120 m de vão livre e um deck de 4,30 m de largura, com espessura de 3 cm.



Figura 2.3 - Passarela em Seonyu, Seul - Coréia do Sul (TUTIKIAN, 2011).

Outro exemplo de aplicação do CPR foi a reconstrução da torre do sino da cidade de Laval - França (SOTO, 2013). Nesse caso conseguiu-se uma redução de cinco vezes no peso próprio da estrutura e uma perspectiva de ganho significativo na vida útil da construção (Figura 2.4).



Figura 2.4 - Torre do sino, Laval - França (FORMAGINI, 2006).

2.2.2 Materiais componentes dos concretos de pós reativos

Segundo Biz (2001), o concreto de pós reativos (CPR), como é conhecido no Brasil, foi desenvolvido por Richard e Cheyrezy (1995), a partir do *high performance concrete* (HPC) que é um dos materiais desenvolvidos mais recentemente, baseado no uso do cimento Portland.

A palavra "pós", no caso do CPR, é o plural da palavra pó, e refere-se ao pó ultrafino

utilizado na sua composição. O CPR pode atingir uma resistência à compressão de até 800 MPa com aplicação de cura térmica e cura sob pressão.

O CPR é composto basicamente por cimento, agregado miúdo, sílica ativa, pó ultrafino, aditivos de alta eficiência e água, podendo ou não ter adição de fibras de pequenas dimensões. A relação água/cimento (a/c) utilizada é muito reduzida, situando-se entre 0,15 e 0,20.

A seguir apresentam-se as principais características dos materiais componentes do CPR:

a) cimento

O tipo de cimento exerce uma grande influência nas características do CPR, sendo indispensável que o mesmo apresente uma alta resistência mecânica. A seleção do cimento Portland para o CPR é feita em função de duas características: sua composição e quantidade de finos e a compatibilidade com o aditivo de alta eficiência.

Em relação à composição, é preferível se utilizar um cimento mais puro e com menor quantidade de finos, já que cimentos com alta finura *Blaine* não são considerados satisfatórios para o uso em CPR, em virtude da demanda de água necessária para sua hidratação (COPOLLA *et al.*, 1997). Um cimento Portland com alto Módulo de Sílica (MS) é o mais indicado para o CPR em função de suas características reológicas, porém esse tipo de cimento apresenta uma taxa lenta de pega, o que pode comprometer seu uso em alguns casos (Biz, 2001). Para Bonneau *et al.* (1996), o cimento mais indicado para a produção de CPR é o cimento Portland comum (CP-I), mas o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) também é recomendado por alguns autores.

A compatibilidade do cimento com o aditivo de alta eficiência é um aspecto fundamental para a produção do CPR, visto que o aditivo é componente o que permite o uso de uma relação água/cimento baixa;

b) agregado miúdo

O agregado miúdo mais utilizado para produção do CPR é a areia de quartzo, que é o agregado de maior diâmetro máximo na mistura. O agregado miúdo utilizado no CPR

deve ter um diâmetro máximo médio de 250 µm, devendo se situar na faixa de 150 µm a 600 µm. Esse agregado pode ser obtido a partir do peneiramento de pedra britada ou a partir da extração de agregado miúdo natural, sendo que a primeira possui grãos de formato angular e a segunda grãos mais arredondados. Ambos são adequados para a produção de CPR, porém o agregado miúdo natural demanda um menor consumo de água e, por esse motivo, torna-se preferível (VANDERLEI, 2004).

Segundo Biz (2001), a baixa granulometria do agregado utilizado no CPR é essencial para obtenção de uma menor permeabilidade, bem como para a melhor homogeneização dos materiais. A granulometria da areia de quartzo deve ser muito bem definida para evitar vazios na mistura (RICHARD e CHEYREZY, 1995). De acordo com Aitcin (2000), o agregado miúdo deve apresentar um módulo de finura entre 2,7 e 3,0, que o caracteriza como um agregado miúdo mais grosso. Essa característica é importante para o CPR, que, por sua natureza, apresenta uma grande quantidade de partículas finas. Portanto, o uso de um agregado miúdo mais grosso, permite reduzir a quantidade de água necessária para a mistura e favorece a obtenção de resistências mais elevadas;

c) sílica ativa

A sílica ativa é a adição mineral mais utilizada e indicada para a produção do CPR devido à sua forma arredondada e ao seu tamanho, que chega a ser até 100 vezes menor que o cimento (TUTIKIAN *et al.*, 2011). Segundo Larrard (1989), o seu uso em concretos se deve principalmente aos seguintes aspectos: ao enchimento dos vazios entre as partículas de cimento, à melhoria das propriedades reológicas e à produção de hidratos secundários. Outro efeito do tamanho reduzido das partículas da sílica é a redução da exsudação interna e superficial, importante no aspecto micro estrutural e na zona de transição entre pasta e agregado e entre a pasta e armadura (GOLDMAN e BENTUR, 1989).

A relação sílica ativa: cimento deve ser de aproximadamente 0,25:1, proporção esta que corresponde ao melhor empacotamento e que proporciona a quantidade necessária de sílica ativa para consumir a cal que se forma no processo de hidratação do cimento. Normalmente, a hidratação do cimento Portland no CPR é incompleta e a quantidade de sílica excedente atua como microfiller (VANDERLEI, 2004).

De acordo com Reis (1998), o uso de sílica ativa contribui positivamente com a durabilidade dos concretos em geral, pois ela reduz a exsudação do concreto fresco e torna o concreto endurecido mais impermeável aos ataques químicos, além de promover um aumento significativo da aderência do concreto aos substratos. A combinação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio durante o processo de hidratação do cimento gera cristais de silicato de cálcio hidratado, que é um subproduto mais fino que os cristais dos grãos de cimento e são responsáveis pelo aumento da resistência do concreto;

d) pó ultrafino

O pó de quartzo é o pó ultrafino mais utilizado e indicado para a produção do CPR. Os pós ultrafinos são adicionados ao concreto de pós reativos para contribuir com o fechamento do pacote granulométrico. Para isso, o tamanho das partículas deve se situar na faixa de 5 μm e 25 μm . Segundo Biz (2001), o pó ultrafino fecha os vazios entre os grãos de areia e intensifica as reações pozolânicas durante o tratamento térmico, quando o mesmo for empregado;

e) aditivos de alta eficiência

Os aditivos de alta eficiência mais utilizados na produção do CPR são os superplastificantes ou superfluidificantes. Esses aditivos são fundamentais para permitir o uso de uma baixa relação a/c no CPR, com uma consistência compatível com a sua utilização.

Segundo Cheyrezy (1999), o uso de aditivos superplastificantes ou superfluidificantes no CPR se deve às seguintes necessidades: aumentar a trabalhabilidade do concreto sem alterar a sua composição; diminuir a relação a/c e, conseqüentemente, aumentar a resistência e a durabilidade e reduzir a quantidade de cimento para minimizar os efeitos de retração e tensões internas.

A dosagem desses aditivos é realizada de forma experimental e influenciada pelo tipo de cimento, devendo ser feitos ensaios de compatibilidade como o cone de Minislump e o cone de Marsh (GOMES, 2002). É necessário determinar o ponto de saturação, ou seja, o ponto em que o aditivo deixa de agir como tal, para agir somente como água na mistura.

2.2.3 Dosagem dos concretos de pós reativos

No âmbito brasileiro, Vanderlei (2004) desenvolveu um trabalho de pesquisa sobre a dosagem do CPR com o objetivo de obter concretos de elevada resistência à compressão, utilizando areia de quartzo e pó de quartzo da região de Descalvado, localizadas no interior do Estado de São Paulo. Esse trabalho pode ser tomado como uma referência para a dosagem do CPR no Brasil, em função dos bons resultados alcançados.

Para definição do traço, Vanderlei (2004) utilizou modelos matemáticos por meio dos quais se buscou obter a maior densidade possível para o concreto, ou seja, o menor número de vazios. Para isto foi necessário dispor de agregados miúdos e pó ultrafino com distribuição granométrica adequada, o que só foi possível por meio de um processo de beneficiamento.

2.2.4 Características dos concretos de pós reativos

O CPR foi idealizado a fim de minimizar defeitos como fissuras e poros capilares, o que é obtido com o aumento da compactidade e da resistência dos materiais constituintes. Segundo Cheyrezy (1999), as principais características do CPR são:

- aumento da homogeneidade causada pela eliminação do agregado graúdo;
- aumento da compactidade pela otimização granulométrica e aplicação de pressão antes e depois da pega;
- progresso da microestrutura pelo tratamento térmico após o endurecimento;
- melhora da ductilidade pela adição de fibras de aço;
- manutenção dos procedimentos de mistura e moldagem tão próximos quanto possível dos padrões já existentes, de modo a gastar o menor tempo entre as operações.

Em função das três primeiras características citadas anteriormente, se obtém uma matriz com alta resistência à compressão, porém com baixa ductilidade, o que pode ser melhorado com a adição de fibras de aço, que também confere resistência à tração ao CPR (VANDERLEI, 2004).

2.3 MICROESTRUTURA DO CONCRETO

2.3.1 Considerações preliminares

Em sua composição o concreto apresenta uma microestrutura complexa e heterogênea, o que torna difícil representá-la por meio de modelos simplificados (REIS, 1998). Todavia, para compreender melhor o comportamento dos concretos é necessário estudar a sua microestrutura e as características individuais de suas partes constituintes. As partes constituintes da microestrutura do concreto são: pasta de cimento hidratada, fase agregado e zona de transição da interface entre a pasta de cimento e o agregado. Na Figura 2.5 apresenta-se um esquema da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado.

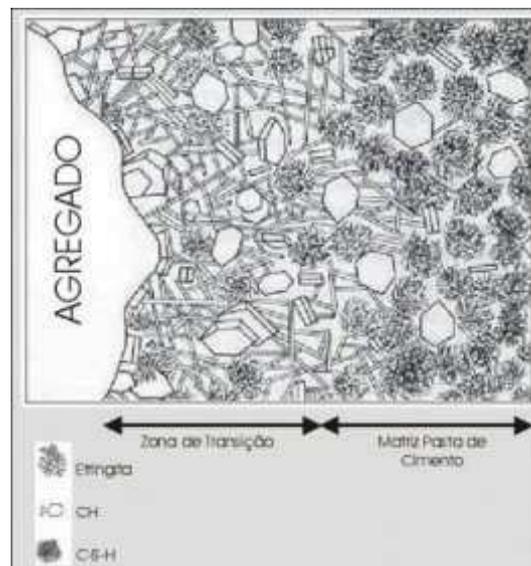


Figura 2.5 - Representação esquemática da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

As relações entre a microestrutura e as características do concreto ainda não estão plenamente desenvolvidas. No entanto, é importante compreender a influência da microestrutura sobre algumas características dos concretos, como resistência, elasticidade, retração, fluência, fissuração e durabilidade.

2.3.2 Microestrutura da fase agregado

A fase agregado é o principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto. As características do concreto endurecido dependem principalmente da densidade e da resistência do agregado, que têm uma relação direta com a porosidade do mesmo. A forma e a textura dos agregados também afetam as características do concreto.

Dependendo do tipo de rocha e da escolha do processo de beneficiamento, os agregados podem apresentar uma proporção considerável de partículas achatadas ou alongadas, que afetam negativamente várias características do concreto. Quanto maior o tamanho do agregado e a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior será a tendência de acúmulo de filme de água junto à superfície do agregado, enfraquecendo a zona de transição na interface pasta-agregado, fenômeno chamando de exsudação (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.3.3 Microestrutura da pasta de cimento hidratada (pasta de cimento Portland)

O cimento anidro é um pó cinza composto de partículas angulares, com dimensões que variam normalmente de 1 μm a 50 μm . É produzido a partir da moagem do clínquer com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, sendo o clínquer uma mistura heterogênea de vários compostos, produzidos por reações sob altas temperaturas entre óxido de cálcio e sílica e alumina e óxido de ferro (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A relação entre microestrutura e as características da pasta de cimento hidratada serão descritas a seguir:

a) resistência

A principal fonte de resistência dos produtos sólidos da pasta de cimento hidratada são as forças de atração de Van der Waals. A aderência entre duas superfícies sólidas pode ser atribuída a essas forças físicas, sendo o grau de adesividade dependente da extensão e da natureza das superfícies envolvidas.

Há uma relação inversa entre a porosidade e a resistência nos sólidos, sendo os vazios prejudiciais à resistência. O espaço interlamelar da estrutura do C-S-H e os pequenos vazios que estão sob influência das forças de atração de Van der Waals não são considerados prejudiciais à resistência, porque a concentração de tensão e a subsequente ruptura quando ocorre a aplicação de carga começam nos grandes vazios capilares e nas microfissuras invariavelmente presentes. O volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada depende da quantidade de água da mistura adicionada ao cimento no início da hidratação e do grau de hidratação do cimento;

b) estabilidade dimensional

A pasta de cimento hidratada e saturada não possui estabilidade dimensional. Desde que mantida a 100% de umidade relativa (UH), praticamente nenhuma variação dimensional ocorrerá. No entanto, quando exposto à umidade ambiente, que normalmente é muito menor que 100%, o material começa a perder água e retrai;

c) durabilidade

A pasta de cimento hidratada é alcalina e a exposição às águas ácidas pode ser prejudicial à mesma. Sob essa condição de exposição, a impermeabilidade ou a estanqueidade tornam-se fatores preponderantes para a durabilidade. A impermeabilidade da pasta de cimento hidratada é uma característica desejável porque se acredita que uma pasta impermeável resultaria em um concreto impermeável, já que o agregado é geralmente considerado impermeável.

2.3.4 Microestrutura da zona de transição da interface

Como no caso da pasta de cimento hidratada, as forças de atração de Van der Waals são responsáveis pela aderência entre os produtos de hidratação e as partículas de agregado. Portanto, a resistência da zona de transição da interface entre a pasta de cimento e o agregado em qualquer região do concreto depende do volume e tamanho dos vazios existentes (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Além do grande volume de vazios capilares e cristais de hidróxido de cálcio orientados, um dos aspectos responsáveis pela baixa resistência da zona de transição da interface no concreto é a presença de microfissuras. A quantidade de microfissuras depende de muitos parâmetros, incluindo o tamanho do agregado e a sua distribuição granulométrica, consumo de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto no estado fresco, condições de cura, umidade ambiente e histórico térmico do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A zona de transição da interface, que geralmente é o elo mais fraco da corrente, é considerada como a parte limitante da resistência no concreto. É por causa da presença da zona de transição da interface que ocorre a ruptura do concreto para um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência dos outros dois componentes principais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.4 ADERÊNCIA DO CONCRETO

2.4.1 Considerações preliminares

Segundo Fernandes (2011), o estudo de aderência do concreto envolve diversos parâmetros e tem a finalidade de avaliar o comportamento dos materiais envolvidos na transmissão de esforços que se desenvolvem nas ligações entre os componentes do concreto. Essa ligação entre diferentes materiais é de grande importância para o concreto armado, visto que o seu funcionamento depende do trabalho conjunto de materiais com características bastante diferentes (aço e concreto).

A aderência tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores desde o início do uso do concreto armado. É possível encontrar vários trabalhos que abordam o assunto de forma direta e indireta, dividindo-se o tema em duas linhas de pesquisa principais: os trabalhos que analisam a aderência aço-concreto e os trabalhos que exploram a aderência entre os diferentes tipos de concreto. Segundo Santana (2004), há uma grande familiaridade entre as duas abordagens, pois na aderência aço-concreto existem três fases distintas, assim como na aderência concreto-concreto. No primeiro grupo de estudos tem-se a fase aço, a

fase concreto e a zona de transição entre eles. Analogamente, no segundo grupo tem-se as fases concreto velho, concreto novo e a zona de transição entre eles. Em ambas abordagens a zona de transição é a fase mais fraca e, caso sejam melhoradas as propriedades de aderência dos concretos, obtém-se uma melhor transmissão de esforços entre as distintas fases.

2.4.2 Aderência aço-concreto

O comportamento das estruturas de concreto armado é assegurado pelo fenômeno da aderência existente entre aço e concreto, o que garante que os materiais trabalhem em conjunto, de forma solidária.

A aderência entre aço e concreto tem importância decisiva para a capacidade última de um elemento de concreto armado, já que dela depende a eficiência da transmissão de esforços entre aço e concreto. A aderência assegura a igualdade de deformações específicas entre a armadura e o concreto que a envolve.

A aderência aço-concreto é constituída por duas parcelas principais: adesão e atrito. A adesão é um fenômeno físico-químico, que ocorre entre a pasta de cimento e a barra de aço. O atrito é um fenômeno mecânico, que ocorre entre o concreto e as nervuras da barra de aço.

A aderência aço-concreto é avaliada pela relação entre a tensão de cisalhamento no concreto circunvizinho à armadura e o deslocamento relativo entre os dois materiais, provocado pela diferença entre as deformações específicas de cada um.

2.4.3 Aderência concreto-concreto

A aderência concreto-concreto não armada deve-se inicialmente à adesão e posteriormente ao atrito, conforme mostrado na Figura 2.6.

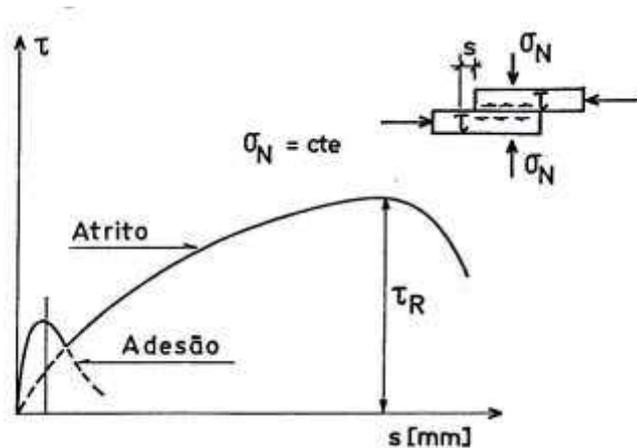


Figura 2.6 - Transferência de carga, mecanismo de aderência (SOUZA, 1990).

A adesão é um fenômeno físico-químico que surge na interface entre concreto novo e concreto velho durante as reações de hidratação do cimento, ou seja, é a ação de colagem, originada da adesão ou de forças capilares que acontecem na interface de ligação entre os concretos. A pasta de cimento do concreto novo penetra nas ranhuras do concreto velho, possibilitando esta ligação. Essa parcela de aderência, isoladamente, não é suficiente para uma boa ligação, sendo deteriorada por pequenos deslocamentos ou baixas solicitações.

A adesão é influenciada pelos seguintes fatores (SOUZA, 2009):

- a) rugosidade da superfície de ligação;
- b) tratamento da superfície de ligação;
- c) uso de agentes adesivos ou de concretos ou argamassas especiais;
- d) modo de aplicação do material de reparação.

O atrito é um fenômeno mecânico, que ocorre entre o concreto novo e o concreto velho. A resistência por atrito manifesta-se depois de rompida a adesão, desde que existam pressões transversais ao concreto novo, decorrentes de tensões de compressão transversais provocada por ações externas, retração ou expansão do mesmo concreto.

O atrito concreto-concreto decorrente da presença de saliências na superfície do concreto do substrato. Essas saliências funcionam como peças de apoio, mobilizando as tensões de compressão no concreto. Por meio de um intertravamento mecânico entre o concreto novo e o substrato, formam-se consoles de concreto na zona de transição (Figura 2.7), que são

solicitados ao cisalhamento e à compressão, antes que haja o deslizamento relativo entre os materiais. É o tipo de ligação mais efetiva e confiável, pois contribui, de maneira fundamental, para a solidarização dos dois materiais (SANTANA, 2004).

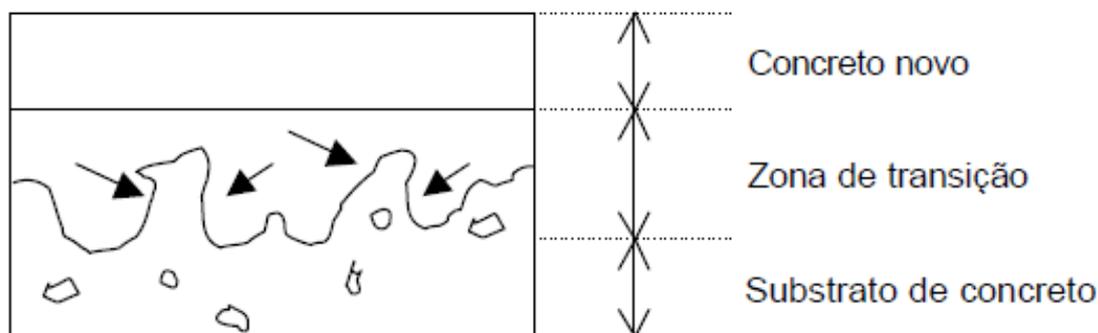


Figura 2.7 - Esquema da zona de transição entre concreto novo e substrato de concreto (EMMONS e VAYSBURD, 1996).

Segundo Souza (2009), o atrito é influenciado pelos seguintes fatores:

- a) forma e tamanho dos agregados;
- b) rugosidade da superfície;
- c) resistência à compressão do concreto;
- d) tensão de compressão aplicada externamente à ligação;
- e) existência de cargas cíclicas;

No âmbito dos materiais de reparação, as argamassas representam um caso particular dos concretos, que também são aplicadas sobre o concreto velho ou do substrato.

De acordo com Carasek (1997), quando a argamassa no estado plástico entra em contato com a superfície absorvente, o substrato, parte da água de amassamento, que contém em dissolução ou em estado coloidal os constituintes do aglomerante, penetra pelos poros e cavidades do substrato. No interior deles, ocorrem fenômenos de precipitação, seja dos géis de silicato do cimento ou do hidróxido de cálcio. Transcorrido algum tempo, esses precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa à base.

Carasek (1997) estudou a aderência de seis diferentes traços de argamassas a seis diferentes tipos de substratos. O autor afirma com base nos resultados obtidos nos estudos com microscopia eletrônica de varredura (MEV), analisando a aderência das argamassas ao substrato bloco cerâmico, que a resistência de aderência da argamassa endurecida ao

substrato é um efeito essencialmente mecânico, que ocorre basicamente devido à penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação. Porém por meio do estudo realizado o autor não conseguiu chegar a mesma conclusão em relação aos demais substratos estudados (não cerâmicos), no entanto, afirmou de forma intuitiva que devido a similaridade dos poros dos substratos o mecanismo de aderência é equivalente.

Segundo Tavares (2000) e Barbosa (2001), não é possível determinar cada parcela de aderência concreto-concreto isoladamente. Essa separação tem apenas um caráter didático, para melhor compreensão dos fenômenos. Além disso, há outros fatores que influenciam a aderência, como a retração e a fissuração do concreto, bem como a transferência parcial da tensão nas regiões entre fissuras. Dessa forma, por meio de ensaios, determinam-se valores médios globais de aderência.

De acordo Clímaco (1991)¹ *apud* Reis (1998), os ensaios usados na avaliação da aderência concreto-concreto devem simular um estado de tensões que represente, o melhor possível, as condições de serviço. Esses ensaios devem apresentar um baixo coeficiente de variação, sendo sensível à propriedade medida, e devem possuir um procedimento de teste de simples reprodução.

2.5 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA ADERÊNCIA

2.5.1 Considerações preliminares

Existem vários métodos de ensaio para avaliar a resistência de aderência de argamassas e concretos aplicados sobre substratos porosos. A principal diferença entre eles está

¹ CLÍMACO, J. C. T. (1991), *Uma análise crítica dos métodos de avaliação de aderência e do uso de agentes adesivos no reparo de estruturas de concreto*. In: XXV JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL. Porto Alegre, RS, Brasil, novembro 11-15, 1991.

relacionada ao tipo de força que é aplicada na interface entre os dois materiais. Nesse item são descritos os métodos mais utilizados.

A Mecânica Clássica utiliza os símbolos σ e τ para representar as tensões normais e tangenciais solicitantes, respectivamente. Por outro lado, para representar as tensões resistentes dos materiais em geral, a normalização internacional atual utiliza a letra f . Nesse contexto, f_c representa a resistência à compressão, f_t a resistência à tração e f_b a resistência de aderência de um material. No presente trabalho optou-se por utilizar a nomenclatura adotada no âmbito da normalização internacional.

2.5.2 Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão

2.5.2.1. Ensaio de reconstituição do prisma

No contexto internacional o ensaio de reconstituição do prisma é denominado *Slant Shear Test* (SST) e o método ensaio, normalizado pela BS EN 12615:1999², permite avaliar a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão para as seguintes situações típicas:

- concreto endurecido aderido a concreto endurecido;
- concreto fresco aderido a concreto endurecido.

O ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão consiste basicamente na aplicação de uma força axial de compressão no sentido longitudinal de um corpo de prova. O método de ensaio descrito na BS EN 12615:1999 prevê a utilização de um corpo de prova produzido a partir de um prisma de concreto base com dimensões de 100 x 100 x 400 mm, serrado segundo uma superfície inclinada a 60° com a horizontal.

Clímaco (1990) e Garcia (1998) utilizaram um método de ensaio com os mesmos procedimentos daquele descrito na BS EN 12615:1999 para avaliar a resistência de

² BS EN 12615:1999 – *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of slant shear strength.*

aderência entre concreto base e material de reparo, com e sem a utilização de adesivos na interface. A fim de avaliar a aderência entre concreto base e material de reparo é necessário reconstituir uma das partes serradas de um corpo de prova de concreto base com um material de reparo qualquer, conforme mostrado na Figura 2.8. A força axial de compressão aplicada no corpo de prova gera uma tensão de cisalhamento oblíqua, cuja magnitude é função do ângulo de inclinação da superfície de aderência (60° com a horizontal).

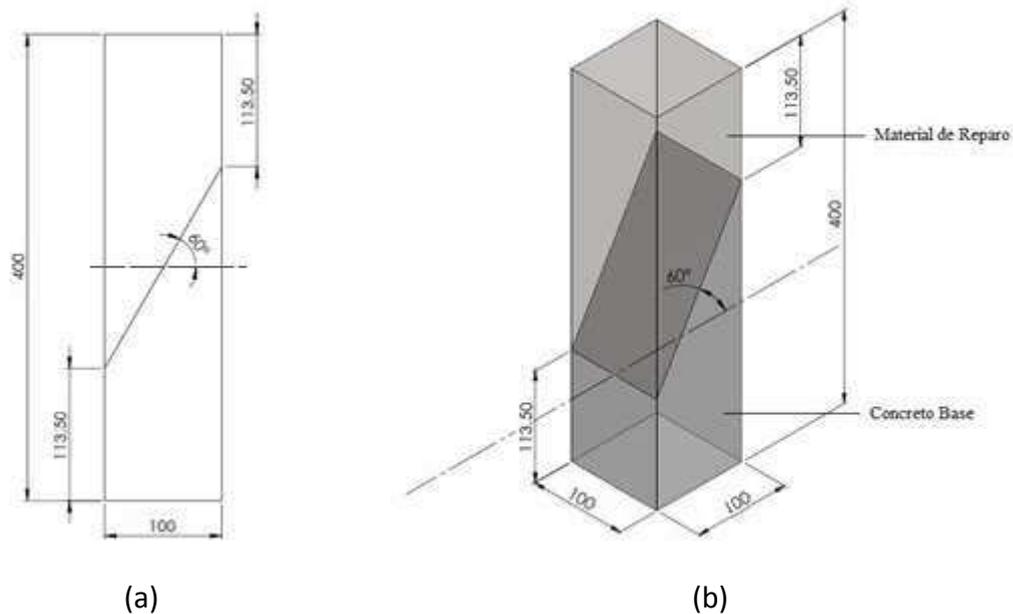


Figura 2.8 - Esquema do corpo de prova prismático utilizado no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão segundo a BS EN 12615:1999: a) vista lateral; b) perspectiva (dimensões em milímetros).

Com a força axial de compressão máxima obtida no ensaio determina-se a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (f_b) entre concreto base e material de reparo adicionado.

Para corpos de prova prismáticos com dimensões de 100 x 100 x 400 mm, com superfície inclinada a 60° com a horizontal, conforme previsto pela BS EN 12615:1999, a resistência de aderência de cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b60,pr}$) é dada por:

$$f_{b60,pr} = \frac{F\sqrt{3}}{40000} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

2.1

onde:

F é a força máxima, expressa em newtons (N).

Além de determinar a resistência de aderência de cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b60,pr}$), a BS EN 12615:1999 requer que também seja caracterizado o modo de ruptura observado no ensaio, sendo previstos os seguintes tipos:

- Tipo A - ruptura monolítica em um dos dois substratos de concreto;
- Tipo B - ruptura adesiva em uma das interfaces entre concreto e adesivo;
- Tipo C - ruptura monolítica do adesivo utilizado para ligação de dois concretos distintos;
- Tipo D - ruptura adesiva em ambas interfaces entre concreto e adesivo.

Tendo em vista o objetivo do presente trabalho de avaliar a aderência entre concreto base e material de reparo sem a utilização de adesivos na interface, pode-se adaptar os modos de ruptura previstos na BS EN 12615:1999 conforme se segue:

- Tipo A - ruptura monolítica (no concreto base ou no material de reparo);
- Tipo B - ruptura adesiva (na interface entre concreto base e material de reparo).

Esse ensaio é de grande importância no estudo da aderência pois simula uma situação usual em elementos de concreto reparados, nos quais a força de compressão atua sobre superfícies inclinadas, produzindo tensões normais e de cisalhamento.

2.5.2.2. Ensaio de reconstituição do cilindro

Segundo Helene (1988), considerando que a resistência do concreto para fins estruturais é normalmente avaliada por meio de corpos de prova cilíndricos, dois pesquisadores americanos (Krieg e Nordby) propuseram um ensaio para avaliar a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em juntas de concreto inclinadas e ligadas com adesivo epóxi. O ensaio consiste basicamente na aplicação de uma força axial de compressão no sentido longitudinal de um corpo de prova cilíndrico, com 150 mm de

diâmetro e 300 mm de altura, previamente cortado em duas metades, com superfície inclinada a 60° com a horizontal, conforme mostrado na Figura 2.9.

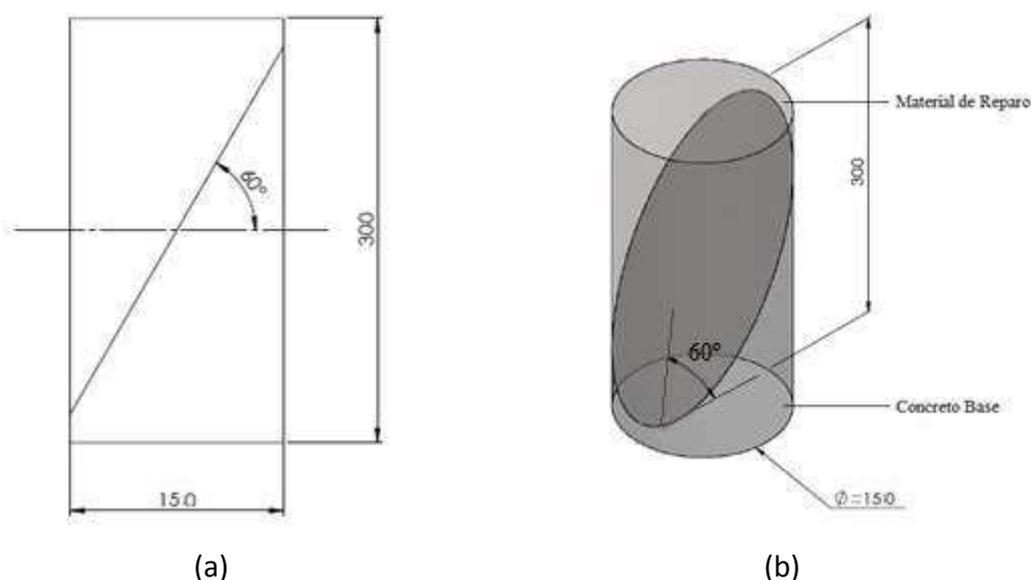


Figura 2.9 - Esquema do corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (HELENE, 1988) (dimensões em milímetros).

A American Society of Test Materials (ASTM) também dispõe de um método de ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão, do tipo *Slant Shear Test* (SST). O método proposto pela ASTM C882:2005³ permite avaliar a resistência de aderência de sistemas de base epoxídica ao concreto. De acordo com esse método de ensaio deve-se utilizar um corpo de prova cilíndrico, com 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura, previamente cortado em duas metades, com superfície inclinada a 60° com a horizontal, conforme mostrado na Figura 2.10. Esse método de ensaio permite determinar a resistência de aderência entre concreto endurecido aderido a concreto endurecido ou entre concreto fresco aderido a concreto endurecido, unidos por meio de adesivo de base epoxídica.

³ ASTM C882 / C882M-13a – *Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

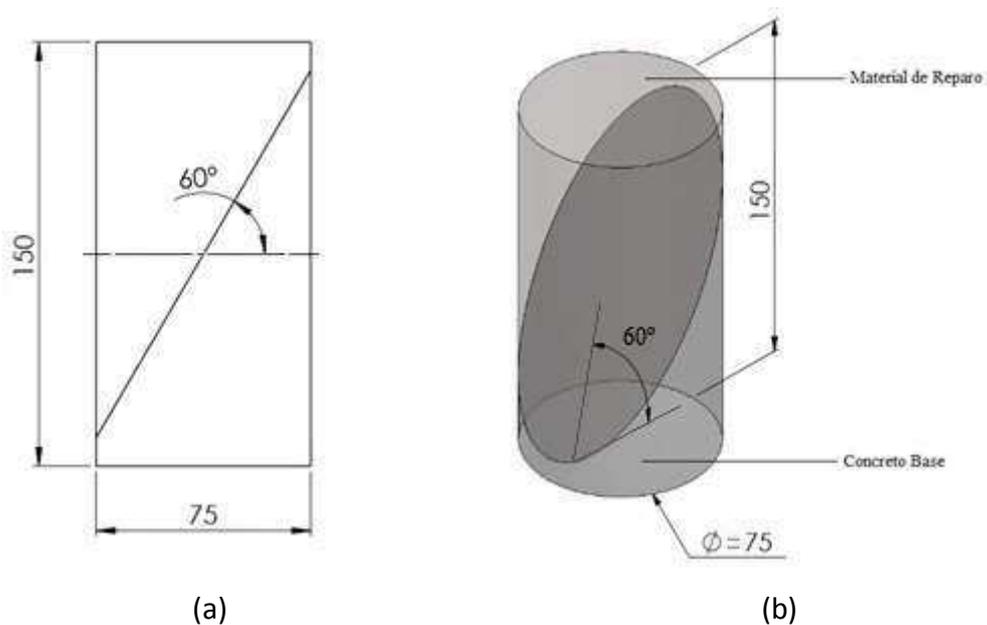


Figura 2.10 - Esquema do corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão segundo a ASTM C882:2005(dimensões em milímetros).

Guerrante (2013) desenvolveu um estudo teórico-experimental visando analisar o estado de tensões atuantes em interfaces de aderência de corpos de prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, colados com adesivo epóxi e formados por concretos de resistências distintas, cortados com diferentes inclinações com a horizontal (30°, 45° e 60°). Na Figura 2.11 apresenta-se um esquema do corpo de prova utilizado por Guerrante (2013) com superfície inclinada a 30° com a horizontal.

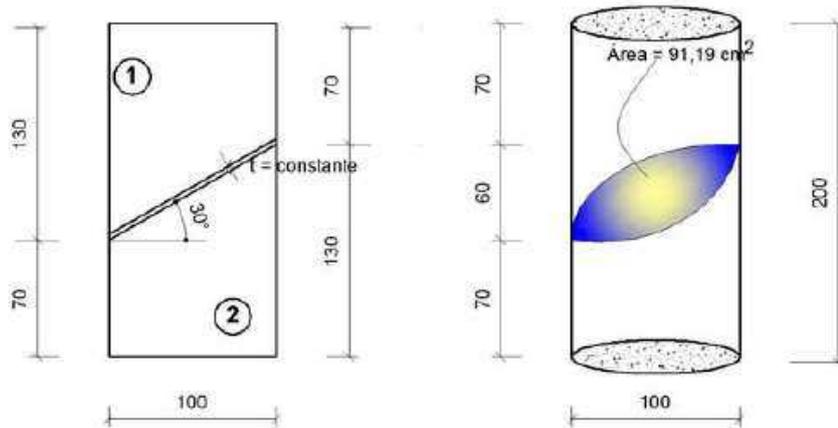


Figura 2.11 - Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em juntas de concreto inclinadas ligadas com adesivo, entre concretos de diferentes resistências (GUERRANTE, 2013) (dimensões em milímetros).

Para corpos de prova cilíndricos com relação altura/diâmetro = 2, previamente cortado em duas metades segundo um ângulo θ com a horizontal, a resistência de aderência de cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b\theta,cil}$) é dada por:

$$f_{b\theta,cil} = \frac{F \operatorname{sen} \theta \cos \theta}{A} \quad (N/mm^2) \quad 2.2$$

onde:

F é a força máxima, expressa em newtons (N);

A é a área da seção transversal do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm^2).

De uma maneira sintética, os métodos de ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão, do tipo *Slant Shear Test* (SST), realizados sobre corpos de prova cilíndricos permitem avaliar a resistência de aderência entre o concreto base e um material de reparo qualquer. Pode-se destacar que a conveniência de se utilizar o ensaio de reconstituição do cilindro deve-se ao fato dos corpos de prova já serem normalmente empregados para outros ensaios de caracterização mecânica do concreto endurecido.

2.5.3 Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão

De acordo com Santana (2004), para se determinar a resistência de aderência ao cisalhamento na flexão ($f_{b,cf}$) utiliza-se um corpo de prova prismático com dimensões de 100 x 100 x 400 mm, que possui um entalhe em forma trapezoidal na sua face inferior, no qual se aplica um material de reparo Figura 2.12. Este ensaio é prescrito pela AFNOR NF P 18-851:1992⁴.

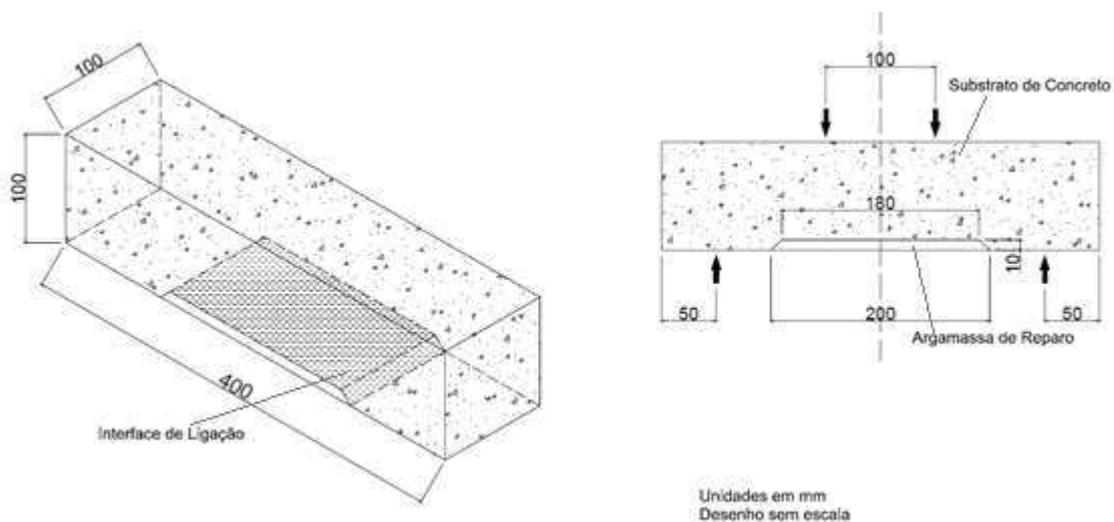


Figura 2.12 - Esquema do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (adaptado de MORENO JR e SELMO, 2007).

Para realização do ensaio aplicam-se forças concentradas na superfície superior de um corpo de prova prismático biapoiado, distantes de 100 mm entre si, posicionando-o com o reparo voltado para baixo (Figura 2.12). Na interface entre a superfície horizontal do concreto base e o reparo surgem tensões de cisalhamento puro, enquanto que nas duas faces inclinadas dessa interface surge uma combinação de tensões de cisalhamento e de tração (SANTANA, 2004).

⁴ AFNOR NF P 18-851/1992 – *Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci.*

Segundo Santana (2004), a avaliação do tipo de ruptura é um aspecto fundamental na interpretação dos resultados. A AFNOR NF P 18-851:1992 prevê a ocorrência de cinco formas distintas de ruptura:

- Tipo C - ruptura monolítica, somente no concreto, sem comprometimento do sistema de reparo;
- Tipo M - ruptura monolítica, com o rompimento do reparo e propagação da fissura para o prisma de concreto;
- Tipos I-1 e I-2 - ruptura com o desprendimento da parte inclinada do reparo e desenvolvimento da fissura para o concreto;
- Tipo D - ruptura adesiva com o desprendimento do reparo e subsequente rompimento do concreto.

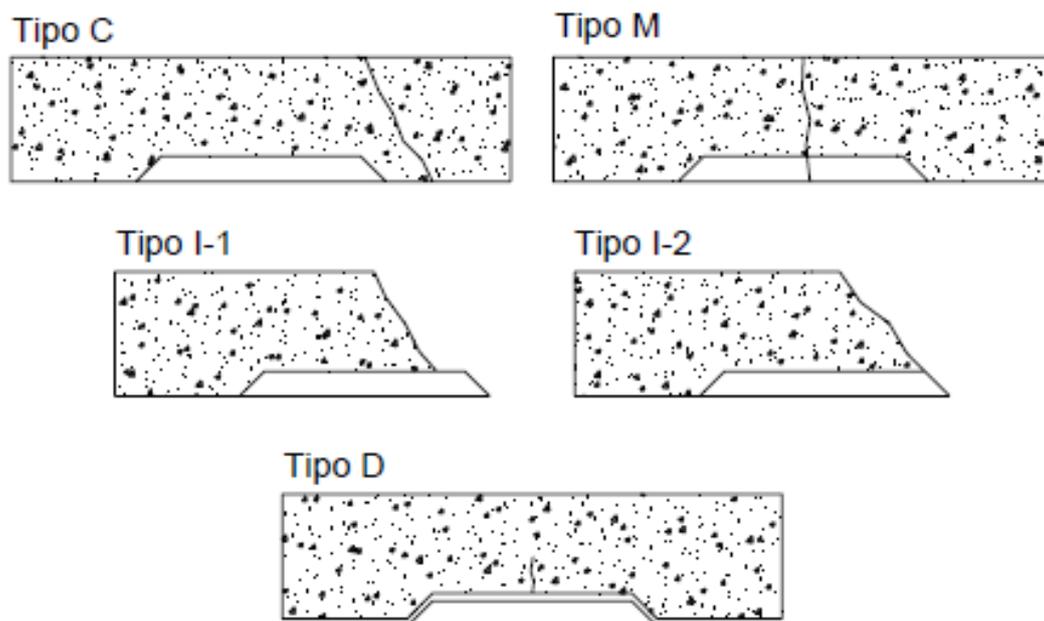


Figura 2.13 - Possíveis tipos de ruptura no ensaio aderência ao cisalhamento na flexão (MORENO JR e SELMO, 2007).

Segundo Garcia (1998), o ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão pode apresentar uma variação de padrões de comportamento devido à variabilidade da resistência à tração e do módulo de elasticidade do concreto base e do material de reparo.

É importante destacar ainda que os resultados do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão têm um caráter qualitativo, sendo a avaliação realizada com base no tipo de ruptura do corpo de prova. Fundamentalmente, essa avaliação permite interpretar a qualidade da ligação entre o concreto base e o material de reparo.

2.5.4 Resistência de aderência ao cisalhamento direto

2.5.4.1 Ensaio de corpo de prova composto de três prismas

Segundo Helene (1988), os resultados mais satisfatórios para determinação da resistência de aderência ao cisalhamento direto são obtidos com o emprego do método de ensaio CRD C 590, recomendado pelo *Corps of Engineers - U. S. Army*. Este procedimento consiste basicamente em um ensaio de compressão realizado sobre um corpo de prova composto de três prismas de concreto, conforme mostrado na Figura 2.14.

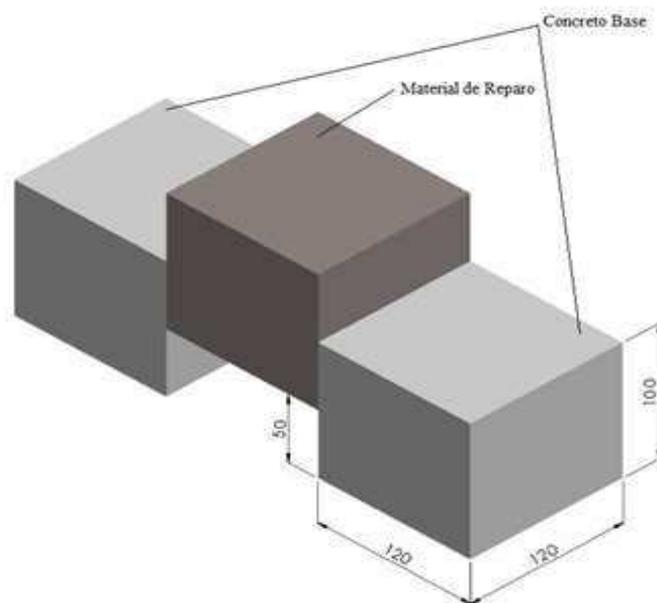


Figura 2.14 - Esquema do ensaio de resistência ao cisalhamento direto em corpo de prova composto de três primas (HELENE, 1988) (dimensões em milímetros).

Para se determinar a resistência de aderência ao cisalhamento direto por meio do método de ensaio CRD C 590, deve-se confeccionar um corpo de prova formado por dois prismas de concreto base e um de material de reparo (Figura 2.14). Além disso, deve-se confeccionar também um corpo de prova monolítico de referência, com as mesmas

características geométricas daquele composto por três prismas, moldado de uma única vez com o concreto base.

Para realização do ensaio, posiciona-se o corpo de prova sobre uma superfície plana e aplica-se uma força concentrada na superfície superior do prisma central (Figura 2.14). Com essa configuração de ensaio, busca-se produzir um cisalhamento direto na interface entre os prismas de concreto base e o de material de reparo.

A partir desses modelos determina-se a resistência de aderência da ligação entre concreto base e material de reparo. Adicionalmente, deve-se também avaliar a superfície de ruptura do corpo de prova.

A resistência de aderência ao cisalhamento direto ($f_{b,cd}$) é calculada a partir de:

$$f_{b,cd} = \frac{F}{A_1 + A_2} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad 2.3$$

onde:

F é a força máxima, expressa em newtons (N);

A_1 e A_2 são as áreas de contato dos prismas das extremidades com o prisma central, expressas em milímetros quadrados (mm²).

A resistência de aderência ao cisalhamento direto é uma característica mecânica de difícil mensuração, pois nos ensaios para sua determinação sempre existe a possibilidade de ocorrerem excentricidades que produzem esforços secundários devido à flexão do corpo de prova e acabam por prejudicar a qualidade dos resultados e a repetitividade dos procedimentos. Nesses casos, o colapso do corpo de prova pode ser governado pela falha do concreto base ou do material de reparo à tração na flexão.

2.5.4.2 Ensaio de corpo de prova de um único prisma

A determinação da resistência de aderência ao cisalhamento direto pode ser realizada também com a utilização de um só prisma de concreto, com dimensões de 40 x 40 x 160 mm, formado por duas partes, sendo uma de concreto base e outra de material de reparo (Figura 2. 15).

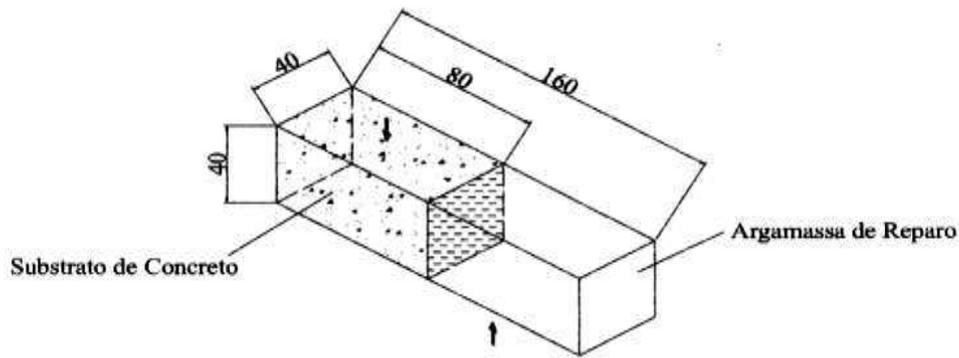


Figura 2. 15 - Esquema do ensaio de resistência ao cisalhamento direto em corpo de prova composto de um único prisma (SANTANA, 2004) (dimensões em milímetros).

O ensaio consiste basicamente na aplicação direta de uma força transversal ao corpo de prova prismático (Figura 2.15).

Segundo Santana (2004), nessa configuração de ensaio não são produzidas tensões de compressão ou de tração na interface entre concreto base e material de reparo, gerando apenas tensões de cisalhamento. A tensão máxima de cisalhamento é determinada dividindo-se a força de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova.

Apesar da aparente simplicidade deste ensaio, é importante destacar que não é fácil realizar um ensaio de cisalhamento direto em um elemento de concreto, além da própria dificuldade em se produzir um corpo de prova reparado com as dimensões indicadas na Figura 2.15.

2.5.5 Resistência de aderência à tração direta

O ensaio para determinação da resistência de aderência à tração direta entre concreto base e material de reparo não é normalizado no Brasil e é denominado "*Pull-off*" no âmbito internacional.

Existem algumas configurações possíveis para a realização desse ensaio, como mostradas na Figura 2.16. O método de ensaio mais usual é o apresentado na Figura 2.16-c, em que o material de reparo é aplicado sobre a superfície de uma placa de concreto base, os corpos de prova são cortados com uma serra copo formando cilindros, e posteriormente são

arrancados com a aplicação de uma força de tração perpendicular à superfície de contato entre o material de reparo e o concreto base.

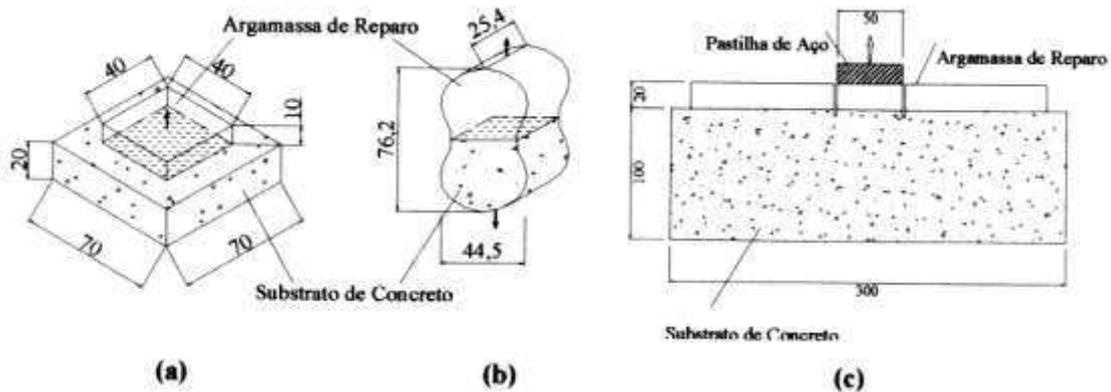


Figura 2.16 - Configurações utilizadas para o ensaio de resistência de aderência à tração direta (SANTANA, 2004) (dimensões em milímetros).

Em função da ausência de uma norma específica para este fim no Brasil, pode-se admitir que esta característica seja determinada de acordo com os procedimentos de ensaio estabelecidos pela ABNT NBR 13528:2010⁵, que trata da determinação da resistência de aderência de argamassas aplicadas sobre um substrato qualquer.

O tipo de ruptura é um aspecto fundamental na interpretação dos resultados desse ensaio. A ABNT NBR 13528:2010 prevê a ocorrência de duas formas distintas de ruptura:

- ruptura na interface material de reparo/concreto base - o valor da resistência de aderência à tração é igual ao valor obtido no ensaio;
- ruptura no material de reparo ou no concreto base - o valor da resistência de aderência à tração não pode ser determinado e é maior do que o valor obtido no ensaio. O valor obtido no ensaio deve ser apresentado precedido pelo sinal maior que (>).

⁵ NBR 13528:2010 – *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.*

A resistência de aderência à tração direta $f_{b,td}$ ⁶ é dada por:

$$f_{b,td} = \frac{F}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad 2.4$$

onde:

F é a força máxima, expressa em newtons (N);

A é a área da seção transversal do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm²).

Por meio do ensaio de resistência de aderência à tração direta pode-se inferir que essa característica é superior à resistência à tração do concreto quando a ruptura ocorre fora da interface entre o concreto base e o material de reparo. Pode-se destacar ainda que esse ensaio pode apresentar uma importante dispersão de resultados devido à variabilidade típica da resistência à tração do concreto e das argamassas.

2.6 PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES PARA AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA

2.6.1 Considerações Preliminares

A seleção da técnica de recuperação de uma estrutura de concreto depende fundamentalmente do grau de deterioração da mesma e dos mecanismos de degradação identificados. As intervenções em uma estrutura abrangem reparações ou reforços. As reparações envolvem os tratamentos de superfícies e fissuras, a adição localizada de concreto, argamassas ou armaduras e a proteção da estrutura.

⁶ No âmbito da ABNT NBR 13528:2010, a resistência de aderência à tração direta é designada pelo símbolo R_a , enquanto que no contexto do presente trabalho optou-se por designar esta característica pelo símbolo $f_{b,td}$, a fim de adequar essa simbologia ao contexto internacional.

Segundo Ripper e Souza (1998), de acordo com a profundidade, com o grau de deterioração e com a finalidade desejada, os reparos são classificados como rasos (profundidade inferior a 2 cm), semiprofundos (profundidade entre 2 e 5 cm) e profundos (profundidade acima de 5 cm).

De um modo geral, as técnicas de reparação requerem a remoção das partes degradadas e a preparação da superfície, antes da aplicação dos materiais de reparo. Na

Figura 2.17 pode-se observar a anatomia de um reparo em uma estrutura de concreto.

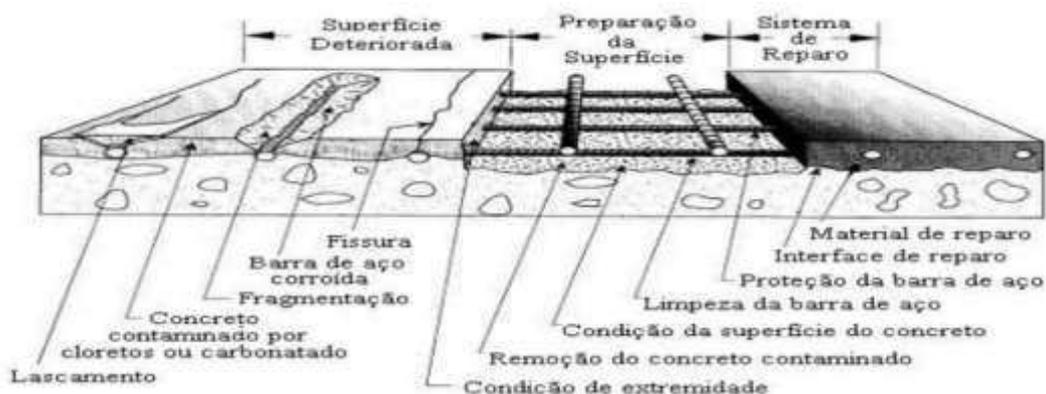


Figura 2.17 - Anatomia de um reparo em uma estrutura de concreto (EMMONS e VAYSBURD, 1996).

Segundo Helene (1992), alguns autores consideram que os procedimentos de preparo e de limpeza do substrato são responsáveis por 50% ou mais do sucesso de um reparo. Para Emmons (1994), esses procedimentos são os mais críticos do processo de recuperação estrutural, uma vez que influenciam diretamente na qualidade da aderência entre o reparo e o substrato de concreto. Reis (2001) afirma que o preparo do substrato é responsável por grande parte do sucesso do reparo estrutural, ou seja, o concreto base deve ter resistência adequada e solidez para receber o tratamento, sendo essencial também a preparação da superfície.

No âmbito da avaliação experimental da aderência, a preparação da superfície do substrato de concreto é um aspecto fundamental, pois os resultados de resistência de aderência são fortemente influenciados pelos procedimentos utilizados antes da aplicação do material de reparo. Portanto, para que se possa comparar técnicas e materiais de reparo sob o ponto de vista da resistência de aderência é necessário adotar procedimentos que

sejam capazes de produzir condições semelhantes àsquelas encontradas no campo nas superfícies dos corpos de prova.

2.6.2 Tipos de Preparação da superfície do substrato

Dentre os procedimentos mais comuns de preparação de superfícies do substrato de concreto destacam-se: a escarificação manual (ponteiros e marretas) e mecânica (martelos rompedores pneumáticos), o desbaste superficial com utilização de discos ou equipamentos específicos, o lixamento e escovamento manual e/ou elétrico e o jateamento por via seca ou úmida. A limpeza da superfície a ser reparada pode ser feita por meio de aspiração, jato de água fria ou quente, jato de ar comprimido, vapor de água, soluções ácidas e alcalinas, solventes, dentre outros.

Abu-Tair *et al.* (2000) desenvolveram um trabalho com a finalidade de propor um método de quantificação da rugosidade superficial do substrato de concreto e seus efeitos na ligação entre o reparo e o substrato. Nesse estudo foram considerados cinco tipos de superfície: lisa, preparada com tiro de agulha, preparada manualmente com cinzel, preparada manualmente com escova de aço e fraturada. Foram utilizados três tipos de materiais de reparo: uma resina epoxídica, um material cimentício modificado e um concreto de cimento Portland comum. Os resultados indicaram que o procedimento de preparação manual da superfície com auxílio de cinzel foi o que levou à obtenção dos maiores valores de resistência de aderência.

Os métodos para avaliação experimental da aderência citados no Item 2.5 não definem a forma de preparação da superfície do substrato de concreto de forma objetiva, prescrevendo somente que essas superfícies devem ser limpas e apresentar uma rugosidade adequada. As conclusões obtidas por Abu-Tair *et al.* (2000) indicam que a preparação manual da superfície de concreto com auxílio de cinzel é o procedimento mais adequado para se obter os maiores valores de resistência de aderência e pode ser admitido como um padrão de referência para realização dos ensaios.

2.7 REQUISITOS DE DESEMPENHO PARA PRODUTOS DE REPARAÇÃO ESTRUTURAL

Os materiais de reparo de estruturas de concreto podem ser divididos em dois grupos: os industrializados e os produzidos em obra. Esses materiais devem apresentar propriedades físicas, mecânicas e químicas adequadas à finalidade para a qual foram projetados. No âmbito internacional, a NP EN 1504-3:2006⁷ define requisitos mínimos de desempenho para materiais de reparo, conforme apresentado na Tabela 2.1.

⁷ NP EN 1504-3:2006 – *Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão; Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade; Parte: 3 Reparação estrutural e não estrutural.*

Tabela 2.1 - Requisitos apresentados no Quadro 3 da NP EN 1504-3:2006.

Características do desempenho	Método de ensaio	Requisitos			
		Estrutural		Não-Estrutural	
		Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
Resistência à compressão	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
Teor de cloretos	EN 1015-17	≤ 0,05%		≤ 0,05%	
Aderência	EN 1542	≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Retração/expansão impedidas	EN 12617-4	Resistência de colagem após ensaio			Sem requisito
		≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Durabilidade-Resistência à carbonatação	EN 13295	dk ≤ betão de controlo (MC (0,45))		Sem requisito	
Durabilidade-Compatibilidade térmica ciclos gelo-degelo	EN 12617-4	Resistência de colagem após 50 ciclos			Inspeção visual após 30 ciclos
		≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Durabilidade-Compatibilidade térmica ciclos térmicos com chuva	EN 12617-4	Resistência de colagem após 30 ciclos			Inspeção visual após 30 ciclos
		≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Durabilidade-Compatibilidade térmica ciclos térmicos sem chuva	EN 12617-4	Resistência de colagem após 30 ciclos			Inspeção visual após 30 ciclos
		≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Modulo de elasticidade	EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	Sem requisito	
Resistência ao deslizamento	EN 13036-4	Classe I: > 40 unidades ensaiadas molhadas Classe II: > 40 unidades ensaiadas secas Classe III: > 55 unidades ensaiadas molhadas		Classe I: > 40 unidades ensaiadas molhadas Classe II: > 40 unidades ensaiadas secas Classe III: > 55 unidades ensaiadas molhadas	
Coefficiente de dilatação térmica	EN 1770	Não requerido se forem realizados os ensaios 7, 8 e 9; senão, valor declarado		Não requerido se forem realizados os ensaios 7, 8 e 9; senão, valor declarado	
Absorção capilar (permeabilidade a água)	EN 13057	≤ 0,5 kg/m ² .h ^{0,5}		≤ 0,5 kg/m ² .h ^{0,5}	Sem requisito

3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Este Capítulo abrange a caracterização dos materiais e métodos utilizados no programa experimental do presente trabalho. Inicialmente são apresentadas as características dos materiais utilizados para produção dos concretos e argamassas. Em seguida apresentam-se os traços utilizados para a produção do concreto base, do CPR e de uma argamassa de reparo, assim como alguns aspectos relevantes da produção dos mesmos e a caracterização desses materiais no estado fresco e endurecido. Por último, apresentam-se

os ensaios de avaliação da aderência desenvolvidos no presente trabalho, ressaltando-se o preparo das superfícies e os procedimentos de reparação e cura dos corpos de prova.

Na Figura 3.1 apresenta-se uma síntese do programa experimental desenvolvido.

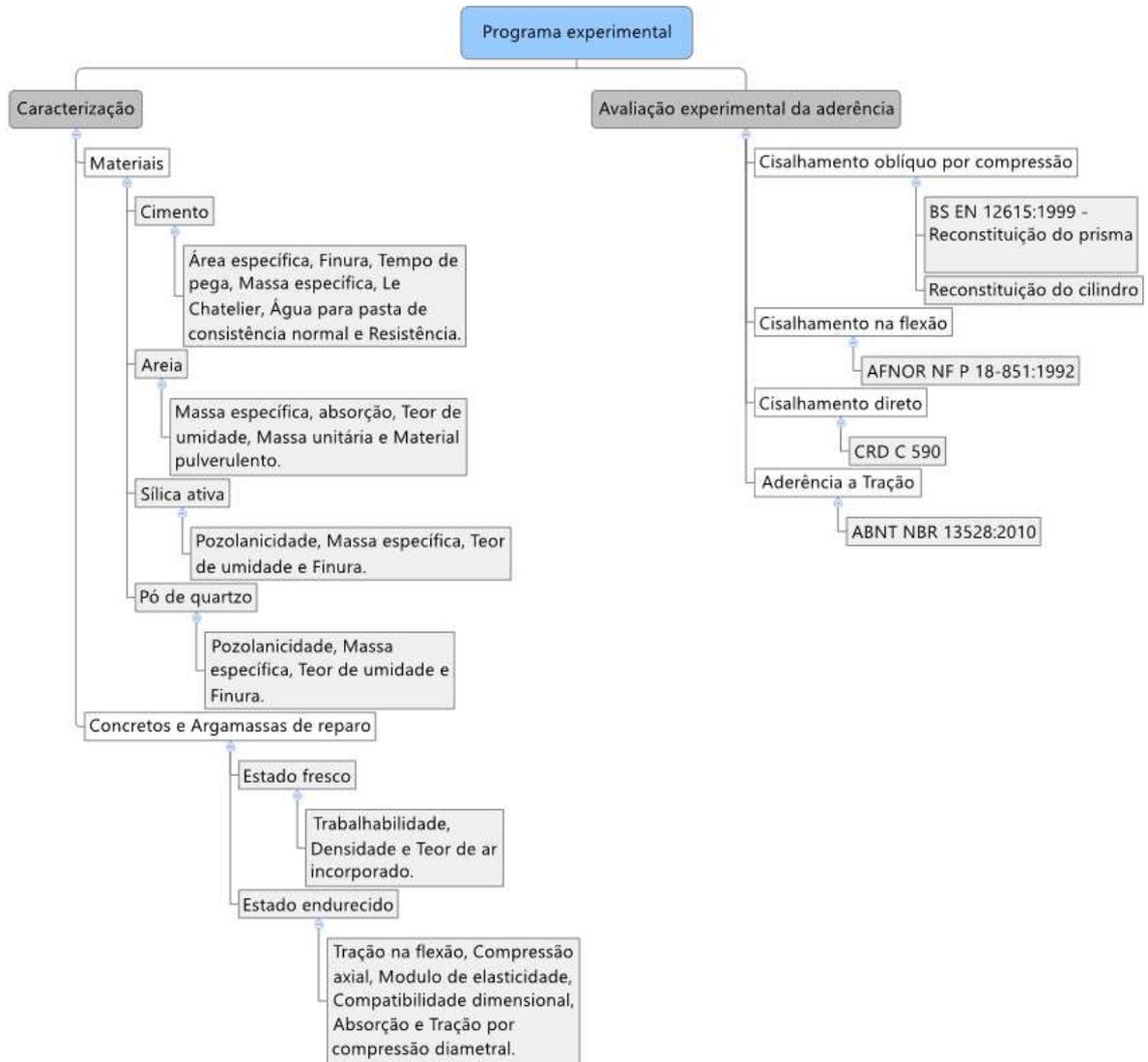


Figura 3.1 - Síntese do programa experimental desenvolvido.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E ARGAMASSAS

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado para produção do CPR e da argamassa de reparo foi o CP V-ARI, da empresa Holcim. Os resultados da análise química e dos ensaios físicos foram fornecidos pela empresa fabricante, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características químicas e físicas do cimento CP V-ARI da Holcim.

Relatório de ensaios físicos e análise química do cimento					
ENSAIOS	PERÍODO	10.09.2013 26.09.2013	28.09.2013 15.10.2013	17.10.2013 02.11.2013	LIMITES NBR 5733
R 1 dia (MPa)	MÉDIA	27,5	28,3	28,9	≥14,0
	Desv. Pad.	0,41	0,98	0,65	
	NBR 7215	Nº Amostras	8	8	
R 3 dia (MPa)	MÉDIA	39,5	39,9	40,2	≥24,0
	Desv. Pad.	0,5	0,41	0,75	
	NBR 7215	Nº Amostras	8	8	
R 7 dia (MPa)	MÉDIA	43,4	44,4	44,7	≥34,0
	Desv. Pad.	0,37	0,72	0,72	
	NBR 7215	Nº Amostras	8	8	
R 28 dia (MPa)	MÉDIA	52,8	53,1		-
	Desv. Pad.	0,78	1,01		
	NBR 7215	Nº Amostras	8	6	
ANÁLISE QUÍMICA (%)					
PF 1000°C	NBR NM 18	3,93	3,76	3,55	≤4,5
SiO ₂	NBR 14656				
R.I.	NBR NM 15	0,85	0,85	0,86	≤1,0
Al ₂ O ₃	NBR 14656				
Fe ₂ O ₃	NBR 14656				
CaO	NBR 14656				
MgO	NBR 14656	0,78	0,73	0,73	
SO ₃	NBR 14656	2,78	2,81	2,81	≤4,5
CO ₂	NBR NM 20	2,71	2,62	2,71	≤3,0
K ₂ O	NBR 14656				
PF 500°C	IT Holcim	0,99	1,02	0,79	
C ₃ A (Teórico)	Equação Bogue	7,60	7,66	7,81	
ENSAIOS FÍSICOS					
# 400 (%)	MÉDIA	1,9	1,5	1,6	-
	Desv. Pad.	0,27	0,32	0,33	
IT Holcim	Nº Amostras	8	8	8	
# 325 (%)	MÉDIA				-
	Desv. Pad.				
NBR 9202	Nº Amostras				
Blaine (cm ² /g)	MÉDIA	4913	4744	4867	≥3000
	Desv. Pad.	50	116	116	
NBR NM 76	Nº Amostras	8	8	8	
Início Pega (min)	MÉDIA	126	123	121	≥60
	Desv. Pad.	5	8	9	
NBR NM 65	Nº Amostras	8	8	8	
Fim Pega (min)	MÉDIA	180	177	179	≤600
	Desv. Pad.	8	10	14	
NBR NM 65	Nº Amostras	8	8	8	
Exp. Quente (mm)	MÉDIA				≤5
	Desv. Pad.				
NBR 11582	Nº Amostras				

Nota: Dados fornecidos pelo fabricante.

Para caracterização completa do cimento foram realizados os ensaios de massa específica segundo a ABNT NBR NM 23:2001, finura de acordo com a ABNT NBR 11579:2012, área específica segundo a NBR 16372:2015, pasta de consistência normal segundo a ABNT NBR NM 43:2003, tempos de pega de acordo com a ABNT NBR NM 65:2002, expansibilidade de *Le Chatelier* segundo a ABNT NBR 11582:2016 e resistência à compressão segundo a ABNT NBR 7215:1996. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e os seus resultados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios de caracterização do cimento.

Ensaio realizado		Limites ABNT NBR 5733:1991	
Massa específica (g/cm ³)	3,08	-	
Finura (%)	0,24	≤ 6	
Área específica (m ² /kg)	521	≥ 300	
Água para pasta de consistência normal (%)	33	-	
Tempos de pega (min)	Início	142	≥ 60
	Fim	180	≤ 600
Expansibilidade de <i>Le Chatelier</i> (mm)	a Frio	0,1	≤ 5
	a Quente	0	≤ 5
Resistência à compressão do cimento - 28 dias (MPa)	50,1	≥ 40	

Em função dos resultados apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, pode-se observar que todos as características do cimento atendem aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 5733:1991.

3.2.2 Agregados miúdos

Todos os procedimentos de coleta e de amostragem dos agregados foram realizados segundo a ABNT NBR NM 26:2009. Para caracterização dos agregados foram realizados os ensaios de massa específica no estado saturado de superfície seca da areia pelo método do picnômetro, massa unitária de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006, absorção de água da areia segundo ABNT NBR NM 30:2001, composição granulométrica segundo a

ABNT NBR NM 248:2003 e teor de material pulverulento segundo a ABNT NBR NM 46:2003.

3.2.2.1 Areia de quartzo

A areia de quartzo utilizada na produção do CPR foi fornecida pela Mineração Jundu, de Descalvado - SP e é classificada pela ABNT NBR 7211:2009 como areia muito fina. Na Figura 3.2 pode-se observar o aspecto geral da areia de quartzo utilizada.



Figura 3.2 - Aspecto geral da areia de quartzo.

Na Tabela 3.3 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da areia de quartzo realizados no LMC / DEC da UFV.

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de caracterização da areia de quartzo.

Características	Unidade	Valor
Massa específica	g/cm ³	2,65
Massa unitária	g/cm ³	1,5
Absorção	%	0,13
Teor de umidade	%	0,01
Material pulverulento	%	-

Em função dos resultados apresentados na Tabela 3.3, pode-se observar que a areia de quartzo apresentou uma absorção baixa de 0,13% e é isenta de material pulverulento.

Essas características permitem antever que a quantidade de água demandada para o preparo do traço do CPR deverá ser menor.

3.2.2.2 Areia artificial

A areia artificial utilizada na produção da argamassa de reparo foi fornecida pela empresa Pedreira Um Valemix Ltda, empresa de mineração localizada em Timóteo-MG.

Nas Tabela 3.4 e Tabela 3.5 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da areia artificial, realizados no Laboratório de Materiais da empresa Pedreira Um Valemix Ltda., em Santana do Paraíso - MG.

Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios de caracterização da areia artificial.

Características	Unidade	Valor
Massa específica	g/cm ³	2,7
Massa unitária	g/cm ³	1,38
Absorção	%	0,8
Teor de umidade	%	0
Material pulverulento	%	6,5

Tabela 3.5 - Composição granulométrica da areia artificial.

Peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada
9,5	0,00	0,00	0
6,3	0,00	0,00	0,00
4,8	0,00	0,00	0,00
2,4	0,39	0,09	0,09
1,2	51,44	11,67	11,75
0,6	80,78	18,32	30,07
0,3	82,18	18,64	48,71
0,15	88,42	20,05	68,76
0,075	84,59	19,18	87,94
Fundo	53,17	12,06	100,00
Massa inicial	441,51	Dim. Máx.	2,4 mm
Massa final	440,97	M. Finura	2,47

3.2.3 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada para produção do CPR é comercializada pela empresa Elkem (Figura 2.3). De acordo com a empresa, o material segue as especificações da ABNT NBR 13956-1:2012 e apresenta as faixas de variação de características físicas indicadas na Tabela 3.6.



Figura 2.3 - Aspecto geral da sílica ativa.

Tabela 3.6 - Características físicas da sílica ativa da empresa Elkem.

Características	Unidade	Valor
Densidade Específica	g/cm ³	2,2 - 2,3
Massa Unitária	kg/m ³ aprox.	150 - 700
Superfície Específica	m ² /g	15 - 30
Tamanho da partícula primária	µm	0,15 (≈ 80% das partículas, em massa, possuem diâmetro > 0,5 µm)

Na Tabela 3.7 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da sílica ativa realizados no LMC / DEC da UFV.

Tabela 3.7 - Resultados dos ensaios de caracterização da sílica ativa.

Características	Unidade	Valor
Massa específica	g/cm ³	2,21
Finura	%	61,26
Teor de umidade	%	1,55
Pozolanidade	ΔmS/cm	0,75

Em função dos resultados apresentados na Tabela 3.7, pode-se afirmar que, segundo o critério de Luxan, a sílica ativa possui atividade pozolânica moderada.

3.2.4 Pó de quartzo

O pó de quartzo utilizado na produção do CPR também foi fornecido pela Mineração Jundu, de Descalvado - SP. Algumas características desse material foram fornecidas pela empresa, conforme Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Características físicas e químicas do pó de quartzo, Mineração Jundu.

Ensaio Granulométrico				
Elemento	Abertura	Resultado	Acumulada	Unidade
# 325	45	7.6	7.6	%
Outros Parâmetros				
Elemento	Resultado			Unidade
Temperatura	27.0			°C
Parâmetros Químicos				
Elemento	Resultado			Unidade
Umidade	0.030			%
Perda ao Fogo	0.020			%
Teor de SiO ₂	> 99.000			%
Teor de Fe ₂ O ₃	< 0.050			%
Teor de Al ₂ O ₃	< 0.300			%
Teor de TiO ₂	< 0.035			%

Na Figura 2.4 observa-se o aspecto geral do pó de quartzo utilizado.



Figura 2.4 - Aspecto geral do pó de quartzo.

Na Tabela 3.9 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do pó de quartzo realizados no LMC / DEC da UFV.

Tabela 3.9 - Resultados dos ensaios de caracterização do pó de quartzo.

Características	Unidade	Valor
Massa específica	g/cm ³	2,64
Finura	%	0,78
Teor de umidade	%	0,21
Pozolanicidade	$\Delta mS/cm$	0,15

Em função dos resultados apresentados na Tabela 3.9, pode-se afirmar que, segundo o critério de Luxan, o pó de quartzo não apresenta atividade pozolânica. Pode-se observar também que a massa específica do pó de quartzo é semelhante àquela da areia de quartzo utilizada.

3.2.5 Aditivos

3.2.5.1 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado para a produção do CPR foi o Glenium 51, da empresa Basf. Trata-se de um aditivo superplastificante de 3ª geração, com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, que atende aos requisitos da ABNT NBR 11768:2011. Os características físicas e químicas desse aditivo foram fornecidos pela empresa fabricante, conforme Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Características físicas e químicas do aditivo superplastificante Glenium 51 da Basf.

Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761 B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112 B	05/jul	-
Densidade	TM 103 B	1,067 - 1,107	g/cm ³
Sólidos	TM 613 B	28,5 - 31,5	%
Viscosidade	TM 117	< 150	cp's

Nota: Dados fornecidos pelo fabricante.

3.2.5.2 Aditivo expansor

O aditivo expansor utilizado para a produção da argamassa de reparo foi o MC-Quellmittel-Expansor para concretos, argamassas e caldas de cimento da empresa MC-Bauchemie. Esse aditivo é usado para a produção de argamassas cimentíceas expansivas e utilizado para recompor, reforçar e selar pequenas cavidades, como trincas na construção civil em geral.

O aditivo atende aos requisitos da ABNT NBR 11768:2011 e na Tabela 3.11 são apresentados alguns dados técnicos, fornecidos pela empresa fabricante.

Tabela 3.11 - Dados técnicos do aditivo MC-Quellmittel, da empresa MC-Bauchemie.

Característica	Unidade	Valor	Observações
Densidade	g/cm ³	1,40	
Dosagem	%	0,1 a 1,0	sobre o peso do cimento
Temperatura do substrato	°C	+5 a +30	
Temperatura do ambiente	°C	+5 a +40	
Consumo (argamassa de encunhamento)	g	500	por saco de 50kg de cimento
Consumo (concreto)	g	100 a 500	por saco de 50kg de cimento

Nota: Dados fornecidos pelo fabricante.

3.2.6 Água

Para produção do concreto foi utilizada água potável, isenta de impurezas e materiais em suspensão, proveniente do sistema de abastecimento do Campus Viçosa da UFV e de

extração particular, proveniente de poço profundo, da Pedreira Um Valemix Ltda em Governador Valadares.

3.3 CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E ARGAMASSAS

3.3.1 Dosagem dos concretos e argamassas

3.3.1.1 Concreto base (CB)

Para efeitos do presente trabalho, definiu-se que os corpos de prova a serem reparados com CPR e diferentes tipos de argamassa são constituídos por um concreto base, cujas características são apresentadas a seguir. Para que o estudo possa ter uma maior significância, o concreto base deveria ter características semelhantes a concretos convencionais utilizados em estruturas correntes no Brasil.

Em função disso, para o concreto base optou-se por utilizar um concreto usinado, fornecido pela empresa Pedreira Um Valemix Ltda, de Governador Valadares - MG, com relação água/cimento $a/c = 0,60$ e resistência característica à compressão $f_{ck} = 25,0$ MPa. É oportuno ressaltar que o concreto base escolhido corresponde ao tipo de concreto mais utilizado nas obras de médio e grande porte em Governador Valadares - MG, conforme levantamento feito pela empresa Pedreira Um Valemix Ltda. Na Tabela 3.12 apresenta-se o traço do concreto base utilizado.

Tabela 3.12 - Traço do concreto base em massa produção de $1,0 \text{ m}^3$.

Insumo	Procedência	Massa (kg)
Cimento CP V-ARI-40 RS	Holcim, Pedro Leopoldo-MG	320,00
Brita 0	Pedreira Um Valemix, Timóteo-MG	919,00
Areia artificial	Pedreira Um Valemix, Timóteo-MG	294,00
Areia natural	Areal Naque, Belo Oriente-MG	529,00
Aditivo polifuncional FK 830	MC Bauchemie, São Paulo-SP	1,76
Água potável	Extração particular (Poço profundo)	192,00

Nota: Traços fornecidos pelo sistema de dosagem do Laboratório de Materiais da Pedreira Um Valemix Ltda, em Governador Valadares – MG

3.3.1.2 CPR

Para o CPR, optou-se por utilizar um traço recomendado por Vanderlei (2004), que foi tomado como referência para o desenvolvimento do presente trabalho, já que o objetivo principal é o estudo da aderência.

Portanto, para produção do CPR do presente trabalho foram utilizados materiais que possuem características semelhantes às aquelas empregadas por Vanderlei (2004). Para que isto fosse ainda mais efetivo, decidiu-se obter a areia de quartzo e o pó de quartzo a partir das mesmas empresas fornecedoras dos materiais utilizados por Vanderlei (2004). Na Tabela 3.13 apresenta-se o traço do CPR em massa para produção de 1,0 m³.

Tabela 3.13 - Traço do CPR, em massa para produção de 1,0 m³.

Insumo	Quantidade (kg)
Cimento CP V-ARI	874
Areia de quartzo	962
Pó de quartzo	205
Sílica ativa	215
Superplastificante - Glenium 51	26
Água	157

3.3.1.3 Argamassas de reparo

Para efeitos de comparação do desempenho do CPR à aderência, optou-se por utilizar três tipos de argamassa, sendo duas industrializadas e com histórico bem-sucedido para procedimentos de reparo, e uma terceira produzida em laboratório, com uso de aditivo expensor.

A - Argamassas industrializadas

A primeira argamassa foi denominada argamassa ARQ (argamassa de reparo Q), com as seguintes características fornecidas pelo fabricante: resistência característica à compressão $f_{ck} = 34,0$ MPa aos 28 dias, cimento Portland como aglomerante, agregados classificados, aditivos especiais, polímeros e inibidores de corrosão. Quando misturados, esses materiais resultam numa argamassa moldável de alta resistência mecânica e de boa aderência ao substrato, impedindo a penetração de água e agentes agressivos.

A segunda argamassa foi denominada ARZ (argamassa de reparo Z) com as seguintes características fornecidas pelo fabricantes: resistência característica à compressão $f_{ck} \geq 60,0$ MPa aos 28 dias, resistência ao arracamento $R_a \geq 1,5$ MPa aos 28 dias, resistência à tração na flexão $f_{ct} \geq 8,0$ MPa aos 28 dias e módulo de elasticidade $E_{cs} = 28,0$ GPa. É um material monocomponente que quando misturado com água produz uma argamassa homogênea, modificada com polímeros, reforçada com fibras, com grande resistência à carbonatação e que não requer ponte de aderência.

B - Argamassa com aditivo expensor

A terceira argamassa utilizada foi produzida em laboratório, com uso de aditivo expensor, e foi denominada ARE (argamassa de reparo com aditivo expensor). Para essa argamassa optou-se por utilizar um traço adaptado a partir dos estudos realizados por Freitas (2009). Na Tabela 3.14 apresenta-se o traço da ARE em massa para produção de $1,0 \text{ m}^3$. A ARE foi produzida com areia artificial da Pedreira Um Valemix Ltda, empresa de mineração localizada na cidade de Timóteo - MG, visando garantir uma composição granulométrica ideal, apresentada no Item 3.2.2.2, e uma fácil reprodução do traço. O cimento utilizado na ARE foi o CP V-ARI, mantendo-se o mesmo cimento utilizado na produção do CPR. Para se definir a quantidade de aditivo expensor foram avaliados diferentes percentuais de adição, a partir de recomendações do fabricante. O melhor comportamento com relação à estabilidade dimensional da ARE foi obtido para uma quantidade de aditivo correspondente a 0,4 % do peso de cimento na mistura.

Tabela 3.14 - Traço da ARE em massa para produção de $1,0 \text{ m}^3$.

Material	Quantidade (kg)
Cimento CP V-ARI	520,00
Areia artificial	1295,00
Aditivo expensor	20,80
Água	260,00

3.3.2 Produção dos concretos e argamassas

3.3.2.1 Planejamento dos ensaios

Após a definição dos traços foi realizado um planejamento dos ensaios para caracterização dos concretos e argamassas no estado endurecido e para avaliação experimental da aderência, buscando-se atender as exigências de normas e obter uma representatividade estatística dos resultados. Na Tabela 3.15 apresenta-se o quantitativo de corpos de prova em função do planejamento de ensaios.

Tabela 3.15 - Quantitativo de corpos de prova para realização dos ensaios.

Ensaio	Corpo de prova (medidas em mm)	Quantidade de exemplares por idade	Total de exemplares
f_c	Cilindro de 50 x 100	5	140
f_c e $f_{b30,cil}$	Cilindro de 150 x 300	4	20
$f_c, f_{b30,cil}$ e E_{cs}	Cilindro de 100 x 200	4	95
$f_{b,cd}$	Composto de três prismas de 120 x 120 x 100	5	7
$f_{b,cd}$	Prisma 120 x 120 x 100 unitário	5	60
$f_{ct,f}$	Prisma 100 x 100 x 400	4	30
$f_{b60,pr}$	Prisma 100 x 100 x 400	4	25
$f_{b,td}$	Placas 500 x 300 x 20	5	5

Notas:

f_c Resistência à compressão axial

$f_{b30,cil}$ Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (corpo de prova cilíndrico ângulo de 30 ° com a horizontal)

E_{cs} Módulo de elasticidade secante

$f_{b,cd}$ Resistência cisalhamento direto

$f_{ct,f}$ Aderência cisalhamento na flexão

$f_{b60,pr}$ Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (corpo de prova prismático ângulo de 60 ° com a horizontal)

$f_{b,td}$ Resistência de aderência a tração direta

3.3.2.2 Produção do concreto base

O concreto base usinado fornecido pela empresa Pedreira Um Valemix Ltda, de Governador Valadares - MG, foi produzido em central dosadora automatizada com capacidade instalada de 48 m³/h , logo após a sua aferição. A mistura se deu em caminhão betoneira com capacidade para 8 m³ e foram respeitados os critérios estabelecidos segundo a ABNT NBR 7212:2012.

O concreto para confecção dos corpos de prova foi coletado no terço médio da descarga, conforme o que estabelece ABNT NBR NM 33:1998, e armazenado em recipientes plásticos impermeáveis (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Coleta do concreto base para moldagem dos corpos de prova.

Para moldagem dos corpos de prova (Figura 3.6), foram observados os critérios estabelecidos na ABNT NBR 5738:2015 para corpos de prova cilíndricos e na BS EN 1766:2000 para corpos de prova prismáticos.

Na Tabela 3.16 são apresentados alguns detalhes dos procedimentos de moldagem dos corpos de prova de concreto base no pátio da empresa Pedreira Um Valemix Ltda, de Governador Valadares - MG.



Figura 3.6 - Moldagem dos corpos de prova de concreto base.

Tabela 3.16 - Procedimentos de moldagem dos corpos de prova de concreto base.

Ensaio	Corpo de prova (medidas em mm)	Número de camadas	Tipo adensamento
$f_c, f_{b30,cil}$ e E_{cs}	Cilindro de 100 x 200	2	12 golpes com barra de aço lisa redonda de 16mm
f_c e $f_{b30,cil}$	Cilindro de 150 x 300	3	25 golpes com barra de aço lisa redonda de 16mm
$f_{b,cd}$	Composto de três prismas 120 x 120 x 100	3	25 golpes com barra de aço lisa redonda de 16mm em cada prisma
$f_{ct,f}$ e $f_{b60,pr}$	Prisma 100 x 100 x 400	2	37 golpes com barra de aço lisa redonda de 16mm
$f_{b,td}$	Placas 500 x 300 x 20	2	130 golpes com soquete de moldagem de argamassa

Notas:

f_c Resistência à compressão axial

$f_{b30,cil}$ Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (corpo de prova cilíndrico ângulo de 30° com a horizontal)

E_{cs} Módulo de elasticidade secante

$f_{b,cd}$ Resistência cisalhamento direto

$f_{ct,f}$ Aderência cisalhamento na flexão

$f_{b60,pr}$ Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (corpo de prova prismático ângulo de 60° com a horizontal)

$f_{b,td}$ Resistência de aderência a tração direta

3.3.2.3 Produção do CPR

Para produção do CPR foi utilizada uma argamassadeira de eixo vertical, com capacidade de produção de 5 litros e com duas velocidades de mistura (300 rpm e 800 rpm) (Figura 3.7). Os materiais secos do CPR foram colocados em saco plástico e homogenizados, antes de serem lançados na argamassadeira. Esse procedimento foi realizado no LMC / DEC da UFV.



Figura 3.7 - Argamassadeira de eixo vertical utilizada para produção do CPR.

Com o objetivo de homogenizar a mistura em menos tempo, foram avaliados alguns procedimentos. O procedimento que levou ao melhor resultado de homogeneização do CPR consistiu em lançar a solução de água (a 10 °C de temperatura) com aditivo à mistura seca, de uma só vez e de forma lenta, mantendo-se a argamassadeira em baixa velocidade por um determinado período, seguido de um outro período em alta velocidade, conforme mostrado na Tabela 3.17. Com esse procedimento observou-se uma melhoria na trabalhabilidade do CPR e um ganho no tempo de manuseio.

Tabela 3.17 - Procedimento de mistura do CPR.

Etapa	Velocidade da argamassadeira (rpm)	Tempo Parcial (minutos)	Tempo total (minutos)
Homogeneização em saco plástico	0	0:30	0:30
Adição dos materiais secos	0	0:30	1:00
Homogeneização da mistura	300	0:20	1:20
Adição da água	0	0:20	1:40
Homogeneização da mistura	300	0:20	2:00
Adição do Aditivo	300	0:10	2:10
Homogeneização da mistura	300	2:00	4:10
Homogeneização da mistura	800	6:30	10:40
Paralização para raspagem	0	0:20	11:00
Tempo de descanso	0	01:00	12:00
Homogeneização da mistura	300	0:30	12:30

Para moldagem dos corpos de prova de CPR optou-se pelo adensamento manual (Figura 3.8). Foram moldados 25 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 x 1,0 mm, sendo cinco para cada uma das seguintes idades: 24h, 3 dias, 7 dias, 28 dias e 63 dias.



Figura 3.8 - Moldagem dos corpos de prova de CPR.

3.3.2.4 Produção das argamassas ARQ, ARZ e ARE

Para produção das argamassas ARQ, ARZ e ARE foi utilizada a mesma argamassadeira de eixo vertical, no LMC / DEC da UFV, conforme descrito anteriormente. Para os três tipos de argamassa, os materiais secos foram colocados em saco plástico e homogeneizados, antes de serem lançados na argamassadeira. No caso das argamassas industrializadas (ARQ e ARZ), em seguida foi adicionada água em quantidade indicada pelos fabricantes. Já no caso da argamassa com aditivo expensor (ARE), na sequência foi adicionada água e aditivo conforme proporções indicadas no Item 3.3.1. Para os três casos, a água foi adicionada aos poucos, até se obter uma mistura pastosa e homogênea, sem grumos secos. Os procedimentos de mistura das argamassas são indicados nas Tabelas 3.18, 3.19 e 3.20.

Para iniciar a aplicação das argamassas respeitou-se um tempo mínimo de dois minutos após o término do procedimento de mistura e um tempo máximo de aplicação de 40 minutos.

Tabela 3.18 - Procedimento de mistura da ARQ.

Etapa	Velocidade da argamassadeira (rpm)	Tempo Parcial (minutos)	Tempo total (minutos)
Homogeneização em saco plástico	0	0:10	0:10
Adição dos materiais secos	0	0:20	0:30
Homogeneização da mistura	300	0:20	0:50
Adição da água	300	0:20	1:10
Homogeneização da mistura	300	1:00	2:10
Homogeneização da mistura	800	2:00	4:10
Tempo de descanso exigido pelo fabricante	0	2:00	6:10
Homogeneização da mistura	800	1:00	7:10

Tabela 3.19 - Procedimento de mistura da ARE.

Etapa	Velocidade da argamassadeira (rpm)	Tempo Parcial (minutos)	Tempo total (minutos)
Homogeneização em saco plástico	0	0:30	0:30
Adição dos materiais secos	0	0:30	1:00
Homogeneização da mistura	300	0:20	1:20
Adição da água	0	0:20	1:40
Homogeneização da mistura	300	0:20	2:00
Adição do Aditivo	300	0:10	2:10
Homogeneização da mistura	300	1:00	3:10
Homogeneização da mistura	800	1:30	4:40
Paralização para raspagem	0	0:20	5:00
Tempo de descanso	0	2:00	7:00
Homogeneização da mistura	300	0:30	7:30

Tabela 3.20 - Procedimento de mistura da ARZ.

Etapa	Velocidade da argamassadeira (rpm)	Tempo Parcial (minutos)	Tempo total (minutos)
Homogeneização em saco plástico	0	0:10	0:10
Adição da água	0	0:00	0:10
Adição dos materiais secos	300	0:20	0:30
Homogeneização da mistura	300	5:00	5:30
Tempo de descanso	0	2:00	7:30
Homogeneização da mistura	300	1:00	8:30

Para moldagem dos corpos de prova das argamassas optou-se pelo adensamento manual (Figura 3.9). Foram moldados 25 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm para cada argamassa considerada, sendo cinco para cada uma das seguintes idades: 24h, 3 dias, 7 dias, 28 dias e 63 dias.



Figura 3.9 - Corpos de prova de argamassa.

Todos os materiais utilizados na produção do CPR e das argamassas deste trabalho foram mantidos em sala climatizada com temperatura de 23 °C (\pm 5 °C) e umidade relativa de 65% (\pm 2%), por pelo menos 24 horas antes de serem utilizados. Nessa mesma sala foram realizadas as moldagens dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos para caracterização dos CPR e argamassas e para a avaliação experimental da aderência.

3.3.2.5 Cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram colocados em um tanque de imersão após 24 horas decorridas do término da moldagem, seguindo as orientações da ABNT NBR 5738:2015, onde permaneceram até as idades de ensaio.

3.3.3 Caracterização dos concretos e argamassas estado fresco

Para caracterização dos concretos e argamassas no estado fresco foram realizados diversos ensaios conforme apresentado a seguir.

Para determinação da consistência do concreto base realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) (Figura 3.10), conforme a ABNT NBR NM 67:1998.



Figura 3.10 - Aspecto do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) para o concreto base.

Para determinação da consistência do CPR e das argamassas realizou-se o ensaio de *flow table* (Figura 3.11) segundo a ABNT NBR 13276:2005.



Figura 3.11 - Aspecto do ensaio de consistência (*flow table*) para o CPR e argamassas.

Para determinação do teor de ar incorporado do concreto base realizou-se o ensaio pressométrico segundo a ABNT NBR NM 47:2002. Para determinação da densidade e do teor de ar incorporado do CPR e das argamassas no estado fresco foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 13278:2005 (Figura 3.12).



Figura 3.12 - Aspecto do ensaio de determinação da densidade e do teor de ar incorporado do CPR e das argamassas.

Todos os ensaios de caracterização dos concretos e argamassas no estado fresco também foram realizados em sala climatizada com temperatura de 23 °C (± 2 °C) e umidade relativa de 60% (± 5 %).

3.3.4 Caracterização dos concretos e argamassas estado endurecido

Para caracterização do concreto no estado endurecido foram realizados diversos ensaios no LMC / DEC da UFV, conforme apresentado a seguir, com exceção do ensaio de compatibilidade dimensional, que foi realizado com apoio da empresa Companhia Nacional de Cimentos, de Sete Lagoas - MG.

A resistência à compressão axial dos concretos e argamassas foi determinada segundo a ABNT NBR 5739:2007, utilizando-se corpos de provas cilindricos de 50 x 100 mm. No presente trabalho optou-se por não utilizar o método de ensaio previsto na ABNT NBR 13279:2005, já que o mesmo prevê a utilização de corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm, que não permitem a avaliação do módulo de elasticidade de concretos e argamassas, tendo em vista as características dos equipamentos disponíveis.

Para execução dos ensaios foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL60000, com capacidade de carga de 2000 KN, disponível no LMC / DEC da UFV (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Ensaio para determinação da resistência à compressão: (a) detalhe do corpo de prova; (b) detalhe da máquina de ensaio.

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada segundo ABNT NBR 8522:2008 (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Aspecto do ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto e argamassas.

Para avaliação da retração/expansão livre dos concretos e argamassas foi realizado o ensaio de compatibilidade dimensional conforme a ASTM C157/C157M:2014. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Concreto da empresa Companhia Nacional de Cimentos, em Sete Lagoas – MG. Para isto o CPR e as argamassas foram produzidos no local do ensaio, com os mesmos materiais e em condições semelhantes às adotadas no LMC / DEC da UFV.

Inicialmente foram moldados 20 corpos de prova prismáticos com dimensões de 25 x 25 x 285 mm, sendo 4 para cada material (CB, CPR, ARQ, ARZ e ARE). Os ensaios

foram realizados a partir de 3 dias de idade, mantendo-se os registros até 252 dias para as argamassas ARQ, ARZ e ARE e 476 dias para o CPR e para o concreto base. Os corpos de prova foram colocados em um tanque de imersão após 24 horas decorridas da primeira adição de água na moldagem e mantidos no mesmo até 72 horas, quando foram retirados para início das medições. Após se iniciarem as medições, os corpos de prova foram mantidos em ambiente com temperatura de 23 °C (± 2 °C) e umidade relativa de 60% (± 5 %).

Em função da variação dimensional observada nos materiais a partir dos 3 dias, notou-se que era importante monitorar a expansão/retração dos mesmos para as primeiras idades. Para isto, decidiu-se por moldar 16 novos corpos de prova com os materiais de reparo, com as mesmas dimensões anteriores, sendo 4 para cada material (CPR, ARQ, ARZ e ARE). Os novos ensaios foram realizados a partir de 14 horas após a primeira adição de água, mantendo-se os registros até 96 horas para todos os materiais. Esses corpos de prova não foram submetidos a um processo de cura como no caso anterior, mas foram mantidos em ambiente com temperatura de 23 °C (± 2 °C) e umidade relativa de 60% (± 5 %) durante a realização dos ensaios.

Nas Figura 3.15 apresentam-se alguns detalhes da moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compatibilidade dimensional, enquanto que na Figura 3.16 mostra-se um aspecto geral desse ensaio no Laboratório de Concreto da empresa Companhia Nacional de Cimentos, em Sete Lagoas - MG.



Figura 3.15 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compatibilidade dimensional.



Figura 3.16 - Aspecto geral do ensaio de compatibilidade dimensional.

Para avaliação da absorção dos concretos e argamassas foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 9779:2012.

A resistência à tração por compressão diametral dos concretos e argamassas foi realizado de acordo com as prescrições da ABNT NBR 7222:2011.

Realizou-se também o ensaio de tração na flexão para o CPR e para as argamassas de reparo segundo a ABNT NBR 13279:2005. Para isto utilizou-se uma prensa manual, com anel dinamométrico de constante $k = 696 \text{ kgf/mm}$ (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Aspecto do ensaio de resistência à tração na flexão.

3.4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA ADERÊNCIA

3.4.1 Preparo das superfícies

Em função do exposto no Item 2.6, a resistência de aderência é afetada pelas condições da superfície do substrato de concreto antes de aplicação do material de reparo.

A fim de melhorar a aderência do material de reparo e padronizar as condições para os ensaios de aderência, todos os corpos de prova passaram por um processo de preparação manual da superfície de concreto com auxílio de cinzel e, em seguida, foram submetidos à limpeza com jato de água para retirada dos materiais soltos. Após secagem ao ar foi lançada uma pequena quantidade de água na superfície do substrato, com o auxílio de uma brocha, e em seguida, aplicado o material de reparação (Figura 3.18).



Figura 3.18 - Aspecto geral da superfície de um corpo de prova antes da aplicação do material de reparação.

3.4.2 Reparação e cura dos corpos de prova reparados

A reparação dos corpos de prova com CPR e argamassas foi realizada no interior de uma sala climatizada com temperatura de $23\text{ °C} (\pm 2\text{ °C})$ e umidade relativa de $60\% (\pm 5\%)$. Na Tabela 3.21 são apresentados alguns detalhes dos procedimentos de reparação dos corpos de prova

Os corpos de prova reparados foram colocados em um tanque de imersão após 12 horas decorridas do término do procedimento de reparação, seguindo as orientações da ABNT NBR 5738:2015, onde permaneceram até as idades de ensaio.

Tabela 3.21 - Procedimentos de reparação dos corpos de prova.

Ensaio	Corpo de prova (medidas em mm)	Número de camadas	Tipo adensamento
$f_{b30,cil}$	Cilindro de 100 x 200	1	12 golpes com barra de aço lisa redonda de 16mm
$f_{b30,cil}$	Cilindro de 150 x 300	2	25 golpes com barra de aço lisa redonda de 16mm
$f_{b,cd}$	Composto de três prismas de 120 x 120 x 100	3	30 golpes com soquete de moldagem de argamassa
$f_{b,tf}$ e $f_{b60,pr}$	Prisma de 400 x 100 x 100	1	30 batidas da mesa de flow table
$f_{b,td}$	Placas 500 x 300 x 20	1	130 golpes com soquete de moldagem de argamassa

Notas:

$f_{b30,cil}$ Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (corpo de prova cilíndrico ângulo de 30 ° com a horizontal)

$f_{b,cd}$ Resistência de aderência ao cisalhamento direto

$f_{b,tf}$ Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão

$f_{b60,pr}$ Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão (corpo de prova prismático ângulo de 60 ° com a horizontal)

$f_{b,td}$ Resistência de aderência a tração direta

3.4.3 Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão

3.4.3.1 Ensaio de reconstituição do prisma

O ensaio de reconstituição do prisma foi realizado segundo a BS EN 12615:1999. Foi utilizada a mesma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL60000, com capacidade de carga de 2000 KN, disponível no LMC / DEC da UFV, conforme mostrado no Item 3.3.4.

Uma parte do corpo de prova prismático utilizado para realização desse ensaio foi serrada com disco diamantado, a partir de um prisma de concreto base com dimensões de 100 x 100 x 400 mm (Figura 3.20), produzindo-se uma superfície inclinada a 60° com a horizontal (Figura 3.20-b) . A outra parte do corpo de prova prismático foi preenchida

com o material de reparo, sendo produzidos prismas para o CPR, a ARQ, a ARZ e a ARE. Na Figura 3.19 e mostra-se um aspecto geral desse ensaio no LMC / DEC da UFV.



Figura 3.19 - Preparação do corpo de prova para o ensaio de reconstituição do prisma.



(a)



(b)

Figura 3.20 - Aspecto geral do ensaio de reconstituição do prisma.

3.4.3.2 Ensaio de reconstituição do cilindro

O ensaio de reconstituição do cilindro foi o realizado segundo recomendações de apresentadas no Item 2.5.2.2, utilizando-se a mesma máquina universal de ensaios da marca EMIC, descrita no Item 3.3.4.

Os corpos de prova utilizados para esse ensaio foram produzidos a partir de corpos de prova cilíndricos de concreto base com dimensões de 150 x 300 mm e 100 x 200 mm. Definida a posição e o ângulo de inclinação da superfície com a horizontal, o grande desafio foi manter a qualidade do corte. Isto foi conseguido com auxílio de marcações feitas no corpo de prova e com a utilização de um gabarito na mesa de corte. Uma parte do corpo de prova cilíndrico foi serrada com disco diamantado produzindo-se uma superfície inclinada a 30° com a horizontal (Figura 3.21). A outra parte do corpo de prova foi preenchida com o material de reparo, sendo produzidos cilindros para o CPR, a ARQ, a ARZ e a ARE. Na Figura 3.22 mostra-se um aspecto geral dos corpos de prova preparados para o ensaio no LMC / DEC da UFV.



Figura 3.21 - Corte do corpo de prova para o ensaio de reconstituição do cilindro.



(a)



(b)

Figura 3.22 - Aspecto dos corpos de prova para realização do ensaio de reconstituição do cilindro.

Para o ensaio de reconstituição do cilindro foram utilizados dois tipos de corpo de prova, conforme descrito anteriormente, com o intuito de avaliar a influência da dimensão do corpo de prova sobre os resultados. Guerrante *et al.* (2015) utilizaram corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, enquanto que Helene (1988) utilizou corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm. Uma vez que os corpos de prova de 100 x 200 mm vêm sendo largamente utilizados nos ensaios de determinação da resistência à compressão do concreto em geral, considera-se oportuno realizar o ensaio de reconstituição do cilindro com essas dimensões.

3.4.4 Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão

O ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão foi realizado segundo a AFNOR NF P 18-851:1992, utilizando-se a mesma máquina universal de ensaios da marca EMIC, descrita no Item 3.3.4.

Os corpos de prova utilizados para esse ensaio foram produzidos a partir de corpos de prova prismáticos de concreto base com dimensões de 100 x 100 x 400 mm, conforme descrito no Item 2.5.3. Na Figura 3.23 mostra-se um aspecto geral da forma e de um corpo de prova reparado, já preparado para o ensaio. Após a cura, o corpo de prova foi ensaiado no LMC / DEC da UFV com o reparo voltado para baixo (Figura 3.24). Os

resultados desse ensaio devem ser comparados com os aqueles obtidos para corpos de prova prismáticos monolíticos confeccionados com concreto base.

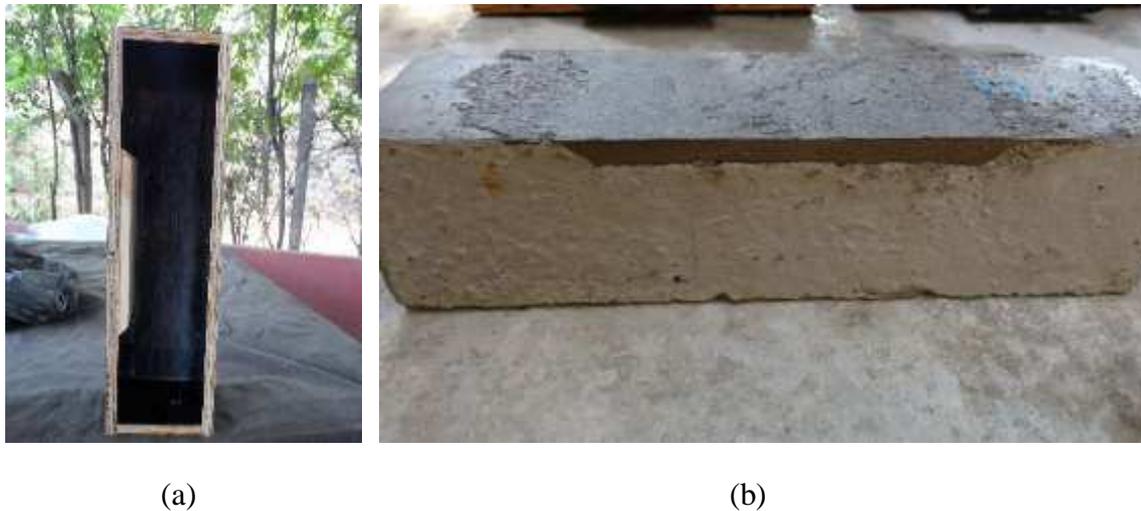


Figura 3.23 - Aspecto da fôrma e do corpo de prova para realização do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão: (a) fôrma para moldagem dos corpos de prova; (b) corpo de prova moldado.

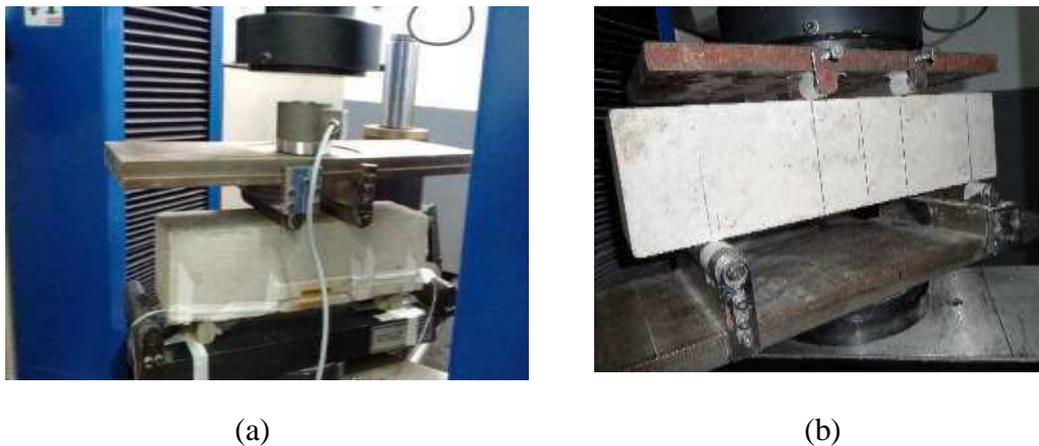


Figura 3.24 - Aspecto geral do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão.

3.4.5 Resistência de aderência ao cisalhamento direto

O ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto foi realizado segundo o procedimento CRD C 590 recomendado pelo Corps of Engineers - U. S. Army, utilizando-se uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade de carga de 1000 KN, disponível no LMC / DEC da UFV.

Os corpos de prova utilizados para esse ensaio são compostos de três prismas com dimensões de 120 x 120 x 100 mm, conforme descrito no Item 2.5.4.1. Para fabricar um corpo de prova, inicialmente foram produzidos dois prismas de concreto base com dimensões de 120 x 120 x 100 mm, com auxílio de formas de madeira compensada plastificada. A superfície de concreto de uma das faces desses prismas foi preparada manualmente com auxílio de cinzel e, em seguida, foi submetida à limpeza com jato de água para retirada dos materiais soltos. Em uma etapa seguinte os prismas de concreto base foram colocados em uma forma de madeira compensada plastificada para, juntamente com o material de reparo, formar um corpo de prova. Esses corpos de prova apresentaram uma variação dimensional importante devido à expansão da forma de madeira. Em função disto, decidiu-se por descartar esse método de preparação dos corpos de prova e a solução adotada foi a confecção de um conjunto de formas de aço (Figura 3.25).

Dispondo do novo conjunto de formas, foram produzidos corpos de prova com o CPR, a ARQ, a ARZ e a ARE. Na Figura 3.26-a mostra-se um aspecto geral desse ensaio no LMC / DEC da UFV.



Figura 3.25 - Aspecto da moldagem do corpo de prova composto de três prismas para o ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto.



(a)



(b)

Figura 3.26 - Aspecto geral do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto: (a) realização do ensaio; (b) detalhe do corpo de prova.

3.4.6 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado segundo a ABNT NBR 13528:2010, utilizando-se um equipamento de tração da marca Contenco, equipado com Manômetro Salcas.

Para produzir os corpos de prova para esse ensaio partiu-se de uma placa de concreto base com dimensões de 500 x 300 x 20 mm, estabelecidas segundo a ABNT NBR 14081-2:2015. Esta placa recebeu uma camada adicional de material de reparo com 10 mm de espessura (Figura 3.27) na face superior. Foram produzidas placas com adição de CPR, ARQ, ARZ e ARE. Os corpos de prova foram cortados nessas placas com auxílio de uma serra copo, formando cilindros, que posteriormente foram arrancados com a aplicação de uma força de tração perpendicular à superfície (Figura 3.28).



Figura 3.27 - Placa de concreto base para produção dos corpos de prova para o ensaio de resistência de aderência à tração.



(a)



(b)

Figura 3.28 - Aspecto geral do ensaio de resistência de aderência à tração: (a) máquina de ensaio; (b) corpo de prova ensaiado.

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados de caracterização dos concretos e argamassas de reparo no estado fresco e endurecido, a avaliação da compatibilidade dimensional e a avaliação experimental da aderência. Também apresenta-se uma discussão acerca das propriedades avaliadas e do potencial de aplicação do CPR como material de reparo.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS NO ESTADO FRESCO

Na Tabela 4.1 apresentam-se as características dos concretos e argamassas de reparo no estado fresco.

Tabela 4.1 - Características dos materiais no estado fresco.

Material	Trabalhabilidade		Densidade (kg/m ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
	Slump- Test (mm)	Índice de Consistência (mm)		
CB	150,00	-	2226,00	5,00
CPR	-	230,00	2302,00	5,63
ARQ	-	240,00	2102,00	10,65
ARZ	-	270,00	1923,00	7,26
ARE	-	280,00	2270,00	7,35

Os materiais foram preparados de acordo com descrito no Item 3.3, sendo as argamassas industrializadas (ARQ e ARZ) produzidas conforme estabelecido pelo fabricante. Dentre os materiais estudados, o CPR é aquele que apresenta a maior dificuldade de mistura, exigindo cuidados especiais durante a produção. Após o preparo, todos os materiais foram aplicados sobre um substrato de concreto para avaliar os aspectos gerais de aplicação. Apesar de ser observado uma variação entre os índices de consistência (Tabela 4.1), nenhum dos materiais de reparação apresentou dificuldades no processo de aplicação.

Por ser produzido com agregados que possuem uma melhor distribuição granulométrica, pode-se observar na Tabela 4.1 que o CPR apresenta maior densidade e um menor teor de ar incorporado quando comparado com os demais materiais estudados, sendo essas características intrínsecas a esse material.

Na Figura 4.1 apresenta-se um teste de aplicação do CPR e da argamassa ARQ em um substrato de concreto.

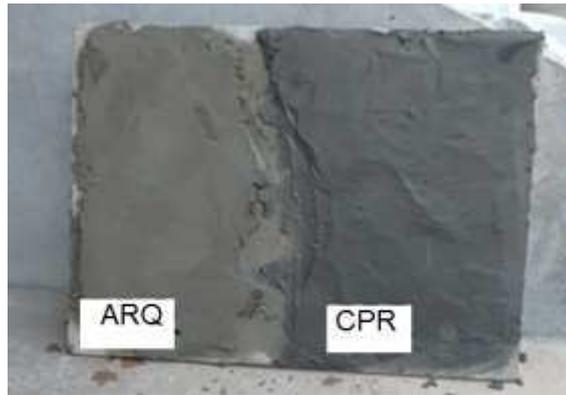


Figura 4.1 - Teste de aplicação realizado em substrato de concreto na posição vertical.

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste item são apresentados os resultados referentes às características dos concretos e argamassas de reparo no estado endurecido.

4.2.1 Resistência à compressão

Na Tabela 4.2 e Figura 4.2 são apresentados os resultados da resistência à compressão ao longo do tempo, para os materiais utilizados.

Tabela 4.2 - Valores médios da resistência à compressão dos concretos e argamassas de reparo.

Material	Idade (dias)	f_c (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
CB	1	0,00	0,00	0,00
	3	11,53	0,49	4,21
	7	16,44	0,52	3,18
	28	26,55	0,58	2,19
	63	31,68	0,39	1,31
CPR	1	88,01	3,92	4,45
	3	88,50	3,57	4,03
	7	110,39	4,81	17,65
	28	151,02	2,88	1,91
	63	164,60	7,54	4,58
ARQ	1	17,81	1,96	11,02
	3	22,76	1,81	7,96
	7	37,78	1,46	3,86
	28	43,58	1,29	2,95
	63	47,62	1,45	3,06
ARZ	1	27,35	0,96	3,52
	3	55,49	2,95	5,31
	7	62,52	1,63	2,61
	28	84,08	1,36	1,62
	63	86,45	2,92	3,37
ARE	1	14,24	1,69	11,88
	3	31,48	1,96	6,21
	7	36,41	2,07	5,68
	28	44,11	3,15	7,15
	63	44,44	1,98	3,46

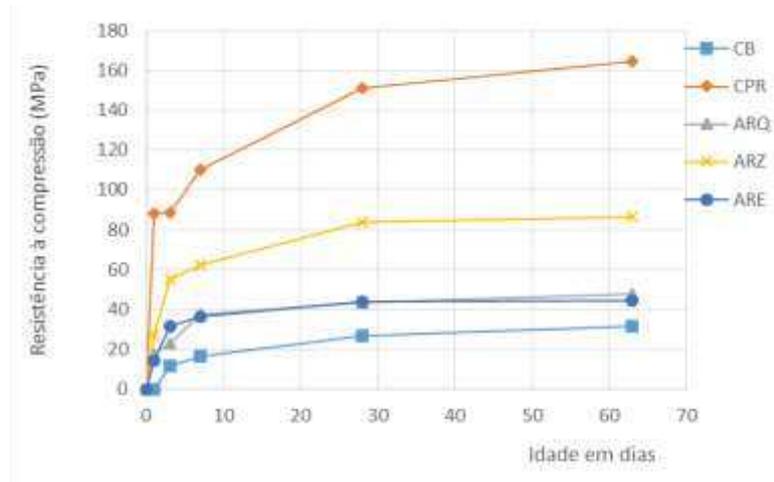


Figura 4.2 - Variação da resistência à compressão média ao longo do tempo.

4.2.1 Módulo de elasticidade

Na Tabela 4.3 e Figura 4.3 são apresentados os resultados do módulo de elasticidade ao longo de tempo para os materiais utilizados.

Tabela 4.3 - Valores médios do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) dos concretos e argamassas de reparo.

<i>Material</i>	<i>Idade (dias)</i>	<i>E_{cs} (GPa)</i>	<i>DP (GPa)</i>	<i>CV (%)</i>
CB	1	-	0	0,0
	3	13,28	0,51	3,86
	7	14,9	0,43	2,87
	28	20,33	0,76	3,69
	63	23,33	1,17	5,02
CPR	1	36,52	0,42	1,07
	3	39,57	0,23	0,55
	7	46,32	3,71	8,00
	28	47,21	0,29	0,61
	63	49,77	0,5	1,01
ARQ	1	20,78	0,38	2,28
	3	24,05	1,62	7,67
	7	25,09	1,05	4,20
	28	27,8	0,35	0,32
	63	28,53	0,32	1,13
ARZ	1	19,93	1,45	7,26
	3	32,48	0,61	1,86
	7	33,49	0,46	1,37
	28	35,18	0,3	1,04
	63	38,27	0,7	1,84
ARE	1	14,96	0,29	1,91
	3	19,34	0,71	3,67
	7	21,22	1,08	5,11
	28	25,53	0,62	2,42
	63	26,4	1,22	4,61

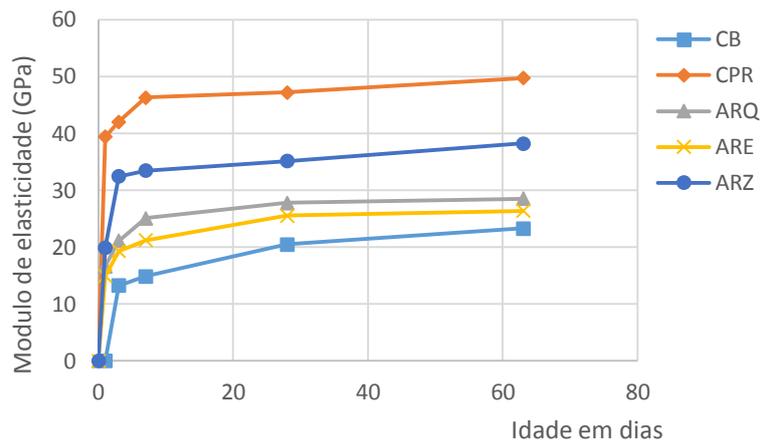


Figura 4.3 - Variação do módulo de elasticidade médio ao longo do tempo.

4.2.2 Resistência à tração

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores médios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Tabela 4.4 - Valores médios da resistência à tração por compressão diametral dos concretos e argamassas de reparo aos 28 dias.

Material	$f_{ct,D}$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
CB	2,67	0,19	6,97
CPR	3,08	0,56	18,16
ARQ	2,48	0,16	6,24
ARZ	2,44	0,02	0,66
ARE	1,69	0,12	7,38

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios de resistência à tração na flexão aos 28 dias, em corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm.

Tabela 4.5 - Valores médios da resistência à tração na flexão do CPR e argamassas de reparo aos 28 dias.

Material	$f_{ct,f}$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
CPR	20,83	0,41	2,00
ARQ	7,53	0,14	1,88
ARZ	7,79	1,03	13,25
ARE	9,33	1,79	19,23

4.2.3 Absorção por capilaridade

Na Tabela 4.6, apresentam-se os valores médios de absorção de água aos 28 dias.

Tabela 4.6 - Valores médios da absorção dos concretos e argamassas de reparo aos 28 dias.

Material	Absorção (%)	DP (MPa)	CV (%)
CB	7,02	0,18	0,03
CPR	1,78	0,32	17,95
ARQ	6,78	1,87	27,55
ARZ	3,77	0,40	10,52
ARE	6,65	0,06	0,94

4.2.4 Relação entre as características mecânicas dos materiais

Na Figura 4.4 apresenta-se a relação entre a resistência à compressão média dos materiais de reparo e o concreto base aos 28 dias.

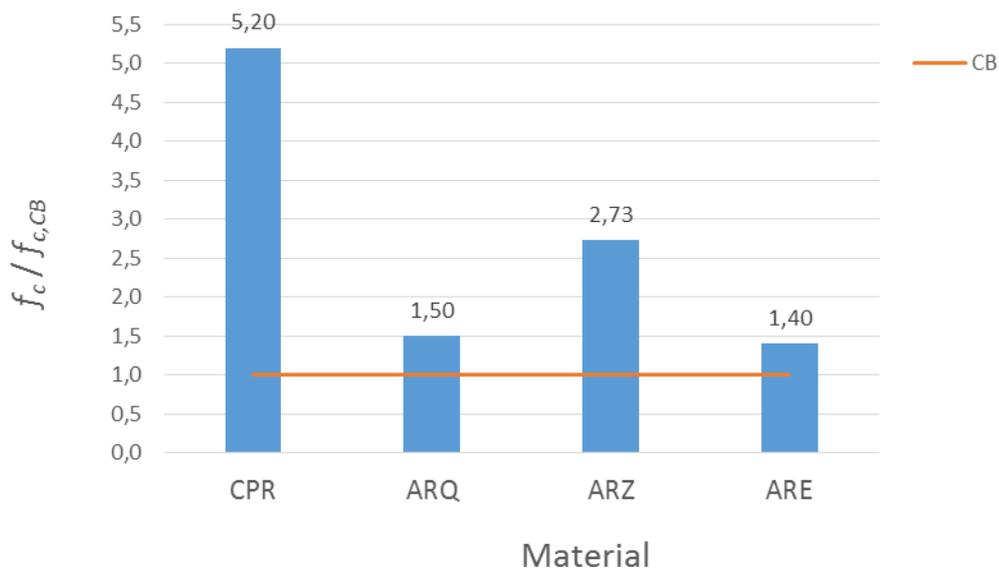


Figura 4.4 - Relação entre a resistência à compressão média dos materiais de reparo e o concreto base aos 28 dias.

Na Figura 4.5 apresenta-se a relação entre o módulo de elasticidade secante médio dos materiais de reparo e o concreto base aos 28 dias.

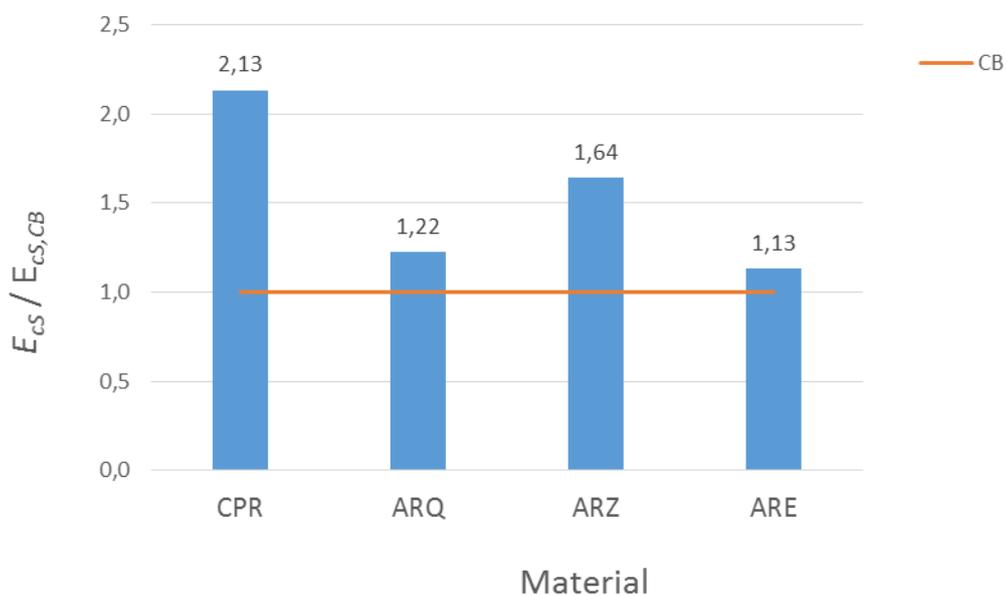


Figura 4.5 - Relação entre o módulo de elasticidade secante médio dos materiais de reparo e o concreto base aos 28 dias.

Na Figura 4.6 apresenta-se a relação entre a resistência à tração por compressão diametral média dos materiais de reparo e o concreto base aos 28 dias.

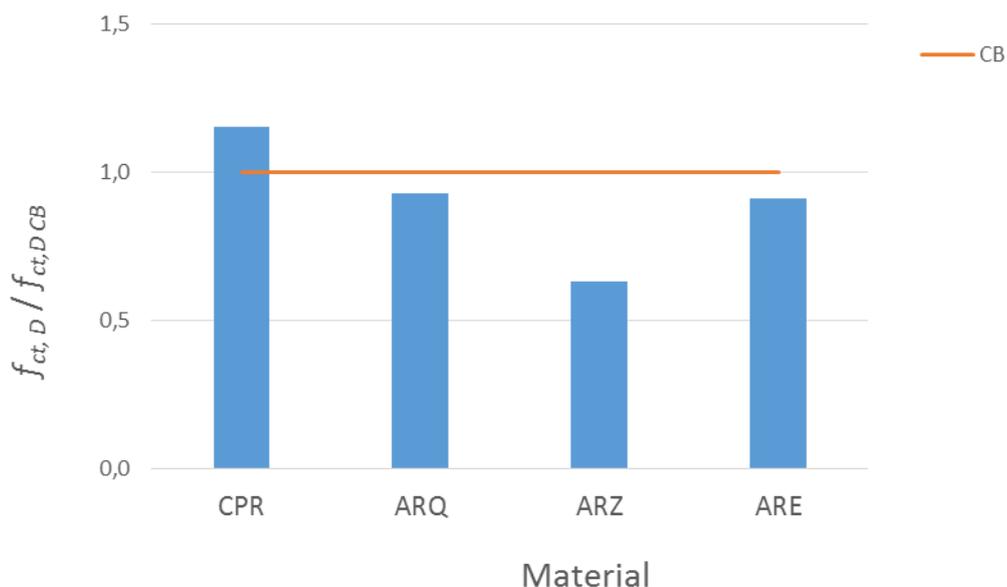


Figura 4.6 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral média dos materiais de reparo e concreto base aos 28 dias.

4.2.5 Discussão dos resultados

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3, pode-se observar que o CPR e as argamassas de reparo apresentaram resistência à compressão e módulo de elasticidade nitidamente superiores àqueles do concreto base.

Por um princípio de compatibilidade entre o material de reparo e o concreto do substrato, diversos autores (Rocha, 1997; Reis, 1998; Mattos, 2002, etc.) recomendam que as propriedades mecânicas dos materiais de reparo devem ser ligeiramente superiores às do concreto do substrato, mas não devem ser muito diferentes. A adoção de materiais de reparo com características mecânicas muito superiores pode induzir tensões na interface entre reparo e substrato, causadas principalmente pela diferença de deformabilidade entre os materiais, podendo levar ao deslocamento do reparo.

O CPR apresenta uma resistência à compressão da ordem de 469% superior à do concreto base e um módulo de elasticidade da ordem de 130% superior ao do concreto base, ambos aos 28 dias de idade. No entanto, é oportuno observar que as argamassas industrializadas (ARQ e ARZ), que estão disponíveis no mercado e têm sido largamente utilizadas no Brasil, apresentam uma resistência à compressão da ordem de 64% e 217% superior à do concreto base respectivamente, o que contraria o princípio geral de compatibilidade

citado anteriormente. Com relação ao módulo de elasticidade, as diferenças relativas ao concreto base são de 36% superior para a ARQ e 72% superior para a ARZ.

A tendência de utilização de materiais de reparo com módulos de elasticidade significativamente maiores que os do concreto do substrato também foi um assunto destacado por Grullón (2004) e Mangat e O’Flaherty (2000)⁸ *apud* Mattos (2002). Segundo esses autores, materiais de reparo com módulo de elasticidade mais alto do que o do concreto do substrato são os mais indicados. Isto se justifica porque o material de reparo transfere tensões de retração mais baixas para o substrato e as tensões externas introduzidas ao longo do tempo podem ser transferidas do substrato para o material de reparo sem causar danos.

Apesar das argamassas de reparo (ARQ, ARZ e ARE) apresentarem menores diferenças de resistência à compressão e de módulo de elasticidade com relação ao concreto base se comparadas ao CPR, ainda assim as diferenças são expressivas.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral (Figura 4.6), observa-se que o CPR é o único material que apresenta uma resistência superior à do concreto base, da ordem de 15%.

A resistência à tração superior à do concreto do substrato é uma característica desejável para um material de reparo. A literatura indica que não é recomendável utilizar materiais de reparo com propriedades mecânicas inferiores às do substrato, pois com o surgimento de tensões poderá ocorrer a ruptura da camada de reparo. Portanto, sob a ótica da resistência à tração por compressão diametral, espera-se que o CPR apresente um comportamento mais adequado, quando comparado às argamassas de reparo (ARQ, ARZ e ARE).

De acordo com a os resultados da Tabela 4.6, o CPR apresenta a menor absorção de água entre os materiais estudados. Esta é uma característica desejável para um material de

⁸ MANGAT, P. S. O’FLAHERTY, F. J. *Influence of Elastic Modulus on Stress redistribution and Cracking in Repair Patches. Cement and Concrete Research – Elsevier Science, v. 30, 2000. p. 125-136.*

reparo, tendo em vista que a absorção está intimamente ligada à durabilidade do material. Espera-se que materiais com baixa absorção sejam menos susceptíveis à deterioração.

4.3 AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DIMENSIONAL

4.3.1 Compatibilidade dimensional (ensaio de longa duração)

Na Tabela 4.7 e Figura 4.7 apresentam-se os resultados dos ensaios de compatibilidade dimensional para avaliação da retração/expansão livre dos concretos e argamassas. Os corpos de prova utilizados para os ensaios de longa duração foram submetidos inicialmente a um processo de cura por imersão e após o início das medições foram mantidos em ambiente com temperatura e umidade relativa controlados, conforme descrito no Item 3.3.4. A leitura inicial (leitura de referência) foi realizada aos 3 dias e as variações dimensionais começaram a ser medidas nos corpos de prova a partir do vigésimo oitavo dia.

Tabela 4.7 - Valores médios da retração/expansão (%) dos concretos e argamassas de reparo (ensaio de longa duração).

Idade (dias)	Material				
	CB	CPR	ARQ	ARE	ARZ
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,00	0,26	-0,07	-0,04	-0,03
32	-0,01	0,26	-0,08	-0,04	-0,04
35	-0,01	0,25	-0,09	-0,05	-0,05
42	-0,02	0,18	-0,09	-0,06	-0,08
56	-0,04	0,05	-0,10	-0,06	-0,15
62	-0,04	-0,01	-0,11	-0,06	-0,18
84	-0,05	-0,01	-0,12	-0,06	-0,19
140	-0,06	-0,02	-0,12	-0,06	-0,13
252	-0,06	-0,02	-0,12	-0,09	-0,14
476	-0,09	-0,03			

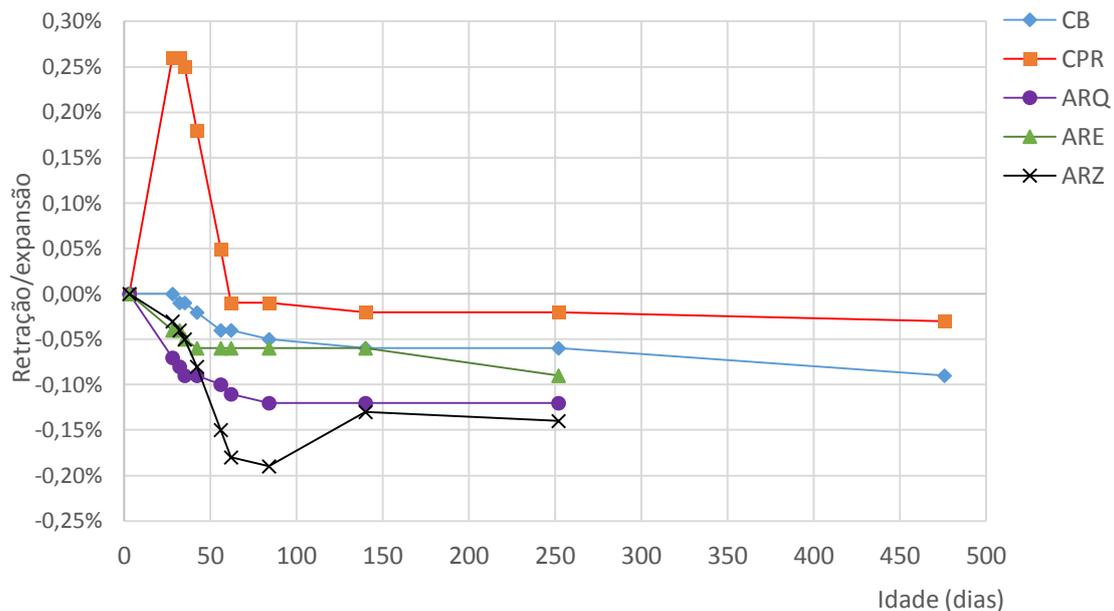


Figura 4.7 - Variação da retração/expansão ao longo do tempo (ensaio de longa duração).

4.3.2 Compatibilidade dimensional (ensaio de curta duração)

Na Tabela 4.8 e Figura 4.8 apresentam-se os resultados dos ensaios de compatibilidade dimensional para avaliação da retração/expansão livre dos concretos e argamassas. Os corpos de prova utilizados para os ensaios de curta duração não foram submetidos a qualquer processo de cura, mas foram mantidos em ambiente com temperatura e umidade relativa controlados, conforme descrito no Item 3.3.4. A leitura inicial (leitura de referência) foi realizada com 14 horas após a primeira adição de água, mantendo-se os registros até 96 horas.

Tabela 4.8 - Valores médios da retração/expansão (%) dos concretos e argamassas de reparo (ensaio de curta duração).

Idade (horas)	Material			
	CPR	ARQ	ARE	ARZ
14	0,00	0,00	0,00	0,00
16	-0,05	0,00	0,00	0,00
17	-0,05	0,00	0,00	0,01
18	-0,05	0,00	0,00	0,01
24	-0,03	0,00	0,00	0,05
38	-0,07	0,00	0,00	0,02
42	-0,07	0,00	0,00	-0,01
48	-0,07	0,00	0,00	-0,01
62	-0,07	0,00	0,01	-0,01
66	-0,06	0,00	0,01	-0,01
72	-0,06	0,00	0,01	-0,01
96	-0,08	-0,04	0,02	-0,04

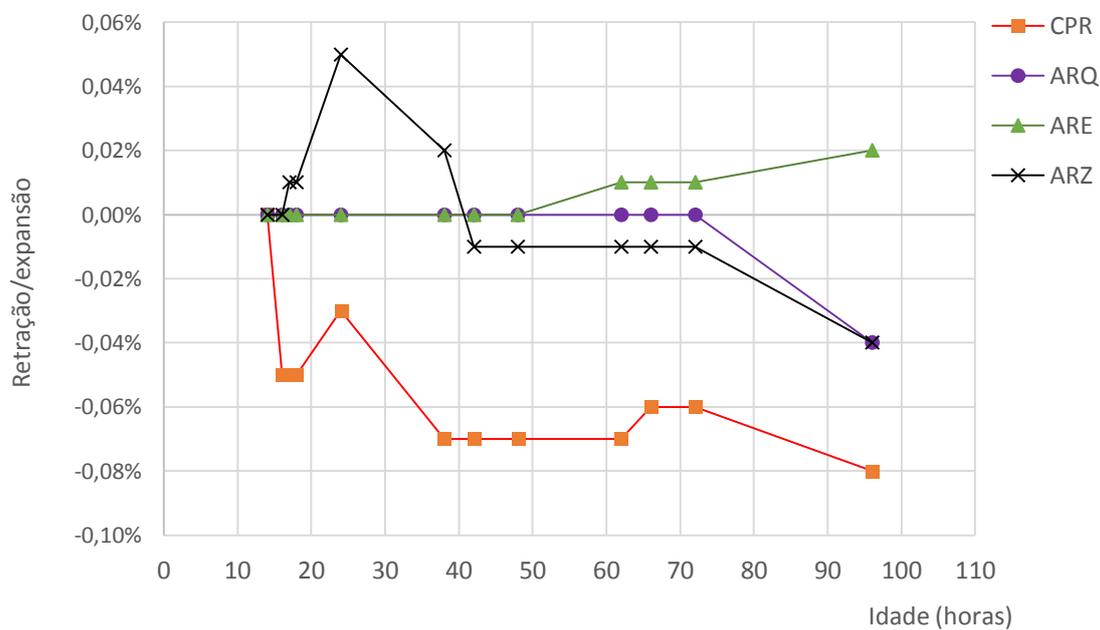


Figura 4.8 - Variação da retração/expansão ao longo do tempo (ensaio de curta duração).

4.3.3 Discussão dos resultados

Os ensaios de compatibilidade dimensional de longa duração para avaliação da retração/expansão livre dos concretos e argamassas foram realizados durante um período de 476 dias para o CPR e para o concreto base e de 252 dias para as argamassas ARQ, ARZ e ARE. Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram submetidos inicialmente a um processo de cura por imersão até o início das medições aos 3 dias de idade e, após isto, foram mantidos em um ambiente com temperatura e umidade relativa controlados.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.7 e na Figura 4.7, pode-se observar que para um comportamento de longo prazo o CPR foi o material que apresentou maior variação dimensional, com uma expansão máxima de 0,26% (28 e 35 dias), e uma retração máxima de 0,03% (476 dias – última medição).

Por outro lado, nos ensaios de longa duração verificou-se que as argamassas de reparo só apresentaram retração, sendo o valor máximo registrado para a ARQ de 0,12% (252 dias), para a ARZ de 0,19% (84 dias) e para a ARE de 0,09% (252 dias).

Os ensaios de compatibilidade dimensional de curta duração para avaliação da retração/expansão livre dos concretos e argamassas foram realizados durante um período de 96 horas para todos os materiais de reparo. Os corpos de prova utilizados nos ensaios não foram submetidos a qualquer processo de cura, mas foram mantidos em ambiente com temperatura e umidade relativa controlados.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.8 e na Figura 4.8, observa-se que para as primeiras horas o CPR apresentou a maior variação dimensional, com uma retração máxima de 0,08% para 96 horas, enquanto que os demais materiais de reparo apresentaram maior estabilidade dimensional. Entretanto, em função dos resultados dos ensaios de longa duração (Tabela 4.7 e Figura 4.7) observa-se que o CPR tende a expandir nas primeiras idades, enquanto que as argamassas de reparo industrializadas (ARQ e ARZ) apresentaram um aumento significativo de retração ao longo do tempo.

4.4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA ADERÊNCIA

Neste Item é apresentada a avaliação experimental da aderência, com base no que foi apresentado no Item 2.5.

4.4.1 Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão

4.4.1.1 Ensaio de reconstituição do prisma- *Slant Shear*

Na Tabela 4.9 apresentam-se os resultados da tensão normal de ruptura obtidos no ensaio de reconstituição do prisma segundo a BS EN 12615:1999, aos 28 dias de idade para os materiais de reparo e 60 dias para o concreto base.

Tabela 4.9 - Valores médios da tensão normal de ruptura nos corpos de prova prismáticos

Material	f_c (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Taxa de recuperação (%)
CB	29,76	2,04	6,86	100,0
CPR / CB	29,43	0,27	0,92	98,9
ARQ / CB	24,44	0,82	3,36	82,1
ARZ / CB	25,20	3,64	14,45	84,7
ARE / CB	24,04	4,00	16,64	80,8

Na Tabela 4.10 apresentam-se os resultados de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b60,pr}$) para corpos de prova prismáticos reconstituídos (superfície inclinada a 60° com a horizontal), calculado conforme Expressão 2.1.

Tabela 4.10 - Valores médios da resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova prismáticos reconstituídos.

Material	$f_{b60,pr}$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Taxa de recuperação (%)
CB	13,02	0,96	7,38	100,0
CPR / CB	12,74	0,12	0,92	97,9
ARQ / CB	10,58	0,35	3,35	81,3
ARZ / CB	10,91	1,58	14,44	83,8
ARE / CB	10,41	1,73	16,62	79,9

Na Tabela 4.11 apresentam-se os resultados da análise de variância (ANOVA) de fator único, para os resultados de reconstituição dos prismas apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.11 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão para corpos de prova prismáticos.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	13,86	3,00	4,62	3,29	0,06	3,49
Dentro dos grupos	16,84	12,00	1,40			
Total	30,70	15,00				

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.11, pode-se afirmar que não existem diferenças significativas entre os materiais ensaiados, ao nível de 5% de significância, com relação à resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova prismáticos.

Na Tabela 4.12 apresentam-se os tipos de ruptura observados nos corpos de prova prismáticos reconstituídos. A observação do tipo de ruptura permite uma avaliação qualitativa da aderência entre os materiais.

Tabela 4.12 - Tipos de ruptura observados nos corpos de prova prismáticos reconstituídos.

Corpo de prova	Material de reparo			
	CPR	ARQ	ARZ	ARE
1	monolítica	adesiva	monolítica	monolítica
2	monolítica	adesiva	monolítica	adesiva
3	monolítica	adesiva	adesiva	adesiva
4	monolítica	adesiva	adesiva	adesiva

Conforme apresentado na Tabela 4.12, todos os corpos de prova reparados com CPR apresentaram rupturas monolíticas (Figura 4.9). Os corpos de prova reparados com argamassas ARE e ARZ apresentaram rupturas monolíticas e adesivas, enquanto os que foram reparados com ARQ apresentaram somente rupturas adesivas (Figura 4.100 e 4.11).

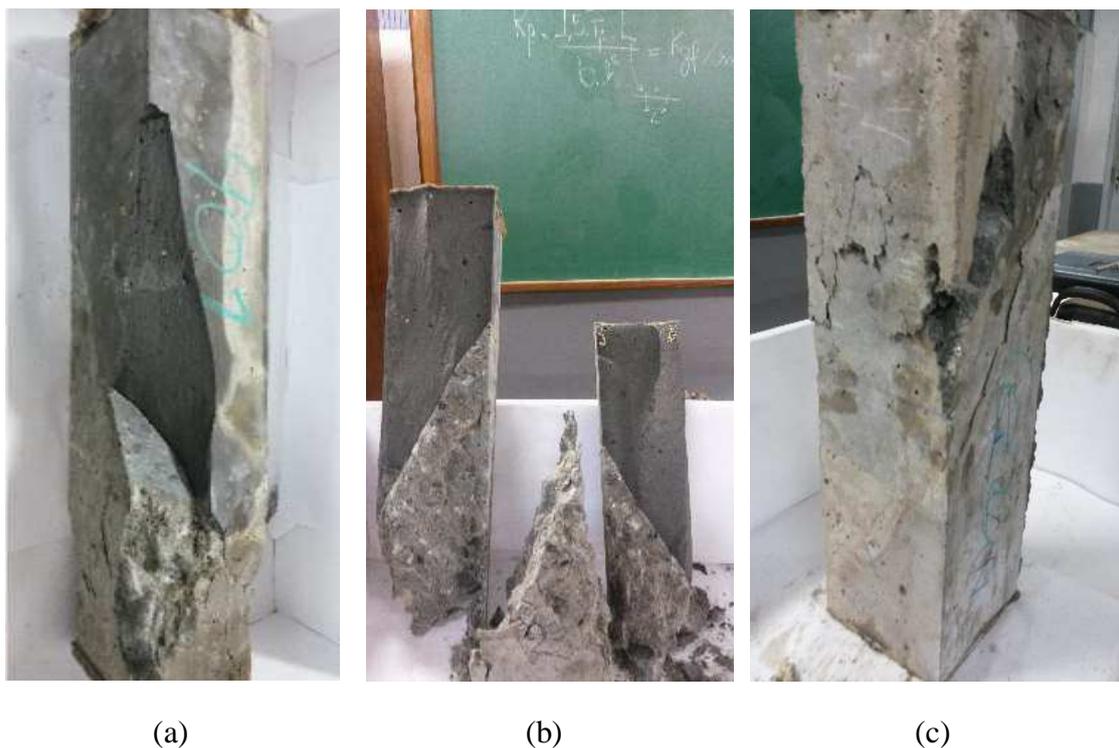


Figura 4.9 - Aspecto da ruptura monolítica de um corpo de prova; (a) e (b) reparado com CPR; (c) reparado com ARZ.



(a)

(b)

Figura 4.11 - Aspecto da ruptura adesiva de um corpo de prova:
 (a) reparado com ARE; (b) reparado com ARQ.



(a)

(b)

Figura 4.101 - Aspecto da ruptura adesiva de um corpo de prova:
 (a) reparado com ARZ; (b) reparado com ARQ.

4.4.1.2 Ensaio de reconstituição do cilindro

Na Tabela 4.13 apresentam-se os resultados da tensão normal de ruptura obtidos no ensaio de reconstituição de cilindros com dimensões de 100 x 200 mm e de 150 x 300 mm,

segundo recomendações de Guerrante *et al.* (2015), aos 28 dias de idade para os materiais de reparo e 56 dias para o concreto base.

Tabela 4.13 - Valores médios da resistência à compressão uniaxial (f_c) nos corpos de prova cilíndricos.

Material	CP cilíndrico 100 x 200 mm				CP cilíndrico 150 x 300mm			
	f_c (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Taxa de recuperação (%)	f_c (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Taxa de recuperação (%)
CB	26,02	0,62	0,02	100,0	27,46	1,58	0,06	100,0
CPR / CB	38,34	0,63	1,65	147,3	33,57	2,22	6,60	122,3
ARQ / CB	36,74	1,43	3,89	141,2	33,41	1,68	5,01	121,7
ARZ / CB	38,61	0,28	0,72	148,4	33,23	0,40	1,22	121,0
ARE / CB	37,02	1,35	3,64	142,3	30,06	0,74	2,45	109,5

Na Tabela 4.14 apresentam-se os resultados de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b30,cil}$) em corpos de prova cilíndricos reconstituídos, com dimensões de 100 x 200 mm, com superfície inclinada a 30° com a horizontal, calculado conforme Expressão 2.2.

Tabela 4.14 - Valores médios da resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm reconstituídos.

Material	$f_{b30,cil}$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Taxa de recuperação (%)
CB	11,27	0,27	2,38	100,00
CPR / CB	14,38	0,20	1,36	127,6
ARQ / CB	13,56	0,55	4,04	120,3
ARZ / CB	14,40	0,11	0,75	127,8
ARE / CB	13,81	0,50	3,63	122,6

Na Tabela 4.15 apresentam-se os resultados da análise de variância (ANOVA) de fator único, para os resultados de reconstituição do cilindro de 100 x 200 mm apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.15 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão para corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,46	3,00	0,49	2,87	0,11	4,35
Dentro dos grupos	1,19	7,00	0,17			
Total	2,65	10,00				

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.15, pode-se afirmar que não existem diferenças significativas entre os materiais ensaiados, ao nível de 5% de significância, com relação à resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm.

Na Tabela 4.16 apresentam-se os resultados de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b30,cil}$) em corpos de prova cilíndricos reconstituídos, com dimensões de 150 x 300 mm, com superfície inclinada a 30° com a horizontal, calculado conforme Expressão 2.2.

Tabela 4.16 - Valores médios da resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm reconstituídos.

Material	$f_{b30,cil}$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Taxa de recuperação (%)
CB	10,36	0,65	0,06	100,0
CPR / CB	12,28	0,50	4,06	118,5
ARQ / CB	12,54	0,60	4,78	121,0
ARZ / CB	12,71	0,13	0,99	122,7
ARE / CB	11,26	0,21	1,88	108,7

Na Tabela 4.17 apresentam-se os resultados da análise de variância (ANOVA) de fator único, para os resultados de reconstituição do cilindro de 150 x 300 mm apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.17 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão para corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,34	3,00	1,11	6,94	0,02	4,76
Dentro dos grupos	0,96	6,00	0,16			
Total	4,30	9,00				

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.17, pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre os materiais ensaiados, ao nível de 5% de significância, com relação à resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm. Para tanto, os resultados foram submetidos ao teste de TUKEY.

De acordo com o teste de TUKEY, para 5% de significância, o CPR e as argamassas industrializadas ARQ e ARZ, estatisticamente, apresentaram o mesmo desempenho, diferenciando-se em relação à argamassa ARE.

Na Tabela 4.18 apresentam-se os tipos de ruptura observados nos corpos de prova cilíndricos reconstituídos. A observação do tipo de ruptura permite uma avaliação qualitativa da aderência entre os materiais.

Tabela 4.18 - Tipos de ruptura observados nos corpos de prova cilíndricos reconstituídos.

Corpo de prova	Material de reparo			
	CPR	ARQ	ARZ	ARE
1	monolítica	monolítica	monolítica	monolítica
2	monolítica	monolítica	monolítica	monolítica
3	monolítica	monolítica	monolítica	monolítica
4	monolítica			monolítica

Conforme apresentado na Tabela 4.18, todos os corpos de prova reparados apresentaram rupturas monolíticas (Figura 4.12, 4.13 e 4.14).



Figura 4.12 - Aspecto de ruptura monolítica de corpos de prova cilíndricos reparados.

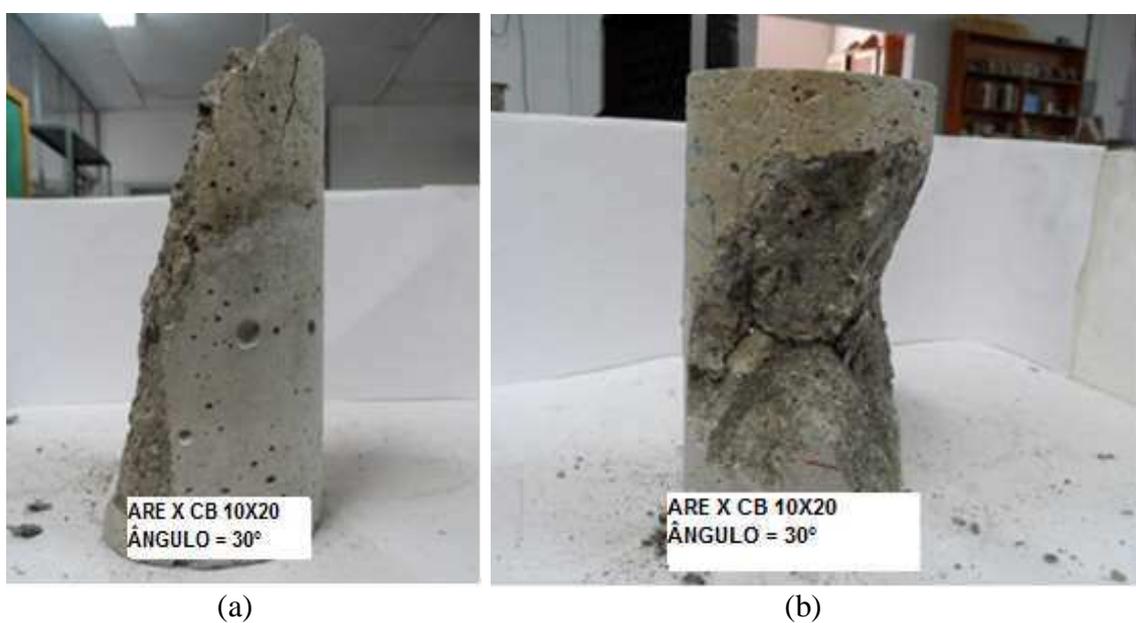


Figura 4.13 - Aspecto da ruptura monolítica de corpos de prova cilíndricos reconstituídos com argamassa de reparo ARE.



Figura 4.14 - Aspecto da ruptura monolítica de um corpo de prova:
(a) reparado com ARE; (b) reparado com ARQ.

4.4.2 Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão

Os resultados do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão têm um caráter qualitativo, sendo a avaliação realizada com base no tipo de ruptura do corpo de prova.

Nas Figura 4.15 e Figura 4.16 apresentam-se alguns aspectos da ruptura dos corpos de prova prismáticos reconstituídos. Todos os corpos de prova reparados apresentaram rupturas do tipo M, monolíticas (Figura 4.15), com exceção de um corpo de prova reparado com argamassa ARE que apresentou ruptura do tipo I-1, por deslocamento do substrato de concreto (Figura 4.16).



(a)



(b)

Figura 4.15 - Aspectos de corpos de prova prismáticos reparados com CPR.



(a)



(b)

Figura 4.16 - Aspectos de corpos de prova prismáticos reparados com argamassa ARE.

4.4.3 Resistência de aderência ao cisalhamento direto

Na Tabela 4.19 apresentam-se os valores médios da resistência ao cisalhamento direto ($f_{b,cd}$), segundo o procedimento CRD C 590, calculado conforme Expressão 2.3.

Tabela 4.19 - Valores médios da resistência de aderência ao cisalhamento direto.

Material	$f_{b,cd}$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Taxa de recuperação (%)
CB	5,32	2,53	47,50	100,0
CPR / CB	7,36	2,94	39,88	138,3
ARQ / CB	2,29	0,32	13,94	43,0
ARZ / CB	0,94	0,43	45,54	17,6
ARE / CB	1,25	0,57	45,95	23,4

Na Tabela 4.20 apresentam-se os resultados da análise de variância (ANOVA) de fator único, para a resistência de aderência ao cisalhamento direto apresentados na Tabela 4.19.

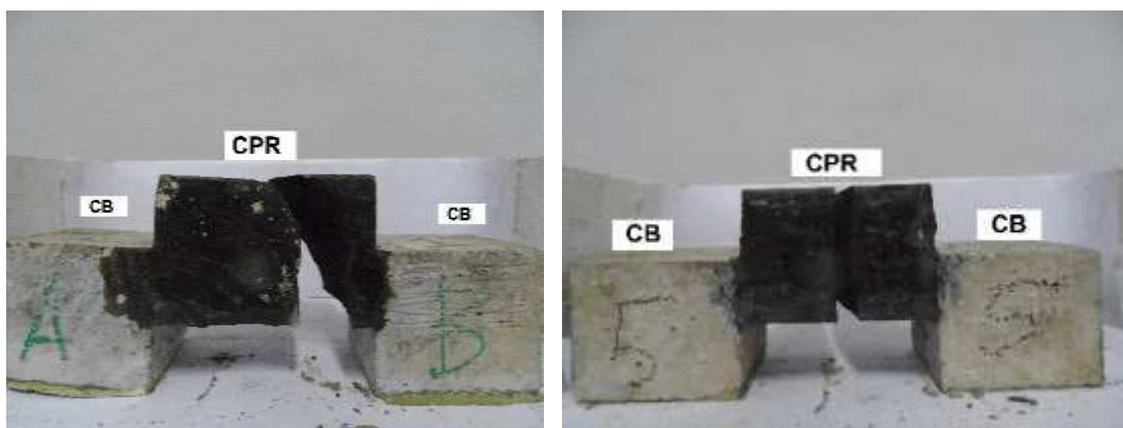
Tabela 4.20 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência ao cisalhamento direto.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	124,4	3,0	41,5	14,8	0,0002	3,4
Dentro dos grupos	36,5	13,0	2,8			
Total	160,9	16,0				

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.20, pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre os materiais ensaiados, ao nível de 5% de significância, com relação à resistência de aderência ao cisalhamento direto. Para tanto, os resultados foram submetidos ao teste de TUKEY.

De acordo com o teste de TUKEY, para 5% de significância, o CPR apresentou, estaticamente, diferença significativa em relação aos demais materiais de reparo.

Nas Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam-se alguns aspectos da ruptura dos corpos de prova compostos de três prismas. Os corpos de prova preenchidos com CPR apresentaram ruptura predominante no material de reparo (Figura 4.17), enquanto que os preenchidos com argamassas de reparo apresentaram ruptura na interface com o concreto base (Figura 4.18).



(a)

(b)

Figura 4.17 - Aspectos de corpos de prova preenchidos com CPR.



(a)

(b)

Figura 4.18 - Aspectos dos corpos de prova preenchidos com argamassas de reparo.

4.4.4 Resistência de aderência à tração direta

Na Tabela 4.21 apresentam-se os valores médios da resistência de aderência à tração direta ($f_{b,td}$) segundo a ABNT NBR 13528:2010.

Tabela 4.21 - Valores médios da resistência de aderência à tração direta.

Material	$f_{b,td}$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
CB	1,16	0,16	0,14
CPR / CB	>1,24	0,26	0,21
ARQ / CB	0,87	0,20	0,23
ARZ / CB	0,88	0,16	0,22
ARE / CB	>1,25	0,28	0,19

Na Tabela 4.22 apresentam-se os resultados da análise de variância (ANOVA) de fator único, para a resistência de aderência à tração apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.22 - Resultados da ANOVA para a resistência de aderência à tração.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,69	3,00	0,23	5,66	0,01	3,24
Entre sujeitos	0,33	4,00	0,08			
Dentro dos grupos	0,82	16,00	0,05			
Total	1,51	19,00				

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.22, pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre os materiais ensaiados, ao nível de 5% de significância, com relação à resistência de aderência à tração. Para tanto, os resultados foram submetidos ao teste de TUKEY.

De acordo com o teste de TUKEY, para 5% de significância, o CPR e a argamassa ARE, estatisticamente, apresentaram o mesmo desempenho, diferenciando-se em relação às argamassas ARQ e ARZ.

Na Tabela 4.23 apresentam-se os tipos de ruptura observados nos corpos de prova cilíndricos arrancados com a aplicação de uma força de tração perpendicular à superfície. A observação do tipo de ruptura permite uma avaliação qualitativa da aderência entre os materiais.

Tabela 4.23 - Formas de ruptura observados nos corpos de prova cilíndricos ensaiados.

Corpo de prova	Material de reparo			
	CPR	ARQ	ARZ	ARE
1	Substrato	Reparo/Substrato	Reparo/Substrato	Reparo
2	Substrato	Reparo/Substrato	Reparo/Substrato	Reparo
3	Substrato	Falha na colagem	Reparo/Substrato	Reparo/Substrato
4	Substrato	Substrato	Reparo/Substrato	Reparo/Substrato
5	Substrato	Reparo/Substrato	Reparo/Substrato	Reparo

Conforme apresentado na Tabela 4.23, todos os corpos de prova reparados com CPR apresentaram rupturas no substrato (concreto base), o que indica que o valor médio da resistência de aderência à tração é maior do que o obtido nos ensaios (Figura 4.19). Os corpos de prova reparados com argamassas ARQ e ARE apresentaram rupturas de forma variada (Figura 4.20 e Figura 4.21), sendo parte no material de reparo e parte no substrato (concreto base). Por último, os corpos de prova reparados com a argamassa ARZ apresentaram rupturas somente na interface reparo/substrato (Figura 4.22).

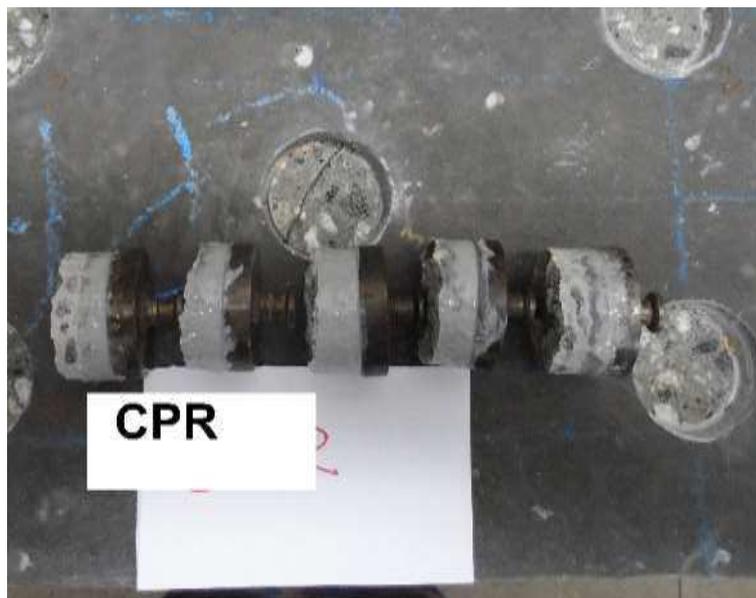


Figura 4.19 - Aspectos dos corpo de prova de CPR após o ensaio de aderência a tração.



Figura 4.20 - Aspectos dos corpo de prova de ARQ após o ensaio de aderência a tração.



Figura 4.21- Aspectos dos corpo de prova de ARE após o ensaio de aderência a tração.



Figura 4.22 - Aspectos dos corpos de prova de ARZ após o ensaio de aderência a tração.

Na Tabela 4.24 apresentam-se os valores médios do teor de umidade dos corpos de prova obtidos nos ensaios de resistência de aderência à tração com materiais de reparo.

Tabela 4.24 - Valores médios do teor de umidade dos corpos de prova obtidos nos ensaios de resistência de aderência à tração.

Material	CB	CPR	ARQ	ARE	ARZ
Teor de umidade (%)	1,44	0,75	1,65	1,75	1,38

4.4.5 Discussão dos resultados

Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão

Ensaio de reconstituição do prisma (Slant Shear)

Com base nos valores médios da tensão normal de ruptura nos corpos de prova prismáticos (f_c) apresentados na Tabela 4.9, pode-se observar que o CPR apresentou uma taxa de recuperação média de 98,9%, enquanto que as argamassas de reparo uma média de 83%.

Conforme apresentado na Tabela 4.10, o CPR apresentou uma resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b60,pr}$) de 12,74 MPa e uma taxa de recuperação de 97,9%. Já as argamassas de reparo apresentaram um valor médio de $f_{b60,pr}$ igual a 10,63 MPa e uma taxa de recuperação média de 82%. Com base nos resultados da Tabela

4.10, observa-se uma alta taxa de recuperação para todos materiais de reparo. Por outro lado, a análise de variância (Tabela 4.11) indicou que não existem diferenças significativas entre essa resistência de aderência para os materiais ensaiados.

Com relação aos tipos de ruptura observados nos corpos de prova prismáticos reconstituídos é importante destacar que aqueles reparados com CPR apresentaram somente rupturas monolíticas, enquanto os reparados com as argamassas apresentaram uma variação do tipo de ruptura. Isto indica que além de apresentar uma alta taxa de recuperação, o CPR também demonstrou capacidade de reestabelecer o monolitismo, o que é uma característica desejável para um bom material de reparo.

Ensaio de reconstituição do cilindro

Com respeito à tensão normal de ruptura nos corpos de prova cilíndricos (f_c) apresentados na Tabela 4.13, pode-se notar que o CPR e as argamassas de reparo apresentaram taxa de recuperação média de 145% para corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm e de 119% para corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm. De acordo com esses resultados, a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos reconstituídos foi sistematicamente superior àquela observada para o concreto base.

Quanto à resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova cilíndricos ($f_{b30,cil}$), com dimensões de 100 x 200 mm (Tabela 4.14), pode-se observar que a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão dos corpos de prova cilíndricos reconstituídos foi superior àquela observada para o concreto base. A análise de variância (Tabela 4.15) indicou que não existem diferenças significativas entre essa resistência de aderência para os materiais ensaiados, reforçando a ideia de que foi alcançada uma alta taxa de recuperação para todos materiais de reparo.

Para os corpos de prova cilíndricos com dimensões de 150 x 300 mm, os resultados da Tabela 4.16 indicaram que todos os materiais de reparo apresentaram resultados de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b30,cil}$) superiores ao valor de referência do concreto base. No entanto, a análise de variância (Tabela 4.17) indicou que existem diferenças significativas entre essa característica para os materiais ensaiados. O Teste de TUKEY realizado indicou que o CPR e as argamassas

industrializadas ARQ e ARZ, estatisticamente, apresentaram o mesmo desempenho, enquanto que a argamassa ARE apresentou um desempenho inferior. Apesar da análise estatística revelar que a argamassa ARE apresentou um desempenho diferente do que os demais materiais de reparo, pode-se observar por meio da análise qualitativa (Tabela 4.18) que todos os materiais de reparo apresentaram rupturas monolíticas.

As rupturas monolíticas observadas para todos os materiais de reparo nos ensaios com corpos cilíndricos do presente trabalho ratificam o que foi observado por Guerrante (2013), que também constatou rupturas monolíticas em todos os corpos de prova 100 x 200 mm com superfície inclinada a 30° com a horizontal.

Os corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm apresentaram um valor médio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão ($f_{b30,cil}$) de 14,0 MPa (Tabela 4.14), enquanto que os corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm um valor médio de 12,2 MPa (Tabela 4.16), o que é cerca de 14,8% superior. Apesar da diferença de resultados, deve-se destacar que os dois corpos de prova possuem uma relação $h/d = 2,0$.

Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão

De acordo com a classificação proposta pela AFNOR NF P 18-851:1992, todos os corpos de prova prismáticos reconstituídos apresentaram rupturas do tipo M (com rompimento do reparo e propagação da fissura para o prisma de concreto, comportando-se de forma monolítica), com exceção de um exemplar reconstituído com a argamassa ARE, que apresentou ruptura do tipo I-1 (com desprendimento da parte inclinada do reparo e desenvolvimento da fissura para o concreto), conforme Figura 4.16.

Resistência de aderência ao cisalhamento direto

Quanto à resistência de aderência ao cisalhamento direto (Tabela 4.19), pode-se observar que somente o CPR apresentou resultado superior ao valor de referência do concreto base, mas com um Coeficiente de Variação elevado, o que denota a grande variabilidade dessa característica mecânica. As argamassas de reparo apresentaram resultados muito inferiores ao valor de referência do concreto base, também com grande variabilidade.

Confirmando o que foi comentado anteriormente, a análise de variância (Tabela 4.21) indicou que existem diferenças significativas entre os materiais ensaiados. De acordo com o Teste de TUKEY, para essa característica o CPR apresentou, estaticamente, diferença significativa em relação aos demais materiais de reparo.

Os tipos de ruptura observados para os corpos de prova preenchidos com CPR, com colapso predominante no material reparado, evidenciam o melhor desempenho desse material com relação aos demais.

Resistência de aderência à tração direta

Com relação à resistência de aderência à tração direta (Tabela 4.21) pode-se observar que o CPR e a argamassa ARE apresentaram resultados superiores ao valor de referência do concreto base, enquanto que as argamassas ARQ e ARZ apresentaram resultados inferiores.

Confirmando o que foi observado nos ensaios, a análise de variância (Tabela 4.22) indica que existem diferenças significativas entre os materiais ensaiados. De acordo com o Teste de TUKEY, o CPR e a argamassa ARE apresentaram, estaticamente, o mesmo desempenho, diferenciando-se em relação às argamassas ARQ e ARZ.

5

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Neste trabalho foi avaliada a resistência de aderência do CPR e de outros materiais de reparo ao concreto convencional com vistas à avaliação de seu potencial como material de reparo estrutural.

Inicialmente foram caracterizados os materiais e traços utilizados para a produção do CPR, do concreto base e de uma das argamassas de reparo (ARE). Posteriormente foram caracterizados os concretos e argamassas no estado fresco e endurecido. Por último,

avaliou-se a compatibilidade dimensional e a aderência entre o concreto base e materiais de reparo.

Para efeitos de comparação do desempenho do CPR quanto à resistência de aderência, optou-se por utilizar três tipos de argamassa, sendo duas industrializadas (ARQ e ARZ) e com histórico bem-sucedido para procedimentos de reparo, e uma terceira, produzida em laboratório, com uso de aditivo expansor (ARE).

Com base nos princípios introduzidos desde o início dos anos 1990 após a publicação do CEB-FIP Model Code 1990, uma das características fundamentais dos materiais de reparo é ter compatibilidade com o concreto do substrato. Para isto, um bom material de reparo deve apresentar características mecânicas próximas às do concreto do substrato, mas não inferior às do mesmo. No entanto, no início dos anos 2000, grandes empresas que atuam no segmento de produtos químicos para construção civil têm oferecido materiais para reparação e reforço de estruturas que apresentam resistência à compressão e módulo de elasticidade muito superiores aos dos substratos de concreto sobre os quais os mesmos usualmente serão aplicados. Esses aspectos contrariam o princípio geral de compatibilidade considerado até então.

No presente trabalho, esses materiais industrializados de reparação e reforço de estruturas foram representados pelas argamassas comerciais ARQ e ARZ. Seguindo uma linha de raciocínio similar, o CPR apresenta resistência à compressão e módulo de elasticidade muito superior aos dos substratos de concreto normalmente encontrados em situações de reparação. Portanto, desde o início do desenvolvimento do trabalho, isso gerou uma grande dúvida quanto à verdadeira possibilidade de utilização do CPR como material de reparo.

Em função dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se afirmar que os materiais e métodos utilizados permitiram uma avaliação consistente do desempenho mecânico dos materiais e da resistência de aderência do CPR ao concreto base. Apesar da alta resistência à compressão e do elevado módulo de elasticidade, o CPR apresenta um desempenho mecânico igual ou superior às argamassas de reparo avaliadas. Os resultados

alcançados indicam o potencial de uso do CPR como material de reparo estrutural, ratificando as conclusões obtidas por Lee *et al.* (2007) e Tayeh *et al* (2015).

5.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

A produção do CPR foi uma dificuldade encontrada durante o desenvolvimento do programa experimental, uma vez que adotou-se uma relação $a/c = 0,18$. Por se tratar de uma relação água/cimento muito baixa, foi necessária uma grande energia de mistura para a perfeita homogeneização do material. Para melhorar as condições de mistura foi utilizada água gelada a aproximadamente 10° C, o que também melhorou a trabalhabilidade do material. Conclui-se que é possível reestudar o traço desse material de forma a se utilizar uma relação água/cimento mais alta, sem prejuízos causados pela redução da resistência à compressão axial, mas com um possível ganho sob o aspecto de produção do CPR.

O CPR produzido no presente trabalho apresentou resistência à compressão axial e módulo de elasticidade muito superiores a essas mesmas características mecânicas do concreto base utilizado.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral, observa-se que o CPR é o único material que apresentou uma resistência superior à do concreto base, da ordem de 15%.

Os resultados para absorção de água demonstraram que o CPR apresentou a menor taxa de absorção de água entre os materiais de reparo estudados.

Quanto à compatibilidade dimensional a longo prazo, o CPR foi o material que apresentou maior variação dimensional nos primeiros 28 dias, estabilizando-se posteriormente. Para o ensaio de curta duração, pode-se observar que para as primeiras horas o CPR apresentou a maior variação dimensional. Em função dos resultados de longa duração, pode-se observar que as argamassas de reparo utilizadas (ARQ, ARZ e ARE) apresentaram uma retração maior do que o CPR.

Em relação à tensão normal de ruptura e à resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova prismáticos reconstituídos, o CPR apresentou um melhor desempenho quando comparado com os demais materiais de reparo.

Quanto à resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão em corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm e 150 x 300 mm, todos os materiais de reparo apresentaram resultados superiores ao valor de referência do concreto base. Somente nos ensaios realizados com corpos de prova de 150 x 300 mm, a argamassa ARE apresentou um desempenho inferior. Para todos os ensaios realizados com corpos de prova cilíndricos, as rupturas foram monolíticas.

Vale também destacar que os corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm apresentaram um valor médio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão superior em cerca de 14,8% em relação aos de 150 x 300 mm. Apesar da diferença de resultados, deve-se destacar que os dois corpos de prova possuem uma relação $h/d = 2,0$.

Com relação à avaliação da resistência de aderência ao cisalhamento na flexão, todos os corpos de prova prismáticos reconstituídos apresentaram rupturas do tipo M, com exceção de um exemplar reconstituído com a argamassa ARE, que apresentou ruptura do tipo I-1.

Quanto à resistência de aderência ao cisalhamento direto, somente o CPR apresentou resultado superior ao valor de referência do concreto base. As argamassas de reparo apresentaram resultados muito inferiores a esse valor.

Para a resistência de aderência à tração, o CPR e a argamassa ARE apresentaram resultados superiores ao valor de referência do concreto base, enquanto que as argamassas ARQ e ARZ apresentaram resultados inferiores.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho diversas questões foram suscitadas e investigadas, porém ainda há outras que merecem ser abordadas em trabalhos futuros, tais como:

- desenvolver novos estudos relativos ao CPR, como a avaliação das características reológicas e desenvolvimento de novas dosagens;
- avaliar a durabilidade do CPR, com exposição de corpos de prova a várias condições agressivas, tais como: temperaturas elevadas, umidade e ambientes quimicamente agressivos;
- avaliar o comportamento vigas de concreto reparadas com o uso de CPR;
- avaliar a influência da variação do módulo de elasticidade sobre a resistência de aderência dos materiais de reparo;
- aprofundar a avaliação da expansão e retração do CPR no estado fresco e endurecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-TAIR, A. I. LAVERY, D. NADJAI, A. RIGDEN, S. R. AHMED, T. M. A. **A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening.** Construction and Building Materials, V. 14, 2000, pp. 171-176.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho.** Sao Paulo: Pini, 2000, 667p.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C157 / C157M-08(2014)e1**, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

_____. **ASTM C882 / C882M-13a** – Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

Association Française de Normalisation. **AFNOR NF P 18-851/1992** – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5733:1991** – Cimento Portland de alta resistência inicial.

_____. **NBR 5738:2015** – Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova.

_____. **NBR 5739:2007** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

_____. **NBR 7211:2009** – Agregados para concreto – Especificação.

_____. **NBR 7212:2012** – Execução de concreto dosado em central – Procedimento.

_____. **NBR 7215:1996** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

_____. **NBR 7222:2011** – Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

_____. **NBR 8522:2008** – Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

_____. **NBR 9202:** – Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Finura por Meio da Peneira 0,044 mm (Número 325). Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 9779:2012** – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.

_____. **NBR 11579:2012** – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).

_____. **NBR 11582:2016** – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier.

_____. **NBR 11768:2011** – Aditivos químicos para concretos de cimento Portland – Requisitos.

_____. **NBR 13278:2005** – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

_____. **NBR 13528:2010** – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.

_____. **NBR 13276:2005** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

_____. **NBR 13279:2005** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

_____. **NBR 13956-1:2012** – Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos.

_____.**NBR 14656:2001** – Cimento Portland e matérias-primas- Análise química por espectrometria de raios X – Método de ensaio.

_____.**NBR 16372:2015** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).

_____.**NBR NM 15:2004** – Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduo insolúvel.

_____.**NBR NM 18:2012** – Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo.

_____.**NBR NM 23:2001** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.

_____.**NBR NM 26:2009** – Agregados – Amostragem.

_____.**NBR NM 30:2001** – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água

_____.**NBR NM 33:1998** – Concreto – Amostragem de concreto fresco.

_____.**NBR NM 43:2003** – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal.

_____.**NBR NM 45:2006** – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

_____.**NBR NM 46:2003** – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.

_____.**NBR NM 47:2002** – Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico.

_____.**NBR NM 65:2002** – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.

_____.**NBR NM 67:1998** – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

_____.**NBR NM 76**: Cimento Portland – Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____.**NBR NM 248:2003** – Agregados – Determinação da composição granulométrica.

BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2001, 203 p.

BIZ, C. E. **Concreto de Pós Reativos**. 2001, 101 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BONNEAU, O. POULIN, C. DUGAT, J. RICHARD, P. AITCIN, P. C. **Reactive powder concretes: from theory to practice**. Concrete International. v. 18, n. 4, p. 47-49, Apr, 1996.

BRITISH STANDARD. – **BS EN 12615:1999** – Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of slant shear strength.

_____.**BS EN 1542:1999** – Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Measurement of bond strength by pull-of.

_____.**BS EN 1766:2000** – Products and systems for the protection and repair of concrete structures- Test methods -Reference concretes for testing.

_____.**BS EN 1881:1992–part 207**– Testing concrete. Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests.

CARASEK, H. DJANIKIAN, J. G. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a unidades de alvenaria**. 1997, 22 p. Boletim técnico da escola politécnica da USP, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CLÍMACO, J.C.T. **Repair of Structural Concrete Involving the Addition of**

New Concrete, 1990, 233p. Tese (Doutorado), Polytechnic of Central London, U.K, Londres.

CHEYREZY, M. **Structural applications of RPC**. 1999, Concrete, London.

CHRIST, R. **Contribuição ao Estudo do Concreto de Pós Reativos**. 2011, 93 p. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo,

_____. **Uma análise crítica dos métodos de avaliação de aderência e do uso de agentes adesivos no reparo de estruturas de concreto**. In: XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. Porto Alegre, RS, Brasil, novembro 11-15, 1991.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. Thomas Telford. 1993. 457 p.

COPOLLA, L. TROLI, R. CERULLI, T. *et al.* **The influence of materials on the performance of reactive powder concrete**. In: International Congress on High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, 1996, June, Florianópolis: Brasil. Florianópolis: High Performance Concrete, 1996, p.502-513.

COPPOLA, L. TROLI, R. BORSOI, A. *et al.* **Influence of superplasticizer type on the compressive strength of reactive powder mortars**. In: Fifth CANMETIACI SP-173, 1997, Rome: Italy. Proceedings. Rome: Chemical Admixtures, 1997, SP-173-27, p.537-557.

EMMONS, P. H. (1994), **Concrete repair and maintenance**. Kingston, R. S. Means Company, Inc. 1994. 295p.

EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M. **System concept in design and construction of durable concrete repairs**. Construction and Building Materials, V. 10, N° 1, 1996, pp. 69-75.

FERNANDES, D. V. **Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina Epóxi**. 2011. 160 p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

FREITAS, J. C. **Uso de aditivo redutor de retração no combate à retração em argamassas auto-adensáveis de alta resistência.** 2009. 170 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, COPPE. Rio de Janeiro, 2005.

GALLETTO, A. **Reparo de estruturas de concreto: contribuição ao estudo de aderência.** 2005, 159 p. Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2005.

GARCIA, S.R.A. **Avaliação da resistência de aderência de materiais para reparo de estruturas de concreto.** 1998. 159 p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1998.

GOLDMAN A., BENTUR, A. **Bond effects in high-strength silica-fume concretes.** ACI Materials Journal. v.86, n.5. September-October, 1989. p.962-972.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** 2002, 139p. Tese (Doutorado), Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GUERRANTE, I. F. **Estudo teórico e experimental da junção de concretos de diferentes resistências por meio de adesivos epóxi.** 2013, 177 p. Tese (Doutorado), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niteroi, Rio de Janeiro, 2013.

GUERRANTE, I.F. SÁNCHEZ, E.S. CARNEIRO, L.A.V. **revista Matéria**, v.20, n.4, pp. 804 – 818, 2015.

GRULLON P, M.R. **Estudo de fissuração associada à retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto.** 2004, 107 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Departamento de Engenharia de Construção civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

HELENE, P. R. L. **Ensaio para controle de adesivos epóxi destinados a estrutura de concreto** - Tecnologia de Edificações (IPT), São Paulo, Pini, 1988.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª ed., São Paulo: Editora Pini, 1992.

ISAIA, G.C. HELENE, P. R. L. TUTIKIAN, B.F. **Concreto de alto e ultra alto desempenho**. Concreto: ciência e tecnologia. 1 ed. São Paulo. Ibracon, 2011, p. 1283-1325. v.2.

LARRARD, F. **Ultrafine particles for the making of very high strength concretes**. Ciment and Concrete Research. v. 19, p. 161-172, 1989.

LEE, M. G. WANG, Y. CHIU, C.T. **A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material**: Construction and Building Materials n. 21, p.182–189, 2007.

MATTOS, F. V. **Contribuição ao Estudo de Argamassas de Recuperação Superficial em Estruturas de Concreto Armado**. 2002, 194 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, PPGEC. Vitória, 2002.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, Pini, 1 Edição, 1994.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MORENO, JR. R. SELMO, S. M. S. **Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto**. São Pulo: EPUSP, 2007. 20 p.

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 1504-3:2006** – Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão; Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade; Parte: 3 Reparação estrutural e não estrutural.

_____. **NP EN 1504-4:2004** – Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão; Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade; Parte: 4 Colagem estrutural.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho.** 1998, 179 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado.** 2001, 113 . Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2001.

RIBEIRO, J. L. S. **Contribuição para a avaliação da compatibilidade eletroquímica entre as argamassas de reparo e concreto carbonatado.** 2009, 122 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RICHARD, P. CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes.** In: Cement and Concrete Research, vol. 25, n. 07, oct, 1995, p.1501-1511.

RIPPER, T. SOUZA, V. C. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo, Pini, 1ª edição, 1998.

ROCHA, C. C. **Durabilidade – Palavra bonita, mas muito pouca compreendida.** Revista Recuperar. Março/abril, 1997.p. 28-34.

SANTANA, L. A. **Estudo da aderência entre concretos de diferentes idades.** 2004, 92 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2004.

SOTO, N. T. A. **Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: um estudo de durabilidade.** 2013, 58 p. Monografia (Especialização em Patologias das Construções), Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SOUZA, R. H. F. **Análise do Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão e ao esforço transversal.** Lisboa, Tese (Doutorado) - Universidade Técnica de Lisboa, 1990.

SOUZA, R. H. F. **Notas de Aula de Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, UERJ, 2009.

TAVARES, M. E. N. **Estudo experimental de vigas de concreto protendido – influência da variação da aderência aço-concreto na flexão**. 2000, 249 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2000.

TAYEH, B.A. ABU BAKAR, B.H. MEGAT JOHARI, M.A. **Assessment of adhesion between RPC overlay and existing concrete substrate**, Applied Mechanics and Materials Vol. 802 (2015) pp 95-100.

TUTIKIAN, B. F. ISAIA, G. C. HELENE, P. R. L. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAIA, G. Concreto: Ciência e Tecnologia. Florianópolis: IBRACON, 2011. Cap. 36. Vol. 2

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

APÊNDICE **A**

Resultados para os ensaios de compatibilidade dimensional

Apresenta-se neste apêndice os resultados obtidos no laboratório de concreto da Nacional Cimentos para os ensaios de compatibilidade dimensional do CB, CPR, ARQ, ARZ e ARE.

Retração do concreto

Retração

Método realizado em barras de concreto

Certificado: 7.524

ASTM C 157 - 08
Standard Test Method for Length
Change of Hardened Hydraulic-Cement
Mortar and Concrete



Companhia Nacional de Cimento
BR 040, km 474 - Zona Rural
Sete Lagoas, MG - CEP 35.705-970
www.cimentonacional.com.br
tecnico@brnancimentos.com.br

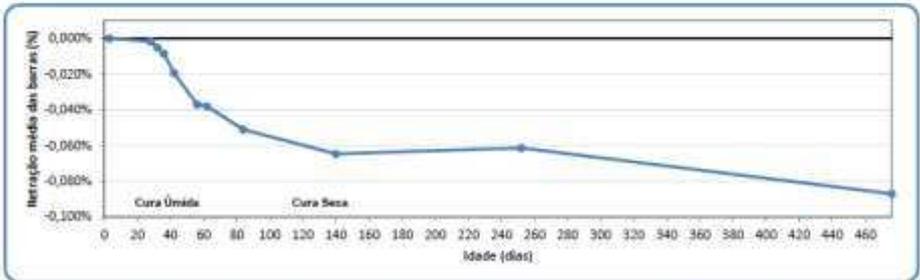
Identificação

Interessado: Podreira Um Valermix (Traço Base realizado no misturador) Série: 7524 Data: 03/08/15

Material	Registro	M. Esp. (kg/m³)	Descrição	Qtd. (%)	Traço unitário	Traço kg/m³
Aglomerante A:	7.449	3.030	CP V ARI RS, Granel, Holcim, Holcim Brasil, Pedro Leopoldo - MG	100	1,000	
Aglomerante B:		1.000			1,000	
Agregado miúdo A:	7.453	2.600	Areia Natural, Rio Doce, Governador Valadares - MG			1,000
Agregado miúdo B:	7.454	2.680	Areia Artificial			1,000
Agregado miúdo c:		1.000				1,000
Agregado graúdo A:	7.456	2.650	Brita 0			1,000
Agregado graúdo B:		1.000				1,000
Agregado graúdo C:		1.000				1,000
Aditivo / Adição a:	7.460	1.20	Aditivo FK 830, MC Bauchemie, Vargem Grande Paulista - SP			1,00%
Aditivo / Adição b:						
Aditivo / Adição c:						
Água:						0

Determinação da retração em barras de concreto

Data	Idade	Leituras (mm)				Retração individual				Retração média	Observações
		001	002	003	004	001	002	003	004		
06/08/15	3 dias	1,791	3,060	4,135	3,665	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	
31/08/15	28 dias	1,789	3,054	4,128	3,660	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	0,00%	
04/09/15	32 dias	1,783	3,049	4,115	3,644	-0,003	-0,004	-0,007	-0,007	-0,01%	
08/09/15	36 dias	1,777	3,044	4,102	3,628	-0,005	-0,005	-0,011	-0,011	-0,01%	
14/09/15	42 dias	1,746	3,012	4,067	3,598	-0,015	-0,016	-0,023	-0,023	-0,02%	
20/09/15	56 dias	1,695	2,962	4,010	3,548	-0,033	-0,033	-0,042	-0,040	-0,04%	
04/10/15	62 dias	1,694	2,958	4,009	3,541	-0,033	-0,035	-0,043	-0,042	-0,04%	
26/10/15	84 dias	1,658	2,922	3,967	3,502	-0,045	-0,047	-0,057	-0,055	0,05%	
21/12/15	140 dias	1,612	2,878	3,896	3,502	-0,061	-0,062	-0,081	-0,055	0,06%	
11/04/16	252 dias	1,646	2,896	3,933	3,452	-0,049	-0,056	-0,068	-0,072	0,06%	
21/11/16	476 dias	1,546	2,824	3,842	3,412	-0,083	-0,080	-0,099	-0,086	0,09%	



Atualização: terça-feira, 22 de novembro de 2016

Ednaldo Ribeiro Martins
Analista de Laboratório de Concreto

Tiago Andrade Couto
Coordenador de Produtos e Assessoria Técnica

Versão 2.0 - Revisão 27/10/2014

Figura A - 1. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do CB.

Retração do concreto

Retração

Método realizado em barras de concreto

Certificado: 7.500

ASTM C 157 - 08

Standard Test Method for Length
Change of Hardened Hydraulic-Cement
Mortar and Concrete



Companhia Nacional de Cimento
BR 040, km 474 - Zona Rural
Sete Lagoas, MG - CEP 35.701-970
www.cimentonacional.com.br
tecnico@brennandcimentos.com.br

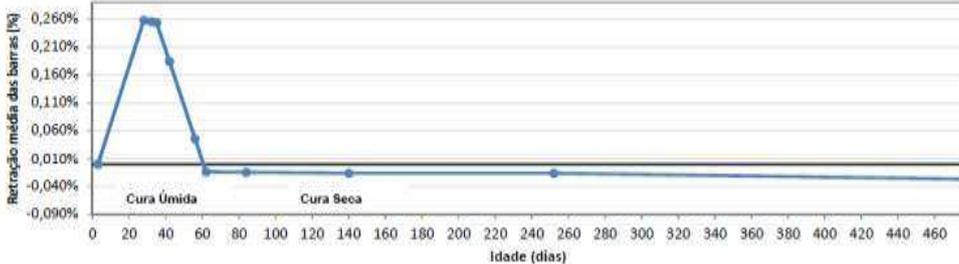
Identificação

Interessado: Pedreira Um Valemix (Traço CPR realizado na argamassadeira) Série: 7500 Data: 28/07/15

Material	Registro	M. Esp. (kg/m³)	Descrição	Qtd. (%)	Traço unitário	Traço kg/m³
Algerante A:	7.449	3.030	CP V ARI RS, Granel, Holcim, Holcim Brasil, Pedro Leopoldo - MG	100	1,000	
Aglomerante B:	7.457	5.050	Microsilica Braskem, Parque Capuava, Santo André - SP	25	1,000	
Agregado miúdo A:	7.452	2.650	Areia de Quartzo, Mineração Jundum, Descalvado - SP	75,0	1,353	
Agregado miúdo B:	7.455	2.650	Pó de Quartzo, Mineração Jundum, Descalvado - MG	25,0	0,503	
Agregado miúdo c:		1.000			0,000	
Agregado graúdo A		1.000			0,000	
Agregado graúdo B		1.000			0,000	
Agregado graúdo C		1.000			0,000	
Aditivo / Adição A:	7.461	1.20	Glentium 51, Basf, São Paulo - SP	30,00	30,00%	
Aditivo / Adição B:					0,00%	
Aditivo / Adição c:					0,00%	
Água:					0,230	

Determinação da retração em barras de concreto

Data	Idade	Leituras (mm)				Retração individual				Retração média	Observações
		001	002	003	004	001	002	003	004		
31/07/15	3 dias	2,120	1,983	1,943	2,555	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	
25/08/15	28 dias	2,883	2,747	2,701	3,311	0,259	0,259	0,257	0,256	0,26%	
29/08/15	32 dias	2,877	2,739	2,695	3,306	0,257	0,256	0,255	0,255	0,26%	
01/09/15	35 dias	2,870	2,731	2,689	3,301	0,254	0,254	0,253	0,253	0,25%	
08/09/15	42 dias	2,665	2,526	2,484	3,098	0,185	0,184	0,183	0,184	0,18%	
22/09/15	56 dias	2,255	2,117	2,073	2,692	0,046	0,046	0,044	0,046	0,05%	
28/09/15	62 dias	2,079	1,942	1,897	2,518	-0,014	-0,014	-0,016	-0,013	-0,01%	
20/10/15	84 dias	2,076	1,940	1,898	2,517	-0,015	-0,015	-0,015	-0,013	-0,01%	
15/12/15	140 dias	2,073	1,938	1,896	2,505	-0,016	-0,015	-0,016	-0,017	-0,02%	
05/04/16	252 dias	2,071	1,939	1,894	2,505	-0,017	-0,015	-0,017	-0,017	-0,02%	
15/11/16	476 dias	2,047	1,909	1,856	2,474	-0,025	-0,025	-0,029	-0,027	-0,03%	



Atualização: quarta-feira, 16 de novembro de 2016

Edraldo Ribeiro Martins
Analista de Laboratório de Concreto

Tiago Andrade Couto
Coordenador de Produtos e Assessoria Técnica

Versão 1.0 - Revisão 27/10/2014

RE-ASS'

Figura A - 2. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do CPR.

Retração do concreto

Retração

Método realizado em barras de concreto

Certificado: 8.139

ASTM C 157 - 08
Standard Test Method for Length
Change of Hardened Hydraulic-Cement
Mortar and Concrete



Companhia Nacional de Cimento
BR 040, km 474 - Zona Rural
Sete Lagoas, MG - CEP 35.701-970
www.cimentonacional.com.br
tecnico@brennandcimentos.com.br

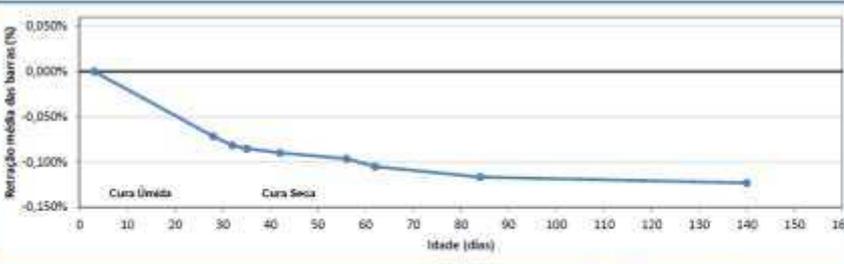
Identificação

Interessado: **Pedreira Um Valemix | Traço Argamassa para reparo estrutural - realizado no Misturad** Série: **8139** Data: **07/12/15**

Material	Registro	M.Exp. (kg/m³)	Descrição	Qtd. (%)	Traço unitário	Traço kg/m³
Argamante A:	7.457	3.030	Argamassa para Reparo estrutural - Q	100	1.000	
Aglomerante B:		1.000			1.000	
Agregado miúdo A:		1.000			0,000	
Agregado miúdo B:		1.000			0,000	
Agregado miúdo C:		1.000			0,000	
Agregado graúdo A:		1.000			0,000	
Agregado graúdo B:		1.000			0,000	
Agregado graúdo C:		1.000			0,000	
Aditivo / Adição A:		1.000			0,00%	
Aditivo / Adição B:					0,00%	
Aditivo / Adição C:					0,00%	
Água:					0,000	

Determinação da retração em barras de concreto

Data	Idade	Leituras (mm)				Retração individual				Retração média	Observações
		001	002	003	004	001	002	003	004		
10/12/15	3 dias	1,291	1,456	1,753	1,646	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	
04/01/16	28 dias	1,105	1,246	1,581	1,369	-0,061	-0,071	-0,058	-0,094	-0,07%	
08/01/16	32 dias	1,081	1,199	1,557	1,348	-0,071	-0,087	-0,066	-0,101	-0,08%	
11/01/16	35 dias	1,068	1,191	1,542	1,341	-0,076	-0,090	-0,072	-0,103	-0,09%	
18/01/16	42 dias	1,050	1,181	1,525	1,330	-0,082	-0,093	-0,077	-0,107	-0,09%	
01/02/16	56 dias	1,036	1,166	1,506	1,302	-0,086	-0,098	-0,084	-0,117	-0,10%	
07/02/16	62 dias	1,000	1,148	1,481	1,277	-0,099	-0,104	-0,092	-0,125	-0,11%	
29/02/16	84 dias	0,973	1,125	1,422	1,249	-0,108	-0,112	-0,111	-0,135	-0,12%	
25/04/16	140 dias	0,961	1,115	1,401	1,217	-0,112	-0,116	-0,119	-0,145	-0,12%	
15/08/16	252 dias	0,982	1,128	1,378	1,216	-0,105	-0,111	-0,127	-0,146	-0,12%	
27/03/17	476 dias									#0%/0!	



Atualização: segunda-feira, 15 de agosto de 2016

Edisio Roberto Martins
Edisio Roberto Martins
Supervisor de Laboratório de Concreto

Tiago Andrade Couto
Tiago Andrade Couto
Gerente de Produtos e Assessoria Técnica

Versão 1.0 - Revisão 27/10/2014

RE-ASTEC-021

Figura A - 3. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do ARQ.

Retração do concreto

Retração

Método realizado em barras de concreto

Certificado: 8.756

ASTM C 157 - 08
Standard Test Method for Length
Change of Hardened Hydraulic-Cement
Mortar and Concrete



Companhia Nacional de Cimento
BR 040, km 474 - Zona Rural
Sete Lagoas, MG - CEP 35.701-970
www.cimentonacional.com.br
tecnico@brennandcimentos.com.br

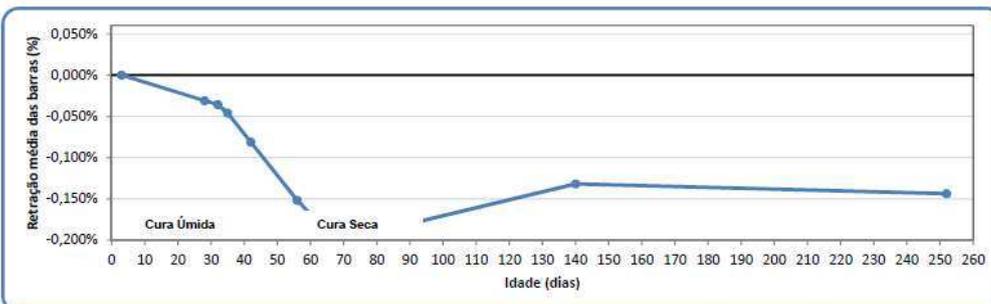
Identificação

Interessado: Pedreira Um Valemix (Dosagem experimental de argamassa - Reboco) Série: 8756 Data: 05/04/16

Material	Registro	M.Esp. (kg/m³)		Descrição	Qty. (%)	Traço unitário	Traço kg/m³
Algomerante A:	8.755	3.030	Z	Argamassa Polimérica,	100		
Aglomerante B:							
Agregado miúdo A:							
Agregado miúdo B:							
Agregado miúdo c:							
Agregado graúdo A							
Agregado graúdo B							
Agregado graúdo C							
Aditivo / Adição A:							
Aditivo / Adição B:							
Aditivo / Adição c:							
Água:							

Determinação da retração em barras de concreto

Data	Idade	Leituras (mm)				Retração individual				Retração média	Observações
		001	002	003	004	001	002	003	004		
08/04/16	3 dias	3,998	4,028	3,754	4,604	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	
03/05/16	28 dias	3,908	3,936	3,665	4,508	-0,031	-0,031	-0,030	-0,033	-0,03%	
07/05/16	32 dias	3,895	3,924	3,651	4,493	-0,035	-0,035	-0,035	-0,038	-0,04%	
10/05/16	35 dias	3,858	3,895	3,626	4,463	-0,047	-0,045	-0,043	-0,048	-0,05%	
17/05/16	42 dias	3,751	3,786	3,522	4,366	-0,084	-0,082	-0,079	-0,081	-0,08%	
31/05/16	56 dias	3,522	3,601	3,319	4,151	-0,161	-0,145	-0,147	-0,154	-0,15%	
06/06/16	62 dias	3,488	3,503	3,231	4,076	-0,173	-0,178	-0,177	-0,179	-0,18%	
28/06/16	84 dias	3,400	3,577	3,153	4,062	-0,203	-0,153	-0,204	-0,184	-0,19%	
23/08/16	140 dias	3,374	3,556	3,836	4,064	-0,212	-0,160	0,028	-0,183	-0,13%	
13/12/16	252 dias	3,297	3,498	3,821	4,072	-0,238	-0,180	0,023	-0,180	-0,14%	
25/07/17	476 dias									#DIV/0!	



Atualização: quinta-feira, 15 de dezembro de 2016

Ednaldo Ribeiro Martins
Supervisor de Laboratório de Concreto

Tiago Andrade Couto
Gerente de Produtos e Assessoria Técnica

Versão 1.0 - Revisão 27/10/2014

Figura A - 4. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional do ARZ.

Retração do concreto

Retração

Método realizado em barras de concreto

Certificado: 8.673

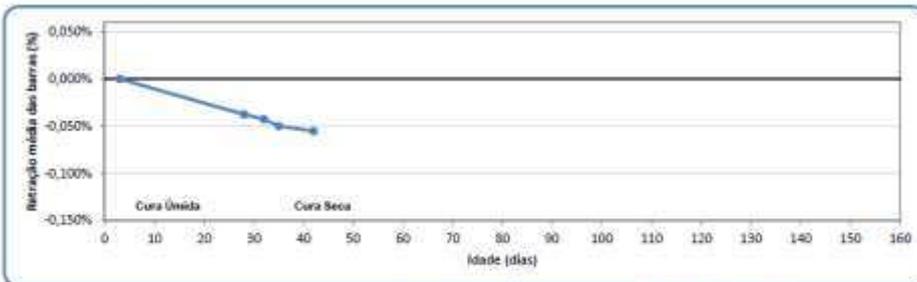
ASTM C 157 - 08
Standard Test Method for Length
Change of Hardened Hydraulic-Cement
Mortar and Concrete



Companhia Nacional de Cimento
BR 040, km 474 - Zona Rural
Sete Lagoas, MG - CEP 35.701-970
www.cimentonacional.com.br
tecnico@brennandcimentos.com.br

Identificação						
Intermediário: Pedreira Um Valermix (Dosagem experimental de argamassa - Reboco)			Série: 8631	Data: 21/03/16		
Material	Registro	M. Esp. (kg/m³)	Descrição	Qtd. (%)	Traço unitário	Traço kg/m³
Aglomerante A:	8.539	1.030	CP V ARI RS, Granel, Holcim, Holcim Brasil, Pedro Leopoldo - MG	100		
Aglomerante B:						
Agregado miúdo A:	8.539	2.680	Areia Artificial	100,0		
Agregado miúdo B:						
Agregado miúdo C:						
Agregado graúdo A:						
Agregado graúdo B:						
Agregado graúdo C:						
Aditivo / Adição A:	8.537		MC-Quellmittel, MC-Bauchemie, Vargem Grande Paulista - SP	0,40		
Aditivo / Adição B:						
Aditivo / Adição C:						
Água:						

Determinação da retração em barras de concreto											
Data	Idade	Leituras (mm)				Retração individual				Retração média	Observações
		001	002	003	004	001	002	003	004		
24/03/16	3 dias	4.058	3.490	3.829	4.692	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	
18/04/16	28 dias	3.951	3.375	3.726	4.574	-0,036	-0,039	-0,035	-0,040	-0,04%	
22/04/16	32 dias	3.937	3.363	3.706	4.560	-0,041	-0,043	-0,042	-0,045	-0,04%	
25/04/16	35 dias	3.926	3.352	3.680	4.522	-0,045	-0,047	-0,051	-0,058	-0,05%	
02/05/16	42 dias	3.908	3.336	3.665	4.508	-0,051	-0,052	-0,056	-0,062	-0,06%	
16/05/16	56 dias	3.892	3.316	3.653	4.494	-0,056	-0,059	-0,060	-0,067	-0,06%	
22/05/16	62 dias	3.881	3.309	3.643	4.480	-0,060	-0,061	-0,062	-0,070	-0,06%	
13/06/16	84 dias	3.876	3.306	3.647	4.484	-0,062	-0,062	-0,062	-0,071	-0,06%	
08/08/16	140 dias	3.868	3.297	3.649	4.496	-0,064	-0,065	-0,061	-0,066	-0,06%	
28/11/16	252 dias	3.812	3.229	3.565	4.419	-0,083	-0,088	-0,089	-0,093	-0,09%	
10/07/17	476 dias									#DIV/0!	



Atualização: quarta-feira, 30 de novembro de 2016

Ednaldo Ribeiro Martins
Supervisor de Laboratório de Concreto

Tiago Andrade Gouto
Gerente de Produtos e Assessoria Técnica

Versão 1.0 - Revisão 27/10/2018

Figura A - 5. Resultados do ensaio de compatibilidade dimensional da ARE.

APÊNDICE **B**

Resultados dos ensaios de compressão e módulo de elasticidade

Neste apêndice apresenta-se os resultados do ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade para CB, CPR, ARQ, ARZ e ARE.

APÊNDICE **C**

Análise estatística ANOVA – TUKEY

Apresenta-se neste apêndice os resultados das análises estatísticas ANOVA e TUKEY, realizadas para os ensaios de aderência.

ANOVA

Ensaio resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão

Ensaio de reconstituição do prisma ($f_{b60,pr}$)

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CPR/CB	4	50,966	12,741	0,0138
ARQ/CB	4	42,323	10,581	0,1259
ARE/CB	4	41,630	10,407	2,9928
ARZ/CB	4	43,639	10,910	2,4814

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	13,862	3,000	4,621	3,292	0,058	3,490
Dentro dos grupos	16,842	12,000	1,403			
Total	30,703	15,000				

Ensaio de reconstituição do Cilindro ($f_{b30,cil}$)

Ra - cilindro 10x20

CB	CPR / CB	ARQ / CB	ARE / CB	ARZ / CB
11,27	14,16	13,06	14,32	14,48
11,54	14,50	14,15	13,32	14,32
11,00	14,50	13,46	13,79	

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CPR/CB	3,000	43,153	14,384	0,038
ARQ/CB	3,000	40,671	13,557	0,299
ARE/CB	3,000	41,430	13,810	0,251
ARZ/CB	2,000	28,801	14,401	0,012

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,461	3,000	0,487	2,867	0,113	4,347
Dentro dos grupos	1,189	7,000	0,170			
Total	2,650	10,000				

Cilindro 15x30

RA - cilindro 15x30

CB	CPR / CB	ARQ / CB	ARE / CB	ARZ / CB
9,98	12,11	12,96	11,44	12,62
11,11	12,84	12,11	11,32	12,80
9,99	11,88		11,03	

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CPR/CB	3,000	36,834	12,278	0,248
ARQ/CB	2,000	25,074	12,537	0,359
ARE/CB	3,000	33,781	11,260	0,045
ARZ/CB	2,000	25,421	12,711	0,016

ANOVA

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,336	3,000	1,112	6,943	0,022	4,757
Dentro dos grupos	0,961	6,000	0,160			
Total	4,297	9,000				

TUKEY

	Médias	Comparando	<i>q</i>	<i>dms</i>	Dif. Médias	Módulo	
A	12,278	AB			-0,26	0,260	IGUAL
B	12,537	AC			1,02	1,020	IGUAL
C	11,260	AD	4,900	1,132	-0,43	0,430	IGUAL
D	12,711	BC			1,28	1,280	DIFERENTE
		BD			-0,17	0,170	IGUAL
		CD			-1,45	1,450	DIFERENTE

ANOVA

Ensaio resistência de aderência ao cisalhamento na flexão

Ensaio de tração na flexão NF 18.

CB	CPR / CB	ARQ / CB	ARE / CB	ARZ / CB
3,46	3,93	4,80	4,40	4,65
3,75	3,51	5,17	4,39	3,59
3,78	4,01	4,63	3,92	5,08
3,38	4,51	4,61	5,38	

Anova: fator
único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CPR/CB	4,000	15,960	3,990	0,167
ARQ/CB	4,000	19,207	4,802	0,067
ARE/CB	4,000	18,078	4,519	0,377
ARZ/CB	3,000	13,321	4,440	0,589

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,359	3,000	0,453	1,654	0,234	3,587
Dentro dos grupos	3,012	11,000	0,274			
Total	4,371	14,000				

ANOVA

Ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto ($f_{b,cd}$)

Ensaio Tração cisalhamento direto C590

CB	CPR / CB	ARQ / CB	ARE / CB	ARZ / CB
9,39	4,59	2,10	0,83	0,49
5,83	9,43	2,05	1,61	0,98
4,85	11,44	2,75	0,97	1,34
3,03	6,05	2,26	2,07	
3,51	5,32		0,75	

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CPR/CB	5,000	36,815	7,363	8,623
ARQ/CB	4,000	9,161	2,290	0,102
ARE/CB	5,000	6,226	1,245	0,327
ARZ/CB	3,000	2,808	0,936	0,182

ANOVA

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor-P	<i>F crítico</i>
Entre grupos	124,427	3,000	41,476	14,784	0,000	3,411
Dentro dos grupos	36,472	13,000	2,806			
Total	160,899	16,000				

TUKEY

	Médias	Comparando	<i>q</i>	<i>dms</i>	Dif. Médias	Módulo	
A	7,363	AB			5,07284	5,073	DIFERENTE
B	2,290	AC			6,11791	6,118	DIFERENTE
C	1,245	AD	4,150	3,109	6,42695	6,427	DIFERENTE
D	0,936	BC			1,04507	1,045	IGUAL
		BD			1,35412	1,354	IGUAL
		CD			0,30905	0,309	IGUAL

ANOVA

Ensaio resistência de aderência à tração ($f_{b,td}$)

Ensaio Tração direta NBR13528-28 dias MPa

CB	CPR / CB	ARQ / CB	ARE / CB	ARZ / CB
1,30	1,67	0,68	1,06	1,04
1,12	1,23	1,11	1,69	1,03
0,92	0,99	0,87	0,99	0,67
1,15	1,23	0,74	1,36	0,91
1,30	1,08	0,95	1,16	0,75

Anova: fator único

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CPR/CB	5,000	6,192	1,238	0,069
ARQ/CB	4,000	3,475	0,869	0,039
ARE/CB	5,000	6,264	1,253	0,079
ARZ/CB	5,000	4,393	0,879	0,027

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,654	3,000	0,218	4,001	0,028	3,287
Dentro dos grupos	0,817	15,000	0,054			
Total	1,471	18,000				

TUKEY

	Médias	Comparando	q	dms	Dif. Médias	Módulo	
A	1,238	AB			0,36929325	0,370	IGUAL
B	0,869	AC			-0,0144866	0,010	IGUAL
C	1,253	AD	4,050	0,409	0,35969964	0,360	IGUAL
D	0,879	BC			-0,3837799	0,380	IGUAL
		BD			-0,0095936	0,010	IGUAL
		CD			0,37418624	0,370	IGUAL

ANOVA e TUKEY realizados no software PAST

One-way ANOVA, repeated measures					
	Sum of squares	df	Mean square	F	p(same)
Between groups:	0,688815	3	0,229605	5,664	0,01184
Within groups:	0,81768	16	0,051105		
Between subjects:	0,33122	4	0,082805		
Total:	1,50649	19			
omega^2:	0,3438				
Levene's test for homogeneity of variance:	0,6683				
Based on medians:	0,8543				
Welch F test in the case of unequal variances:					
Tukey's pairwise comparisons: Q below diagonal, p(same) above diagonal					
	A	B	C	D	
A		0,05585	0,9997	0,06387	
B	4,109		0,04749	0,9998	
C	0,1333	4,242		0,05436	
D	3,998	0,1111	4,131		