



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Francielly Isabel de Andrade Madeiro

**Estudo da aderência entre concreto e argamassas**

Rio de Janeiro

2019

Francielly Isabel de Andrade Madeiro

**Estudo da aderência entre concreto e argamassas**



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

Orientadoras:      Profa. Dra. Regina Helena Ferreira de Souza  
                                 Profa. Dra. Margareth da Silva Magalhães

Rio de Janeiro  
2019

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

M181 Madeiro, Francielly Isabel de Andrade.  
Estudo da aderência entre concreto e argamassas / Francielly  
Isabel de Andrade Madeiro. – 2019.  
154f.

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

1. Concreto - Teses. 2. Argamassa - Teses. 3. Resistência de  
materiais - Teses. 4. Cisalhamento - Teses. I. Souza, Regina  
Helena Ferreira de. II. Magalhães, Margareth da Silva. III.  
Universidade do Estado do Rio. IV. Título.

CDU 624.012.4

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

---

Assinatura

---

Data

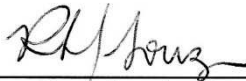
Francielly Isabel de Andrade Madeiro

Estudo da aderência entre concreto e argamassas

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

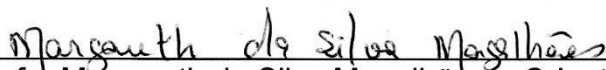
Aprovada em: 17 de janeiro de 2019.

Banca Examinadora:



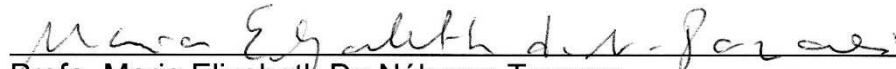
---

Profa. Regina Helena Ferreira de Souza – Presidente/ Orientadora  
Faculdade de Engenharia – UERJ



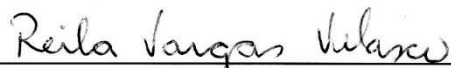
---

Profa. Margareth da Silva Magalhães – Orientadora  
Faculdade de Engenharia – UERJ



---

Profa. Maria Elizabeth Da Nóbrega Tavares  
Faculdade de Engenharia – UERJ



---

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

Rio de Janeiro

2019



## DEDICATÓRIA

Ao meu filho, Breno

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por renovar as minhas forças dia após dia nesta longa jornada. Por ser um Deus presente nos mínimos detalhes e conceder todas as oportunidades do início ao fim deste mestrado.

Ao meu filho, Breno, por ser a minha maior motivação e fonte de inspiração, por me fazer sorrir todos os dias e mesmo tão pequeno, ser exemplo de garra e superação. Todo o esforço deste trabalho foi por ele e para ele.

Aos meus pais, Lenir e Theodoro, pelo suporte e encorajamento de sempre. À minha irmã Andréia, por me instigar e ser prova de que com perseverança grandes sonhos são alcançados. Ao meu esposo, Bruno, pelo incentivo e apoio.

À professora Regina Souza, minha profunda gratidão e admiração por tamanha compreensão e empatia durante a orientação deste trabalho. À professora orientadora Margareth Magalhães, por dividir conhecimentos, cargas e experiências, agregando muito a este estudo.

Aos demais professores, técnicos e funcionários UERJ, por persistirem mesmo em meio as dificuldades. Aos colegas do mestrado, em especial ao Felipe Aguiar pela parceria e continuidade do trabalho, a Maria Gabriela Alvarenga pela amizade e a aluna Beatriz Bravin pelo grande auxílio no laboratório.

Às empresa LafargeHolcim, MC Bauchemie e Tecnosil pela doação de cimento, argamassa e aditivo, essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

Às colegas de trabalho da Engenharia do Colégio Pedro II, pela troca diária e estímulo à qualificação. Enfim, agradeço a todos aqueles que, embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

Ó SENHOR, nosso Deus, tu tens feito grandes coisas por nós. Não há ninguém igual a ti. Tu tens feito muitos planos maravilhosos para o nosso bem. Ainda que eu quisesse, não poderia falar de todos eles, pois são tantos, que não podem ser contados.

*Salmos 40:5*

## RESUMO

MADEIRO, Francielly I. de Andrade. *Estudo da aderência entre concreto e argamassas*. 2019. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

O foco atual sobre o desenvolvimento sustentável enfatiza o reparo e o reforço das estruturas ao invés de uma construção nova. Neste ponto, os reparos e reforços de estruturas em concreto precisam ser tão duradouros quanto possível. Um dos aspectos críticos da durabilidade dos reparos em estruturas de concreto é uma ligação efetiva e duradoura entre um material de reparo e o substrato de concreto existente. Este trabalho discorre sobre um programa experimental conduzido para avaliar a resistência de aderência da ligação entre concreto e argamassas. Foram testados oito tipos de argamassas, sendo duas argamassas cimentícias e duas poliméricas específicas para reparos, uma argamassa produzida em laboratório e três traços de compósitos cimentícios reforçados com fibras. Os principais ensaios realizados foram o ensaio de cisalhamento oblíquo (*slant shear test*), de acordo com a norma britânica vigente e o ensaio de arrancamento de pastilha (*pull off test*), feito conforme as normas europeia e brasileira. No ensaio de cisalhamento oblíquo, os corpos de prova eram prismáticos com dimensões de 100x100x400 mm e interface com ângulo de 60° em relação a horizontal. Para representar a ligação, como substrato existente foi empregado um traço de concreto convencional. A rugosidade da superfície da interface foi obtida ao imprimir sulcos com uso de ferramenta mecânica. Os materiais de reparo foram aplicados na condição fresca sobre o substrato endurecido, sem uso de ponte de aderência. Os corpos de prova foram ensaiados 28 dias após a aplicação das argamassas. A revisão da literatura técnica mostrou que o ensaio de cisalhamento oblíquo é o mais amplamente utilizado para analisar a ligação entre concretos. Foi possível avaliar qualitativamente os resultados e as argamassas comerciais tiveram melhor desempenho.

Palavras-chave: Concreto; Argamassa; Aderência; Reparação; Resistência de aderência; Ensaio de cisalhamento oblíquo.

## ABSTRACT

MADEIRO, Francielly I. de Andrade. *Adhesion study between concrete and mortars*. 2019. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The current focus on sustainable development emphasizes the repair and reinforcement of concrete structures rather than new ones. At this point, concrete repairs need to be as long-lasting as possible. One of the critical issues of concrete repair durability is an effective and lasting bond between the repair material and the existing concrete substrate. This paper discourses an experimental program conducted to evaluate the bond strength between concrete and mortars. Eight types of mortars were tested, half commercial products specific for repairs, which two were cementitious mortars and two polymeric, one mortar produced in the laboratory and three kinds of fiber reinforced cementitious composites. The main tests carried out were the slant shear test, according to the current British standard and the pull off test, according to European and Brazilian standards. In the slant shear test, the prismatic specimens had dimensions of 100x100x400 mm and interface with an angle of 60° to the cross-sectional axis. To represent the bond, a conventional concrete was used as existing substrate. The only kind of roughness considered for interface surface was grooves, obtained by using a mechanical tool. The repair materials were applied in fresh condition to the hardened substrate without bonding agent. The test specimens were tested 28 days after pouring the mortars. The technical literature review has shown that the slant shear test is the most widely used to analyze the bond between concretes. With this study, it was possible to qualitatively evaluate the results and display that all ready to use mortars had better performance.

Keywords: Concrete; Mortar; Bond; Repair; Bond strength; Slant shear test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação típica tensão x deformação entre FRC (a) e HPFRCC (b), sob tração direta (Naaman, 2018).....	31
Figura 2 – Curva tensão x deformação x abertura de fissuras de SHCC. (Magalhães et al, 2010). .....	32
Figura 3 – Reparo da represa Mitaka, Japão (KOJIMA et al, 2004).....	33
Figura 4 – Construção do tabuleiro da ponte Mihara, em Hokkaido, utilizando-se aço e ECC (LI, 2004). .....	33
Figura 5 – Reparo do tabuleiro de uma ponte em Michigan, Estados Unidos, utilizando-se ECC (LI, 2004). .....	33
Figura 6a – Ensaio de tração direta (BS 6319-7, 1985). .....	37
Figura 6b – Ensaio de tração direta (ASTM C1404, 2003).....	38
Figura 7 – Ensaio de tração indireta (Clímaco, 1990). .....	38
Figura 8 – Esquema do ensaio de arrancamento (Souza, 1990). .....	39
Figura 9 – Esquema do ensaio de resistência de aderência à tração na flexão (Santana, 2004).....	40
Figura 10 – <i>Push off test</i> (Clímaco, 1990).....	40
Figura 11 – <i>Flexural test</i> (Clímaco, 1990). .....	41
Figura 12 – Esquema do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão. (Santana, 2004). .....	42
Figura 13 – Tipos de rompimento ensaio aderência cisalhamento na flexão. (Moreno, 2007 apud Gusmão, 2017).....	43
Figura 14 – Esquema do ensaio de resistência ao cisalhamento direto em corpo de prova composto de três prismas (Helene, 1988 <i>apud</i> Galletto, 2005).....	44
Figura 15 – Esquema do ensaio de resistência ao cisalhamento direto em corpo de prova composto de um único prisma (Santana, 2004 <i>apud</i> Gusmão, 2017).....	44
Figura 16 – Geometria do prisma composto (EN 12615, 1999) .....	46
Figura 17 – Esquema de forças na interface (BS 12615, 1999).....	46
Figura 18 – Dimensões dos corpos de prova (BS 6319-4, 1984).....	47
Figura 19 – Corte do corpo de prova (ASTM C882, 2015).....	48
Figura 20 – Ensaio de aderência por compressão de prismas compostos (Eyre, 1985). .....	51

Figura 21 – Critério de ruptura para dois sistemas de reparo (Eyre, 1985).....	52
Figura 22 – Representação gráfica do critério de Mohr (Chen, 1998).....	53
Figura 23 – Critério de Mohr-Coulomb (Chen, 1998). ....	53
Figura 24 – Critério de Coulomb para um material modificado (Chen, 1998). ....	54
Figura 25 – Círculos de Mohr nas rupturas por escorregamento e separação (Chen, 1998). ....	54
Figura 26 – Planos de ruptura em compressão pura (Chen, 1998).....	55
Figura 27 – Esquema do prisma composto (Clímaco, 2001). ....	56
Figura 28 – Critério de ruptura de prismas compostos (Clímaco,2001). ....	58
Figura 29 – Resultados da série 1 (Clímaco, 1990). ....	61
Figura 30 – Modelos para teste de compressão-cisalhamento modificado (Clímaco, 1990). ....	62
Figura 31 – Resultados da segunda série (Clímaco, 1990). ....	63
Figura 32 – Resultados da 3ª série (Clímaco, 1990).....	64
Figura 33 – Critérios de ruptura propostos.....	65
Figura 34 – Influência dos ângulos e rugosidades no modo de ruptura (Austin et al. 1999). ....	69
Figura 35 – Diversos círculos de Mohr propostos (Austin et al., 1999) .....	71
Figura 36 – Influência da rugosidade da superfície do substrato sobre a resistência da ligação (Julio et al., 2004).....	72
Figura 37 – Resultados dos ensaios de aderência por tração por compressão diametral entre concreto de recuperação e de substrato. (Doria et al., 2015).....	73
Figura 38 – Resultados dos ensaios de aderência por cisalhamento oblíquo entre concreto de recuperação e de substrato (Doria et al., 2015).....	74
Figura 39 – Resultados dos ensaios de aderência por cisalhamento vertical entre concreto de recuperação e de substrato (Doria et al., 2015).....	74
Figura 40 – métodos de ensaio (Momayez et al., 2005). ....	75
Figura 41 – Rugosidades obtidas 2 dias após a moldagem (Momayez et al., 2005).76	
Figura 42 – Curvas envelope para rupturas coesivas ou adesivas (na interface) (Saldanha et al., 2012). ....	78
Figura 43 – Esquema da armadura utilizada (Santos e Júlio, 2011). ....	79
Figura 44 – Diferentes rugosidades testadas (Tayeh et al., 2003). ....	80
Figura 45 – corpos de prova dos ensaios de tração indireta e cisalhamento oblíquo (Tayeh et al., 2003). ....	81

Figura 46 – Rugosidade obtida com ranhuras e aplicação de ácido (Mirmoghtadaei et al., 2015). .....	83
Figura 47 – Resultados com teores de 0% e 10% de metacaulim (Mirmoghtadaei et al., 2015). .....	84
Figura 48 – Configuração dos sulcos nos corpos de prova (Ahmed et al., 2017). ....	85
Figura 49 – Resistências de aderência obtidas com diferentes técnicas de rugosidade (Ahmed et al., 2018) .....	86
Figura 50 - Resistências de aderência obtidas com o uso de fibras de polipropileno (Ahmed et al., 2017). .....	87
Figura 51 – imagem da cinza ampliada em 800 vezes .....	95
Figura 52 – esquema do corpo de prova prismático ensaiado .....	99
Figura 53 – corpos de provas moldados .....	100
Figura 54 – formas de compensado naval utilizadas .....	100
Figura 55 – detalhe das formas na segunda etapa .....	101
Figura 56 – corpos de prova durante a cura .....	101
Figura 57 – corpos de prova completos .....	101
Figura 58 – Detalhe da superfície da interface.....	102
Figura 59 – Condição de umidade da interface.....	103
Figura 60 – capeamento dos prismas .....	103
Figura 61 – detalhes do ensaio de cisalhamento oblíquo .....	104
Figura 62 – corpos de prova preparados para o ensaio de arrancamento.....	105
Figura 63 – placas com faixas de argamassas e compósitos .....	106
Figura 64 – detalhe da rugosidade da superfície .....	107
Figura 65 – Execução das semicarotagens .....	108
Figura 66 – placas com os cortes parciais .....	108
Figura 67 – Detalhe da profundidade do corte .....	108
Figura 68 – Detalhe da colagem da pastilha .....	108
Figura 69 – Equipamento utilizado .....	109
Figura 70 – Detalhe do acoplamento .....	109
Figura 71 – Detalhe da amostra após o arracamento .....	109
Figura 72 – Visão geral após o ensaio .....	109
Figura 73 – resistências de aderência para as argamassas comerciais .....	112
Figura 74 – resistências de aderência para os compósitos.....	113
Figura 75 – modos de ruptura resultantes no ensaio de cisalhamento oblíquo .....	115



Figura 76 – resistências ao arrancamento das argamassas comerciais .....	117
Figura 77 – resistências ao arrancamento dos compósitos .....	117
Figura 78 – análise da resistência de aderência $f_b$ .....	120
Figura 79 – análise da resistência de aderência ao arrancamento $f_h$ .....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das propriedades físicas dos materiais de reparo.....	27
Tabela 2 - Classificação de argamassas (EN 1504-3, 2006) .....	50
Tabela 3 – Requisito conforme EN 1504-4 (2006) .....	50
Tabela 4 – Requisitos de desempenho de produtos de reparo (EN 1504-3, 2006)...	51
Tabela 5 – Valores críticos do ângulo da junta e resistência mínima à compressão do prisma composto, propostos por Regan.....	60
Tabela 6 – Comparação dos estudos revisados .....	89
Tabela 7 – Quantitativo dos materiais utilizados na fabricação do concreto .....	93
Tabela 8 – Propriedades das fibras de PVA. ....	96
Tabela 9 – Traços dos compósitos.....	96
Tabela 10 – resultados dos ensaios de caracterização.....	111
Tabela 11 – resultados do ensaio de cisalhamento oblíquo.....	111
Tabela 12 – resultados do ensaio de arrancamento .....	116
Tabela 13 – Requisitos de desempenho de produtos de reparo (EN 1504-3, 2006) .....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
EN	European Norm
BS	British Standard
ASTM	American Society for Testing and Materials
TIX	Tixotrópico
SK	Sika Brasil
MC	MC Bauchemie Brasil

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	área
d	diâmetro
E	módulo de elasticidade
F	carga de ruptura
$f_b$	resistência de aderência
$f_h$	resistência de aderência ao arrancamento
$\alpha$	ângulo com a horizontal
$\varepsilon$	deformação
$\sigma$	tensão normal
$\tau$	tensão de cisalhamento

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>1) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
1.1) Avaliação das tensões numa ligação reparada real .....	22
1.1.1) Tensões nos elementos estruturais .....	22
1.1.2) Mecanismos de transferência de esforços.....	23
1.2) Características dos materiais de reparo .....	25
1.2.1) Tipos de materiais para reparo .....	25
1.2.2) Compósitos cimentícios reforçados com fibras.....	29
1.2.3) A compatibilidade do substrato com o material de reparo .....	34
1.3) Tipos de ensaios para avaliação da aderência concreto-concreto .....	35
1.3.1) Testes de tração .....	36
1.3.1.1) Ensaio de Tração Direta.....	37
1.3.1.2) Ensaio de Tração Indireta .....	38
1.3.1.3) Ensaio de arrancamento ( <i>pull off</i> ) .....	39
1.3.1.4) Ensaio de tração na flexão.....	39
1.3.2) Ensaios de cisalhamento .....	40
1.3.2.1) <i>Push off test</i> .....	40
1.3.2.2) <i>Flexural test</i> .....	40
1.3.2.3) Ensaio de cisalhamento na flexão.....	41
1.3.2.4) Ensaio de corpo de prova composto de três prismas.....	43
1.3.2.5) Ensaio de corpo de prova de um único prisma .....	44
1.3.3) Ensaio de compressão e cisalhamento .....	44
1.3.3.1) <i>Slant shear test</i> .....	44
1.4) Normas existentes .....	45
1.4.1) Normas para o ensaio de cisalhamento oblíquo.....	45
1.4.1.1) Norma britânica.....	45

1.4.1.2) Norma americana.....	47
1.4.2) Normas para o ensaio de arrancamento.....	48
1.4.3) Limites normativos.....	49
1.4.3.1) Classificação de argamassas de acordo com a EN 1504 parte 3.....	49
1.4.3.2) Classificação de acordo com a EN 1504 parte 4.....	50
1.5) Análise das tensões mobilizadas no ensaio de cisalhamento oblíquo.....	51
1.5.1) Segundo Eyre (1985).....	51
1.5.2) De acordo com a teoria da plasticidade.....	52
1.6) Comparação entre diferentes tipos de ensaios, de tratamento de superfície e de materiais de reparo.....	58
1.6.1) Wall e Shrive (1985).....	58
1.6.2) Clímaco (1989); Clímaco (1990); Clímaco (2001);.....	59
1.6.3) Souza (1990).....	65
1.6.4) Austin et al. (1999).....	67
1.6.4.1) Rugosidade e orientação da junta.....	68
1.6.4.2) Ruptura do concreto por cisalhamento.....	69
1.6.4.3) Rugosidade e integridade da superfície de aderência.....	70
1.6.5) Julio et al. (2004).....	72
1.6.6) Doria et al. (2005).....	73
1.6.7) Momayez et al. (2005).....	75
1.6.8) Saldanha et al. (2012); Júlio et al. (2006); Santos e Júlio (2011); Saldanha et al. (2013).....	77
1.6.9) Tayeh et al. (2013).....	79
1.6.10) Sahmaran et al. (2014).....	81
1.6.11) Mirmoghtadaei et al. (2015).....	83
1.6.12) Ahmed et al. (2017).....	84
1.6.13) Bentz et al. (2018).....	87
1.7) Conclusões da revisão bibliográfica.....	88

1.7.1) Resumo comparativo .....	88
<b>2) PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>91</b>
2.1) Materiais e métodos.....	91
2.2) Caracterização dos materiais.....	92
2.2.1) Concreto.....	92
2.2.1.1) Cimento.....	92
2.2.1.2) Agregado graúdo .....	92
2.2.1.3) Agregado miúdo .....	92
2.2.1.4) Água.....	93
2.2.1.5) Traço do concreto .....	93
2.2.2) Argamassas comerciais .....	94
2.2.2.1) Sikagrout TIX .....	94
2.2.2.2) Monotop 622 .....	94
2.2.2.3) Zentrifix CR .....	94
2.2.2.4) Zentrifix TIX.....	94
2.2.3) Argamassas fabricadas em laboratório .....	94
2.2.3.1) Cimento.....	95
2.2.3.2) Areia.....	95
2.2.3.3) Cinza volante .....	95
2.2.3.4) Fibras .....	96
2.2.3.5) Traços e produção das argamassas .....	96
2.2.4) Ensaio de caracterização do concreto e argamassas de reparo .....	97
2.3) Ensaio de cisalhamento oblíquo ( <i>slant shear test</i> ).....	98
2.3.1) Corpos de prova.....	99
2.3.2) Formas .....	100
2.3.3) Método de cura .....	101
2.3.4) Preparo da superfície da interface .....	101

2.3.5) Condição de umidade da superfície.....	102
2.3.6) Outras considerações .....	103
2.4) Ensaio de arrancamento ( <i>pull off</i> ) .....	104
2.4.1) Peças ensaiadas.....	105
2.4.2) Métodos de cura, preparo e condicionamento .....	105
2.4.3) Preparo da superfície .....	106
2.4.4) Detalhes do teste .....	107
<b>3) ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>110</b>
3.1) Apresentação dos resultados.....	110
3.1.1) Caracterização do concreto e argamassas de reparo.....	110
3.1.2) Ensaio de cisalhamento oblíquo .....	111
3.1.2.1) Resistências de aderência .....	112
3.1.2.2) Modos de ruptura .....	113
3.1.2) Ensaio de arrancamento .....	116
3.2) Discussão dos resultados .....	118
3.2.1) Ensaio de cisalhamento oblíquo .....	118
3.2.2) Ensaio de arrancamento .....	121
<b>4) CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>123</b>
4.1) Conclusões .....	123
4.2) Sugestões para trabalhos futuros .....	124
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>126</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>133</b>



## INTRODUÇÃO

Recuperação e reforço de estruturas de concreto existentes estão entre os maiores desafios que a engenharia civil enfrenta hoje e terá de enfrentar nos próximos anos. O foco atual sobre o desenvolvimento sustentável, que enfatiza o reparo e o reforço das estruturas ao invés de uma construção nova, reforça essa tendência. Neste mesmo ponto, os reparos e reforços de estruturas em concreto precisam ser tão duradouros quanto possível. Salienta-se que a reparação ou recuperação refere-se às intervenções que promovam o restabelecimento das características mecânicas iniciais/originais da estrutura e que o reforço refere-se à instalação de características mecânicas maiores do que as iniciais.

No sentido de melhorar a durabilidade dos reparos em concreto, engenheiros, pesquisadores e empreiteiros dedicam um esforço considerável. Um dos aspectos críticos da durabilidade dos reparos em estruturas de concreto é uma ligação efetiva e duradoura entre um material de reparo e o substrato de concreto existente. Um componente crítico na obtenção da ligação adequada é a preparação da superfície de concreto e a sua condição prévia na aplicação do material de reparo.

Um dos maiores problemas que impacta o desempenho em longo prazo dos reparos em concreto é a fissuração do material de reparo e o descolamento entre o material de reparo e o substrato de concreto. Há muitos propósitos para o reparo do concreto, incluindo o prolongamento da vida útil de uma estrutura ou elemento deteriorado e a restauração da capacidade de carga e a rigidez. Na maioria dos casos, para o reparo ter sucesso, a monoliticidade entre o material de reparo e o substrato de concreto é primordial. Um pré-requisito para a ação monolítica é a ligação de longa duração entre o substrato de concreto existente e o material de reparo.

Os mecanismos e características das ligações entre o concreto existente e os materiais de reparo têm sido amplamente pesquisados. Porém, apesar de já existir conhecimento teórico relativamente suficiente, as questões práticas relativas à preparação da superfície do concreto existente para alcançar uma aderência de longa duração ainda requerem muitos estudos. Bissonnette et al (2012) referem que isto pode ser demonstrado pelo pequeno número de projetos de investigação de campo em curso, pelo estado atual do conhecimento limitado, pela limitação de

códigos de práticas e, em alguns casos, pelo contínuo fraco desempenho de reparos e sobreposições.

Como tanto as atividades de reparação como as de reforço necessitam igualmente que se obtenha uma perfeita ligação entre os materiais novos e velhos, neste trabalho não se fará distinção entre reparos ou reforços. Assim, onde se leia reparação, também entenda-se recuperação, ou o contrário.

## **Motivação**

Atualmente, no mercado da construção civil são oferecidas inúmeras opções de materiais para a recuperação e o reforço das estruturas de concreto. Porém, ainda não existe um conjunto de normas específicas para fabricação e, sobretudo, a aplicação destes novos materiais de reparo, o que muitas vezes leva a utilização destes produtos sem o conhecimento adequado de suas propriedades químicas e mecânicas, principalmente no que se refere à capacidade de aderência.

Nos últimos anos, a oferta de materiais industrializados para recuperação de estruturas e o uso de concretos de alto desempenho aumentaram significativamente. Com isso, a falta de normalização e também de conhecimento científico acumulado, conduz ao emprego destes materiais baseado apenas em informações dos fabricantes ou em experiências pessoais dos aplicadores, o que aponta a necessidade de um maior número de pesquisas acadêmicas nesta área.

## **Objetivo geral**

Testar diversas argamassas comerciais específicas para reparos estruturais, bem como alguns traços de compósitos cimentícios reforçados com fibras, para avaliar a capacidade de aderência destes materiais a um substrato de concreto existente.

## **Objetivos específicos**

Executar os ensaios de cisalhamento oblíquo (*slant shear test*) com corpos de prova prismáticos, seguindo os parâmetros de ângulo da interface e dimensões dos corpos de prova, conforme preconizado pela norma europeia vigente.

Realizar também o ensaio de arrancamento de pastilha (*pull off test*), pois é um ensaio simples e bastante empregado em inspeções de campo, para avaliar a aderência de um material novo aplicado em uma base existente.

Comparar os resultados obtidos em laboratório, com a realização do ensaio de cisalhamento oblíquo e correlacionar com os resultados obtidos nas amostras testadas por arrancamento.

Similarmente, confrontar o desempenho de aderência das argamassas comerciais entre si e avaliar a performance dos compósitos cimentícios, materiais novos em fase de teste para aplicação nos trabalhos de reparação.

Pretende-se também avaliar a eficiência do tratamento superficial da interface ser feito com ranhuras com ferramenta mecânica, processo este que vem sendo utilizado na prática da engenharia.

### **Estrutura da dissertação**

Este trabalho é composto de quatro capítulos. No primeiro capítulo, é feita uma ampla revisão bibliográfica de trabalhos publicados na literatura técnica no âmbito internacional e nacional.

O capítulo dois descreve o conjunto de materiais utilizados neste programa experimental, bem como os detalhes dos ensaios executados.

No terceiro capítulo são apresentados os resultados dos principais ensaios realizados – cisalhamento oblíquo e arrancamento. Os valores obtidos são comparados com alguns parâmetros das normas aplicáveis e da literatura técnica.

O último capítulo dispõe das conclusões obtidas, mostra a classificação dos materiais de reparo conforme desempenho e discorre sobre algumas sugestões para estudos futuros.

## **1) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentados estudos publicados na literatura técnica no âmbito internacional e nacional. Temas semelhantes vêm sendo extensivamente estudados desde o século anterior, mas, mesmo existindo normas recentes, muitos trabalhos variam diversos parâmetros normativos.

### **1.1) Avaliação das tensões numa ligação reparada real**

Pode-se citar diversos exemplos de intervenções de reparação como é o caso das estruturas de concreto dos pavimentos, das edificações e das pontes danificadas por diferentes causas ou por simples envelhecimento dos materiais constituintes. Em todos estes exemplos, a aderência entre o concreto novo e o existente geralmente representa um elo frágil na estrutura reparada. Existem vários testes disponíveis para avaliar a resistência da aderência, embora poucos estejam normalizados. Entretanto, existem poucos estudos comparando esses vários métodos de ensaios, de modo a se definir qual deles deve ser o mais indicado para o tipo de elemento estrutural em questão, em função das solicitações a que está sujeito. Além disso, ainda há carência de indicação normativa de valores limites de resistência de aderência resultantes dos ensaios.

#### **1.1.1) Tensões nos elementos estruturais**

As tensões tangenciais que surgem numa interface de reparo podem ser devidas ao carregamento atuante, mas também a outros aspectos que podem prejudicar a qualidade da aderência da ligação como, por exemplo, a má preparação da superfície do substrato, a rugosidade, a má aplicação do material de reparo, a utilização indevida dos materiais, as más condições de cura, etc., de acordo com Souza (1990).

As tensões tangenciais da interface de reparo irão depender também da sua localização no elemento estrutural, de flutuações de carregamento e das

deformações ao longo do tempo que poderão acarretar aumento destas tensões, sobretudo se os materiais tiverem diferentes módulos de elasticidade.

No caso de substituição de material removido do intradorso dos vãos de vigas e lajes, logo após a colocação do material de reparo e sob a ação de carga normal, as tensões na junta são razoavelmente baixas e puramente elásticas. Com o tempo desenvolve-se uma componente cisalhante de forma crescente dependente da curvatura devida à retração e fluência na estrutura e das propriedades elásticas do material de reparo.

No caso de elementos verticais como pilares ou paredes o material de reparo estará numa região comprimida da estrutura e terá que contribuir para a absorção desses esforços. Nestes casos surge uma combinação de altas tensões normais e cisalhantes na interface. As mesmas tensões surgem em reparos feitos em regiões comprimidas de elementos fletidos (exceto nas regiões do apoio ou de cargas concentradas) quando se espera que o material de reparo contribua para a resistência do elemento, obrigando-o a resistir a altas tensões de corte na ligação.

### 1.1.2) Mecanismos de transferência de esforços

Segundo Souza (2009), para que o reforço seja bem-sucedido é fundamental que se garanta a monoliticidade estrutural, ou seja, as armaduras novas e o concreto adicionado devem estar solidários ao elemento existente para que possam trabalhar conjuntamente. Se isto não ocorrer, a capacidade de transferência dos esforços será bastante prejudicada e o novo elemento reforçado não será capaz de absorver a totalidade das cargas previstas.

A transferência dos esforços é feita, basicamente pela aderência da interface entre concreto existente e material de reparo ou pela ligação das novas armaduras. Um dos principais objetivos a se alcançar no reforço estrutural é a garantia da aderência do material de reparo (concreto ou argamassa) ao concreto existente.

Dentre os fatores que mais influenciam a qualidade da aderência, está o tipo de tratamento da superfície de ligação, tendo em vista a rugosidade e a limpeza. A superfície de contato deve ser rugosa, livre de qualquer poeira, graxa ou gordura.

Outro fator é a forma de aplicação do material de reparo. A aplicação do novo material deve ser feita de tal modo que garanta o adensamento e imprima uma

completa continuidade. Dependendo do caso, pode-se saturar a superfície do concreto existente ou aplicar uma camada prévia de agentes adesivos.

A cura adequada deste material também influencia na qualidade da aderência. Existem vários modos de cura, úmida, a seco, em temperatura ambiente ou aquecida. O tipo e duração da cura deve ser apropriada aos materiais empregados.

A resistência da aderência de uma ligação não armada deve-se inicialmente à adesão e posteriormente ao atrito.

A adesão é influenciada pela:

a) rugosidade da superfície de ligação: A rugosidade da superfície do concreto irá variar de lisa à rugosa, influenciando o coeficiente de atrito da interface;

b) tratamento da superfície de ligação: a exposição dos agregados e a profunda limpeza da superfície tendem a promover um aumento da resistência da aderência;

c) uso de agentes adesivos ou de concretos ou argamassas especiais: bons resultados podem ser obtidos com a aplicação de argamassas ou concretos especiais, modificados por polímeros, ou com a aplicação de concreto projetado;

d) modo de aplicação do material de reparo: o método pelo qual o material de reparo é aplicado ao substrato de concreto influi sobremaneira na qualidade da aderência.

O atrito, por sua vez, é influenciado pela:

a) forma e tamanho dos agregados: agregados grandes e angulares produzem maiores valores do coeficiente de atrito;

b) rugosidade da superfície: quanto maior a rugosidade, maior o valor do coeficiente de atrito;

c) resistência à compressão do concreto;

d) tensão de compressão aplicada externamente à ligação: quanto maior a tensão normal de compressão aplicada, maior a rigidez ao corte da ligação e, conseqüentemente, menores os deslocamentos. Este aumento de rigidez é mais pronunciado quando a superfície da ligação é relativamente lisa; em interfaces rugosas este incremento só é significativo para pequenos deslocamentos;

e) existência de cargas cíclicas: a presença de cargas alternadas deteriora o comportamento da junta, aumentando os deslocamentos devidos às tensões cisalhantes (Souza, 2009).

Em síntese, a resistência na ligação entre concretos depende principalmente da aderência na interface, atrito, intertravamento dos agregados e fatores relacionados à idade. Cada um destes fatores, por sua vez, depende de outras variáveis. Para Momayez (2005), a aderência na interface ocorre em função do uso de um agente de ligação, adensamento do material, limpeza e umidade do substrato, idade da estrutura e rugosidade da superfície. Por outro lado, atrito e intertravamento dos agregados dependem de outros parâmetros, como tamanho e forma do agregado e preparo da superfície. Além destes fatores, o valor da resistência de aderência é muito relacionado ao tipo de ensaio realizado. Dependendo do teste escolhido, o tamanho e forma do corpo de prova e o estado de tensões na superfície de contato variam consideravelmente.

## **1.2) Características dos materiais de reparo**

Os materiais usados na recuperação e reforço são os mesmos usados na construção das estruturas novas, porém, para garantir a eficiência e garantia dos trabalhos devem atender a alguns critérios especiais. Para Souza (2009), as características requeridas pelos materiais de reparo são:

- garantir maior durabilidade;
- permitir baixa permeabilidade;
- garantir boa resistência estrutural;
- dar maior proteção ao aço, se possível aumentando a alcalinidade;
- apresentar retração mínima;
- garantir boa aderência ao concreto e ao aço;
- permitir boa trabalhabilidade, fácil aplicação;
- ter propriedades compatíveis com o concreto e o aço;
- possuir composição granulométrica adequada.

### 1.2.1) Tipos de materiais para reparo

O mercado da construção civil dispõe de micro-concretos e argamassas industrializados, já adequadamente dosados para uso em reparos e reforços, de

acordo com o tipo de deterioração ou necessidade que se apresente, das características da região a ser tratada (vertical, horizontal, muito ou pouco profunda) e resistentes à agressividade apresentada pelo meio ambiente em questão. Segundo Souza (2009), estes materiais devem ser dosados de acordo com o tipo de aplicação a ser empregado – com colher, com fôrmas, projetado. Normalmente, possuem baixo fator a/c e são usados cimento e aditivos químicos e minerais adequados ao caso em questão. A espessura mínima da camada a ser adicionada irá depender das condições de colocação e do tamanho máximo do agregado utilizado. Em geral, o tamanho máximo do agregado deve ser menor que 1/3 da espessura a ser preenchida com o material novo.

Os materiais tradicionais possuem como base o cimento Portland e têm a vantagem de possuírem boa compatibilidade física e química com o substrato, fator importante para a eficiência dos trabalhos de recuperação e reforço. A natureza inibidora dos reparos à base de cimento Portland tem provado ser benéfica por manter um suplemento contínuo de alcalinidade em volta da armadura, tornando-as eletroquimicamente favoráveis no estabelecimento e sustentação da passivação.

Com o objetivo de melhorar o desempenho e garantir os requisitos necessários, os materiais de reparo são, em geral, dosados com cimentos especiais e a adição de polímeros, de fibras sintéticas ou podem ser fabricados substituindo-se total ou parcialmente os ligantes hidráulicos por ligantes sintéticos (polímeros).

Os concretos ou argamassas modificadas por polímeros são formados por dois componentes ativos: o cimento Portland e uma dispersão polimérica em água, como o látex SBR (borracha de estireno-butadieno) ou uma emulsão de éster poliacrílico. As argamassas modificadas por polímeros são normalmente pré-dosadas industrialmente e comercializadas em sacos, bastando na obra efetuar a mistura correta e a aplicação. Estas argamassas têm, em geral, características tixotrópicas que permitem a sua aplicação direta com colher e justificam-se quando o volume de material a aplicar é pequeno.

Além das adições poliméricas, estes materiais podem ser formulados com o emprego de fibras sintéticas finas (náilon, polipropileno, PVA) que contribuem em algumas propriedades físico-mecânicas e no combate à retração.

As argamassas de reparo podem ser utilizadas em reparos superficiais (5mm), até reparos profundos (em até  $\approx 10$  cm).



Os concretos ou argamassas de polímeros são formulados com resinas orgânicas e materiais inorgânicos (agregados graúdos, areia e finos como a cinza volante), onde a união e a resistência do conjunto são dadas pelas reações de polimerização e endurecimento dos componentes das resinas, na ausência de água. O cimento Portland pode entrar na composição do produto como um agregado fino, também denominado por fíler, completando a distribuição granulométrica e preenchendo os vazios da areia, atuando como inerte.

Estes materiais apresentam elevada resistência mecânica e química e, por isso, são apropriados para ambientes altamente agressivos ou para lugares onde são exigidas altas performances dos reparos, reforços e proteções. Em geral, são formulados para uso em pequenos volumes e espessuras, pois possuem elevada aderência ao substrato, baixo módulo de deformação -longitudinal e elevada retração, assim como deformação lenta superior à dos concretos e argamassas de cimento Portland.

O concreto de polímero é indicado para revestir concretos tradicionais, nomeadamente de pisos industriais e de tabuleiros de pontes e viadutos.

São exemplos de argamassas de polímeros as argamassas de base epóxi, de base fenólica, de base poliéster, de base estervinílica, de base furânica.

Tabela 1 – Comparação das propriedades físicas dos materiais de reparo

	Sistemas cimentícios	Sistemas modificados por polímeros	Sistemas de resina epóxi
Resistência à compressão (MPa)	20 - 70	10 - 80	55 - 110
Módulo de Elasticidade à compressão (GPa)	20 - 35	5 - 30	0,5 - 20
Resistência à tração (MPa)	1,5 – 3,5	2 - 8	9 - 20
Deformação de ruptura ( $\times 10^{-3}$ )	2 – 3,5	0 - 5	0 - 15
Coefficiente de dilatação $^{\circ}\text{C}$ ( $\times 10^{-6}$ )	7 - 12	8 - 20	10 - 30
Absorção de água (% peso)	5 - 15	0,1 – 0,5 1 - 8	0 - 2
Temperatura máxima em serviço ( $^{\circ}\text{C}$ )	300	100- 300	40 - 80
Tempo de desenvolvimento da resistência, a $20^{\circ}\text{C}$	1 – 4 semanas	1 – 7 dias	6 – 48 horas

Fonte: Souza, 2009.

Os adesivos e os primers são materiais usados como ponte de aderência e oferecem uma melhora substancial da aderência entre diversos materiais. Os adesivos e primers mais empregados são de base epóxi e os chamados látex, ou seja, base acrílica ou base acetato de polivinila ou base estireno-butadieno hidrossolúveis. Os de base polivinila (PVA) em geral são re-emulsionáveis, o que os torna não aconselháveis para uso em locais úmidos ou reparações e reforços de importância. Os de base epóxi têm desempenho superior aos demais, mas têm o inconveniente de requererem o substrato seco, o que nem sempre é possível em obra.

Resumidamente, Souza (2009) refere que o material de reparo deve ter características semelhantes ao concreto base. Para isso, o ideal é que seja cimentício ou com propriedades semelhantes às do cimento. O material de reparo não deve ser retrátil, de modo a não comprometer a aderência. Para isso devem apresentar baixo fator  $\alpha/c$ , agentes expansivos ou processo construtivo adequado como o enchimento a seco ou a pré-colocação dos agregados. Além disso, o material de reparo e o concreto devem ter módulos de elasticidade semelhantes, a fim de evitar deformação diferencial.

O coeficiente de dilatação térmica do material de reparo deve ser semelhante ao do concreto. Do contrário, as diferenças nas variações de volume podem causar perda de aderência ou ruptura na seção de material com menor resistência, sobretudo em ambientes com grandes variações térmicas.

Ao escolher o material de reparo deve-se considerar as condições de aplicação, as propriedades do material de reparo, os equipamentos e habilidades necessárias para executar o trabalho e as condições de serviço.

Para Momayez (2005), os materiais de reparo podem ser divididos em três grupos principais: cimentícios, compósitos cimentícios e poliméricos. Nos últimos anos, com a popularidade dos materiais poliméricos, o ensaio de cisalhamento oblíquo se tornou um ensaio amplamente aceito. Porém, considerando o custo e características dos polímeros, o uso de compósitos cimentícios tem aumentado em países em desenvolvimento. Se comparados aos pouco aderentes materiais cimentícios, os compósitos oferecem uma boa solução em termos de custo benefício. Com isso, tem-se renovado o interesse em desenvolver ensaios para avaliar a ligação entre substratos de concreto com materiais de reparo ou compósitos cimentícios.

### 1.2.2) Compósitos cimentícios reforçados com fibras

Compósitos cimentícios reforçados com fibras (do inglês *fiber reinforced composite* – FRC) são definidos como compósitos com dois principais constituintes, a fibra e a matriz. Geralmente são utilizadas fibras curtas (descontínuas) e dispersas randomicamente na matriz, também existem compósitos com fibras longas e alinhadas ou na forma de tecido, os quais são chamados de compósitos têxteis. Para o bom desempenho do compósito é assumido que a fibra e a matriz trabalham juntas, através da aderência. São empregadas fibras de várias formas e tamanhos, produzidas de aço, materiais sintéticos, vidro ou materiais naturais.

A matriz pode ser uma pasta, argamassa ou concreto, contendo cimento Portland, agregados e água (Mehta e Monteiro, 2006). Além disso, pode conter pozolanas e outras adições comumente usadas no concreto convencional.

Normalmente, o concreto apresenta numerosas microfissuras. Sob a aplicação de uma carga, a rápida propagação destas microfissuras é responsável pela baixa resistência à tração do concreto. Originalmente, assumia-se que as resistências à tração e flexão do concreto poderiam ser substancialmente ampliadas com a introdução de fibras espaçadas, que obstruiriam a propagação de microfissuras e aumentariam a resistência a tração do material. Porém, anos de estudos experimentais mostraram que compósitos reforçados com fibras não ofereciam uma melhoria substancial na resistência à tração, comparado com correspondentes traços sem fibras. Somente no fim dos anos 70 foram vistos estudos de compósitos reforçados com fibras com resistência à tração e ductilidade incrementadas (Naaman 2018). Estes novos materiais, chamados de compósitos cimentícios de alto desempenho, oferecem possibilidades interessantes para projetos estruturais e *retrofit* de estruturas existentes. Apesar do mercado de compósitos reforçados com fibras ser pequeno se comparado com a produção total de concreto, em todo o mundo o consumo anual de fibras é de 300.000 toneladas.

Existem diversos tipos de fibras, tais como: acrílico, amianto, algodão, vidro, náilon, poliéster, polietileno, polipropileno, rayon, lã de rocha e aço. Segundo Mehta e Monteiro (2006), as fibras de aço são as mais comumente utilizadas, tanto para propósitos estruturais como não estruturais. Para cada material, as fibras podem ter

diversos formatos, espessuras, diâmetros e comprimentos. O tipo da fibra, sua dimensão, fração em volume e aderência com a matriz tem significativa influencia na resposta do compósito.

Sabe-se que a adição de fibras reduz a trabalhabilidade do concreto. Independentemente do tipo de fibra, a perda de trabalhabilidade é proporcional a concentração das fibras no compósito. Dessa forma, o teste de slump, comumente empregado no concreto convencional, não é apropriado para medir a trabalhabilidade de um compósito reforçado com fibras. Para isto, o teste Vebe é o mais indicado – neste ensaio o cone é disposto sobre uma mesa vibratória.

O tipo de fibra, razão de aspecto (comprimento/diâmetro), propriedades e sua fração volumétrica tem um efeito significativo nas propriedades dos compósitos. Em geral, baixo volume de fibras (<1%) são usadas para reduzir fissuras por retração. Estas fibras são empregadas em lajes e pavimentos com uma grande superfície de exposição que conduz a altas retrações. Volume médio de fibras (entre 1 e 2 %) são usadas para aumentar o módulo de ruptura, resistência a fraturas e resistência a impactos. Estes compósitos são usados em métodos construtivos como concreto projetado e em estruturas que exigem alta capacidade de absorção de energia, e melhora contra efeitos de delaminação, fragmentação e fadiga.

Alto volume de fibras (>2%) são usados para aumentar a resistência pós-fissuração e a capacidade de deformação antes da ruptura. Devido ao comportamento superior, estes compósitos são referidos como de alto desempenho reforçados com fibras (do inglês *high performance fiber reinforced cement composite* - HPFRCC). Na última década, misturas ainda melhores foram desenvolvidas e nomeadas como compósitos reforçados com fibras de ultra alto desempenho (do inglês *ultra high performance fiber reinforced cement composite* - UHPFRCC).

Compósitos cimentício de alto desempenho reforçados com fibras formam uma classe de compósitos em que a resposta tensão x deformação na tração exibe um comportamento de enrijecimento acompanhado de múltipla fissuração (do inglês *strain hardening*), onde a resistência pós-fissuração na tração uniaxial é maior ou igual à resistência de fissuração, ver a Figura 1. Observa-se que as curvas de um compósito convencional, FRC, e HPFRCC são similares na região inicial (trecho OA) e na região final (trecho BC). A diferença consiste na porção adicional (trecho AB) presente nos concretos do tipo HPFRCC, onde a tensão aumenta com a deformação (NAAMAN, 2018).

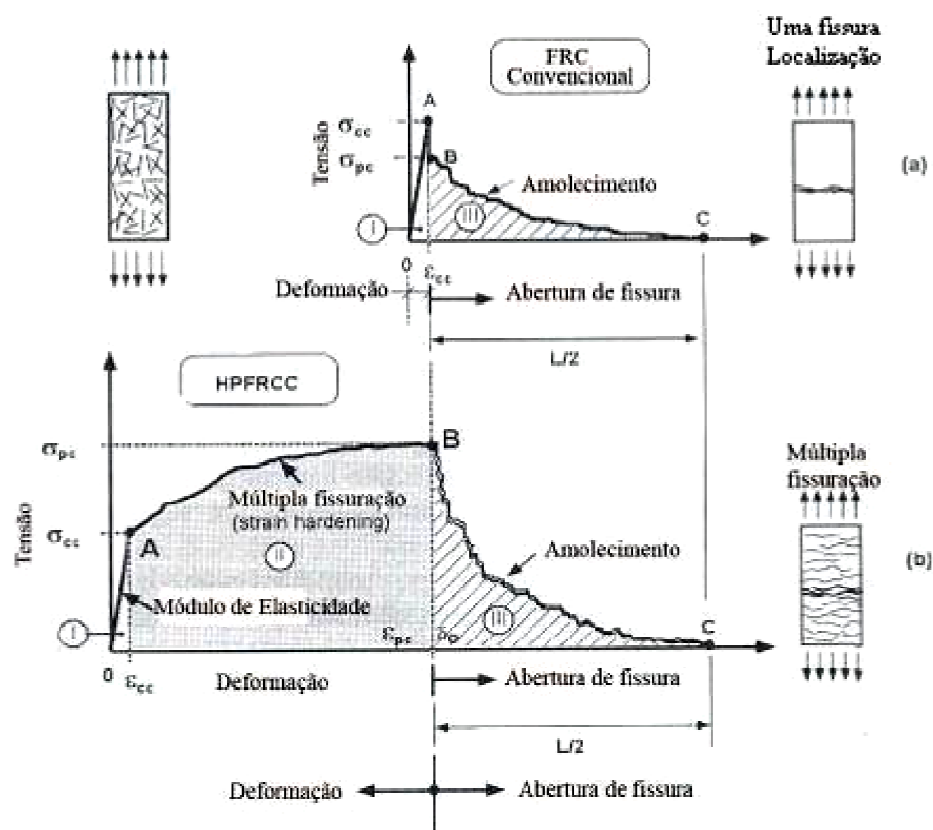


Figura 1 – Comparação típica tensão x deformação entre FRC (a) e HPFRCC (b), sob tração direta (Naaman, 2018).

HPFRCC apresentam estas características por apresentar altos teores de fibras (tipicamente >5%). Este tipo de compósito inclui o SIFCON, do inglês *slurry infiltrated fiber concrete*, que é produzido utilizando-se altos teores de fibras (5-12%), dispostas em camadas e envoltas por uma matriz altamente fluída (LANKAD, 1985, LANKAD *et al*, 1984), o SIMCON que utiliza cerca de 6% de fibras de aço (em forma de tecido) e o ECC, do inglês *engineered cementitious composites*, desenvolvido por LI e co autores no início dos anos 90s (LI, WU, 1992, LI, LEUNG, 1992).

ECC é um tipo especial de compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras curtas, o qual é caracterizado pela elevada ductilidade à tração e um comportamento de *strain hardening*. Devido a isto também é denominado, no inglês, de *strain hardening cementitious composite* (SHCC). A estratégia de desenvolvimento adotado para a geração de tais compósitos é baseada em princípios da micromecânica, que estabelecem relações entre o comportamento mecânico macroscópico dos compósitos e a microestrutura do material. Devido a

isto, e diferente dos outros tipos de HPFRCC, os ECC podem ser projetados com um teor de fibras relativamente baixo (em torno de 2%).

Macroscopicamente, SHCC apresenta resistência à compressão ligeiramente superior (podendo chegar a 70MPa) e sua resistência à tração varia de 2MPa – 5MPa. Sob tração uniaxial ele exibe comportamento dúctil com deformações superiores a 3% (ver Figura 2), formação de múltiplas microfissuras (menores que 80 $\mu$ m de abertura) e espaçamento médio no nível de saturação igual a 2mm (WANG, LI, 2005; LI *et al*; 2001; LI, 2003). A abertura de fissuras é limitada pela resistência ao arrancamento das fibras. Devido a este fenômeno, surgem outras fissuras que distribuem a deformação por tração, o que distingue o comportamento deste material de outros FRC's que concentram toda a deformação na abertura de uma só fissura.

Segundo Li (2003), os SHCC's também têm excelente capacidade de resistir a esforços de cisalhamento e sob flexão se deformam similarmente a um metal dúctil. A tenacidade à fratura deste compósito chega a ser da ordem de 30 kJ/m<sup>2</sup>, similar à da liga de alumínio (MAALEJ et al., 1995). A formação de micro fissuras de pequenas aberturas faz com que o SHCC seja um material que, mesmo fissurado pode ser resistente às ações ambientais resultando num material de alta durabilidade (LI, 1997).

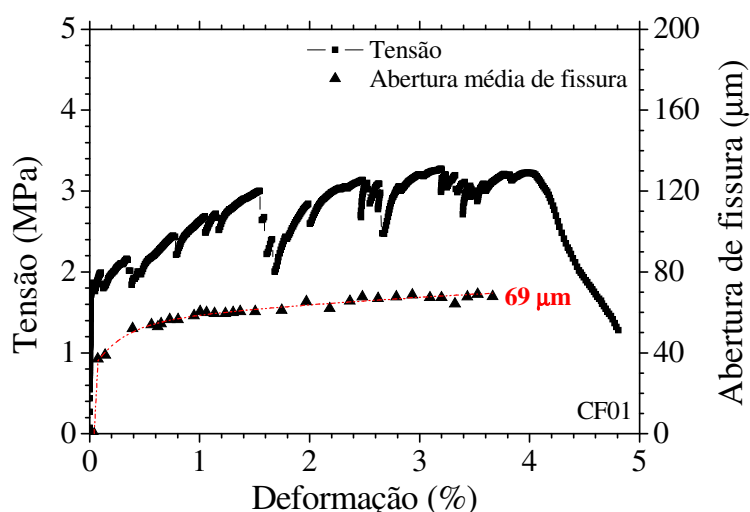


Figura 2 – Curva tensão x deformação x abertura de fissuras de SHCC. (Magalhães et al, 2010).

Em termos de aplicações, SHCC está emergindo em aplicações estruturais de grande escala. No Japão, SHCC foi utilizado em reparo na represa Mitaka (Figura 3) e de uma parede de contenção de terra danificada pela reação álcali-agregado

(ROKUGO et al., 2005) em Gifu. Também foi utilizado na construção do deck da ponte Mihara (Figura 4) em Hokkaido (LI, 2004).



Figura 3 – Reparo da represa Mitaka, Japão (KOJIMA et al, 2004).



Figura 4 – Construção do tabuleiro da ponte Mihara, em Hokkaido, utilizando-se aço e ECC (LI, 2004).

Nos Estados Unidos o SHCC foi utilizado no reparo do deck de uma ponte em Michigan (Figura 5), bem como na fabricação de esculturas e de uma canoa. Enquanto no Brasil, o seu uso é pouco difundido.

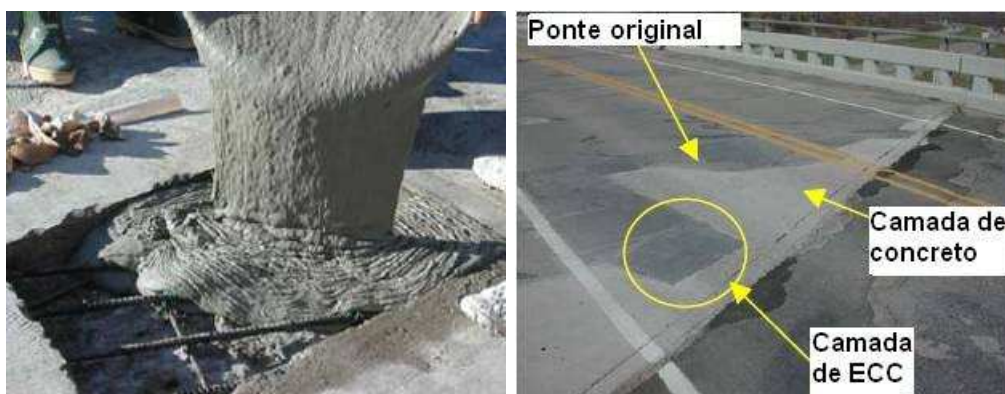


Figura 5 – Reparo do tabuleiro de uma ponte em Michigan, Estados Unidos, utilizando-se ECC (LI, 2004).

Estes trabalhos revelaram que a alta ductilidade de SHCC possibilita significativa melhora no desempenho de sistemas estruturais reparados, resultando no controle de abertura de fissuras e numa alta resistência a delaminação (LI, 2004), o que faz com que o SHCC seja um material extremamente tolerante ao dano.

### 1.2.3) A compatibilidade do substrato com o material de reparo

De acordo com o ACI 562M-13 item 7.5, devem ser consideradas as propriedades dos materiais de reparo no desenvolvimento do projeto, especificações e procedimentos de execução. Dentre estas propriedades, estão, mas não somente: propriedades físicas dos materiais de reparo, tipo de aplicação, adesão, retração, movimentação térmica, durabilidade, resistência à corrosão, métodos de instalação, requisitos de cura e condições ambientais.

O projeto de um reparo deve considerar a compatibilidade dos materiais de reparo e os da estrutura existente. Esta compatibilidade inclui os aspectos dimensional, aderência, durabilidade, mecânicos, eletroquímicos e de permeabilidade. Em geral, o propósito é utilizar um material de reparo cujas propriedades físicas, mecânicas entre outras sejam as mais próximas possíveis das do substrato, de modo a garantir o melhor desempenho a longo prazo.

A estabilidade volumétrica dos materiais de reparo deve ser considerada no projeto de recuperação e reforço. Também conhecida como compatibilidade dimensional, refere-se às mudanças iniciais e em função do tempo, do volume do reparo após o lançamento. A estabilidade volumétrica é frequentemente medida como mudanças em alguma das dimensões lineares do reparo. Entre os fatores que afetam esta compatibilidade dimensional, estão as retrações por secagem, química e autógena, grau de restrição da estrutura, condições ambientais, fluência, mudanças térmicas e absorção da umidade. Mostrou-se que a mudança de volume do material tem sido frequentemente a causa do mau desempenho dos reparos. Desta maneira, as propriedades dos materiais de reparo devem ser selecionadas para que haja estabilidade volumétrica e compatibilidade dimensional com a estrutura existente, de forma a reduzir a probabilidade de fissuras causadas por alterações de volume.



Os materiais de reparo podem ter diferentes propriedades individuais, e ainda assim, ter um desempenho satisfatório quando combinados em um sistema de reparo. Um exemplo disto é quando materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica são utilizados, mas o desempenho geral do sistema não é afetado por mudanças de temperatura.

Materiais como concretos e argamassas de cimento Portland, concretos poliméricos, compósitos reforçados com fibras, resinas e produtos similares são comumente empregados em reparo. Em relação à compatibilidade química, estes materiais não necessariamente contêm cimento Portland como o concreto convencional existente. Assim, devem ser especificados para atender os requisitos de serviço, resistência e durabilidade.

### **1.3) Tipos de ensaios para avaliação da aderência concreto-concreto**

Os ensaios existentes para avaliar a ligação entre substrato de concreto e material de reparo podem ser divididos em algumas categorias. Segundo Momayez (2005), a primeira delas são os ensaios de tração. Os principais testes desta categoria são o ensaio de arrancamento (*pull-off test*), tração direta e compressão diametral.

Nos ensaios de tração direta, a força de tração é transmitida para o concreto por uma peça de metal colada ou por grampos específicos. É essencial que haja alinhamento entre os eixos da amostra e carregamento. O ensaio de arrancamento é um ensaio prático de executar, por isso é muito utilizado em campo, e produz bons resultados.

Os testes de tração indireta incluem os ensaios de flexão e compressão diametral, sendo que o último é mais eficiente. O ensaio de tração direta com corpos de prova cilíndricos foi desenvolvido no Brasil e foi normatizado pela ASTM C496. O teste é simples de realizar e utiliza os mesmos moldes e equipamentos do ensaio de compressão padrão.

A segunda categoria são os ensaios que medem a ligação sob tensões de cisalhamento, os chamados métodos de cisalhamento direto, como os ensaios em forma de L e de cisalhamento em uma ou duas superfícies. Momayez (2005)

desenvolveu um novo método de cisalhamento direto denominado como cisalhamento bi-superfície.

O terceiro grupo de testes permite medir a resistência de aderência em um estado de tensões que combina esforços de cisalhamento e compressão. Os ensaios de cisalhamento oblíquo utilizam exemplares prismáticos ou cilíndricos feitos de duas metades unidas por um ângulo de 60° com a horizontal e são ensaiados sob compressão axial. Durante o carregamento, a interface da ligação é submetida a esforços de compressão e cisalhamento. Este ensaio se tornou o mais empregado mundialmente e foi normatizado por vários códigos internacionais.

Para Clímaco (1990), apesar da grande diversidade de materiais de reparo e da disseminação de seu uso na prática da engenharia e dos vários tipos de ensaios existentes, ainda não se tem um método normativo satisfatório.

A situação ideal é que um único ensaio seja capaz de aferir experimentalmente as propriedades mecânicas que traduzam o estado de tensões típico das condições de serviço, fornecendo resultados com baixos coeficientes de variação e sensíveis às propriedades medidas.

Segundo este autor, no caso da avaliação da aderência, isto significa que as diversas características de aderência devem produzir nos testes diferenças nítidas de resistência de aderência, assim como, atender a outros requisitos como razoável simulação das condições no local e procedimentos simples de ensaio que permitam a normalização.

A seguir apresenta-se alguns tipos de ensaios de aderência verificados na literatura técnica. Entretanto, a maioria deles não é normalizada e não se dispõe de qualquer valor limite para a resistência de aderência.

### 1.3.1) Testes de tração

Ensaio que ateste que a resistência de aderência excede a resistência à tração do concreto é de pouca ajuda, uma vez que é sabido que a resistência à tração do concreto é baixa e que esta é negligenciada em projeto. Além disso, os ensaios de tração apresentam o inconveniente de que, na análise dos resultados, os diferentes desempenhos dos diferentes sistemas de ligação podem ser mascarados pela dispersão da resistência à tração do concreto.

No entanto, alguns métodos de ensaio de tração têm sido utilizados para avaliar a resistência de aderência do concreto ou argamassas e, apesar das limitações mencionadas, algumas informações podem ser fornecidas.

### 1.3.1.1) Ensaio de Tração Direta

Este ensaio está normalizado por:

- BS 6319-7 descreve um método para determinar a resistência à tração direta cujo corpo de prova tem a forma de um osso de cachorro. Para avaliar os materiais de reparo, estes corpos de prova após submetidos à tração são reconstituídos, ou seja, metade do corpo de prova é recolocada na forma e o material de reparo é então moldado na cavidade vazia. O corpo de prova assim reparado é submetido ao ensaio de tração direta na idade requerida.

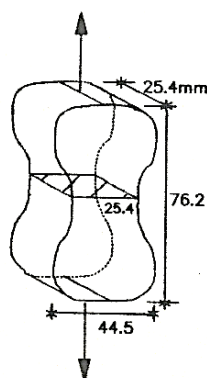


Figura 6a – Ensaio de tração direta (BS 6319-7, 1985).

- ASTM C1404/C1404M-98 (2003). *Standard Test Method for Bond Strength of Adhesive Systems Used with Concrete as Measured by Direct Tension*

Este método de ensaio abrange a determinação laboratorial da resistência de aderência de sistemas adesivos usados para unir argamassas recém-misturadas a concreto endurecido de cimento Portland. Cada corpo de prova consiste de uma base e revestimento, coladas com o adesivo que está sendo testado. A base refere-se à metade de um cilindro de concreto de 75 mm por 150 mm montado dentro de um bico de um tubo de aço. A superfície preparada da base é revestida com o adesivo, sobre o qual é aplicada uma argamassa recém-misturada. Após a cura, a montagem é submetida à tração para medir a resistência de aderência do adesivo. A resistência à tração é calculada e a localização da ruptura é determinada visualmente. A resistência de aderência medida é limitada pela resistência à tração

do concreto e da argamassa de base. Quando a ruptura ocorrer no concreto ou na argamassa, a resistência da ligação excede o resultado medido.

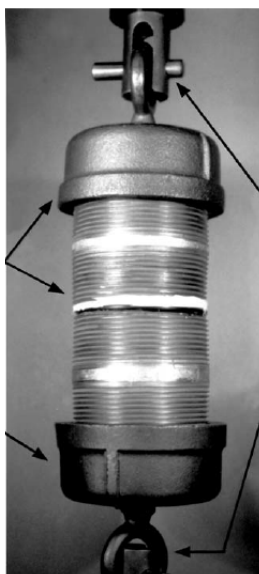


Figura 6b – Ensaio de tração direta (ASTM C1404, 2003)

### 1.3.1.2) Ensaio de Tração Indireta

Nestes métodos podem ser testados cubos ou cilindros submetidos ao corte, como no ensaio Brasileiro. Uma dessas metades é recolocada nos moldes onde procede-se ao preenchimento com o material de reparo. Os corpos de prova resultantes são submetidos à compressão, como mostra a Figura 7. O plano de aderência fica então submetido a um estado de tensões biaxial ao longo da interface. A tensão de ruptura medida é no máximo igual à tensão de tração do material mais fraco – concreto ou material de reparo.

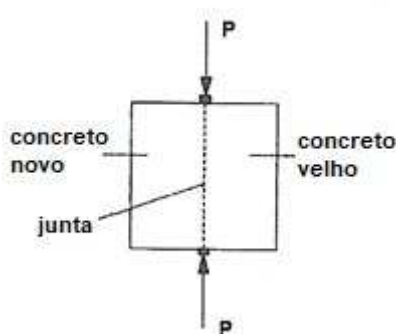


Figura 7 – Ensaio de tração indireta (Clímaco, 1990).

### 1.3.1.3) Ensaio de arrancamento (*pull off*)

Neste ensaio de tração, o primeiro passo consiste em executar corte parcial na superfície reparada a uma profundidade tal que ultrapasse o plano de ligação dos dois materiais. Posteriormente, são coladas pastilhas cilíndricas de alumínio. Após a cura da resina procede-se o ensaio de arrancamento.

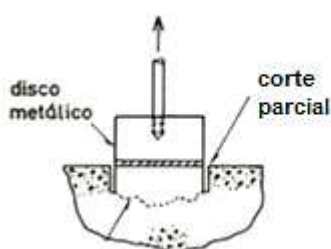


Figura 8 – Esquema do ensaio de arrancamento (Souza, 1990).

O ensaio consiste na aplicação de uma força de tração aplicada ao disco metálico por meio de um dinamômetro. A ruptura poderá ocorrer no substrato, no material de reparo ou na ligação entre ambos.

### 1.3.1.4) Ensaio de tração na flexão

Gusmão (2017) explica que para a realização do ensaio de aderência à tração na flexão aplica-se uma força concentrada na linha central da superfície superior de um corpo de prova prismático biapoiado, com auxílio de um cutelo, conforme observa-se na Figura 9. Os corpos de prova são formados metade pelo concreto velho e a outra metade pelo material de reparo.

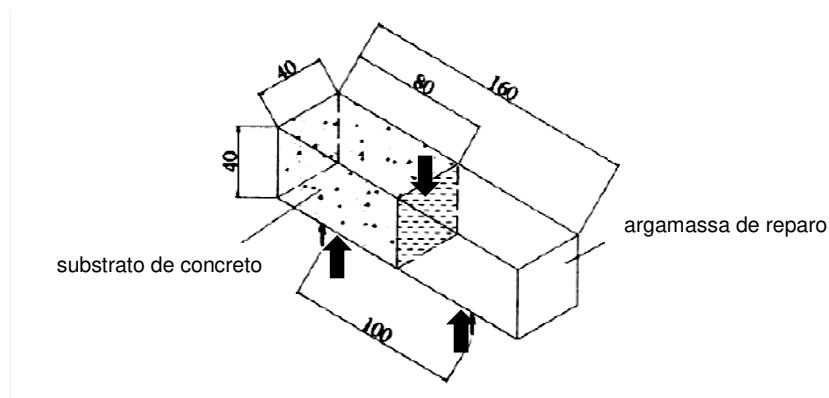


Figura 9 – Esquema do ensaio de resistência de aderência à tração na flexão (Santana, 2004).

### 1.3.2) Ensaio de cisalhamento

#### 1.3.2.1) *Push off test*

O prisma composto é submetido a duas forças de compressão simultaneamente, sendo uma paralela à linha da junta e outra perpendicular à junta. O ensaio tem sido usado satisfatoriamente em juntas de concreto armado. No caso de juntas não armadas o tipo de carregamento causa altas concentrações de tensões nas extremidades da junta e ruptura prematura, devido à distribuição muito desigual da tensão de corte na junta, o que traz limitações ao método, segundo Clímaco (1990).

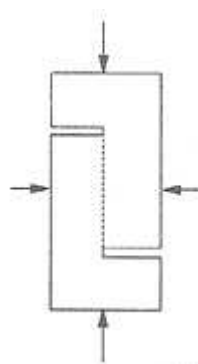


Figura 10 – *Push off test* (Clímaco, 1990).

#### 1.3.2.2) *Flexural test*

Trata-se de submeter vigas de concreto com juntas à flexão; os planos de aderência fazem ângulos de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$  com o eixo longitudinal da viga, de modo a expor a junta a tensões de tração, compressão e corte. Os resultados, entretanto, são sensíveis aos baixos valores da resistência do concreto à tração e às discrepâncias dos módulos de elasticidade dos materiais envolvidos. Mesmo o método que induz tensões de corte puro numa viga composta por três segmentos de concreto unidos por adesão em juntas situadas sob o ponto de momento nulo, não supera o problema e também rompe à tração no concreto próximo à junta.

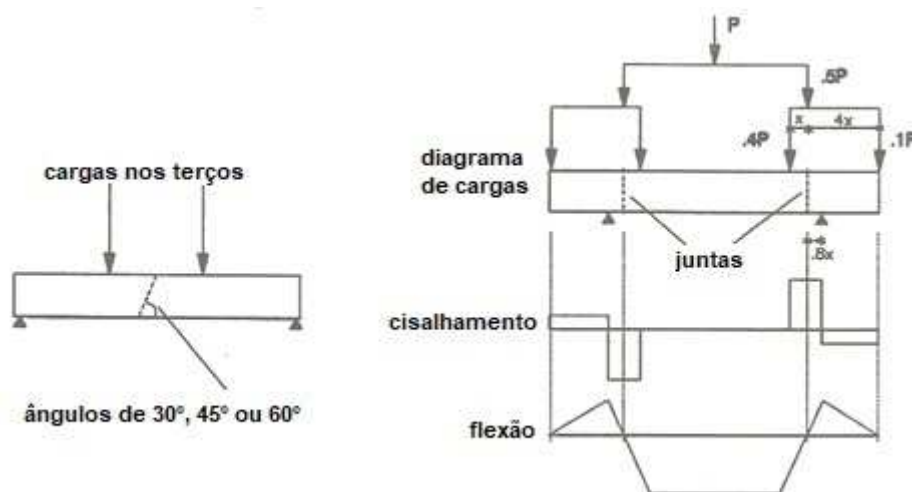


Figura 11 – Flexural test (Clímaco, 1990).

### 1.3.2.3) Ensaio de cisalhamento na flexão

De acordo com Gusmão (2017), a resistência de aderência ao cisalhamento na flexão pode ser determinada a partir de um corpo de prova prismático com dimensões  $100 \times 100 \times 400$  mm, que possui um entalhe em forma trapezoidal na sua face inferior, conforme a Figura 12 no qual se aplica um material de reparo.

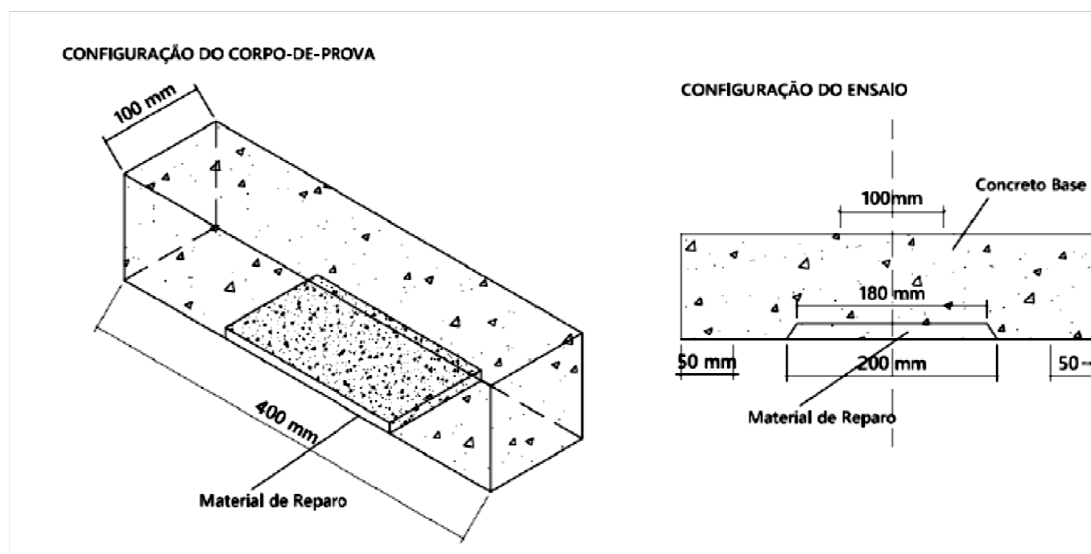


Figura 12 – Esquema do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão. (Santana, 2004).

Para realização do ensaio aplicam-se forças concentradas na superfície superior de um corpo de prova prismático biapoado, distantes de 100 mm entre si, conforme observa-se na Figura 13 com o reparo voltado para baixo. Na interface entre a superfície de concreto horizontal e o reparo surgem tensões de cisalhamento puro, enquanto que nas duas faces inclinadas da interface, as tensões de cisalhamento e de tração são combinadas.

O tipo de ruptura é fundamental para a interpretação dos resultados, e pode ocorrer de cinco formas distintas: ruptura apenas do concreto, sem comprometimento do sistema de reparo (Tipo C); ruptura monolítica com fissura atravessando o reparo e se propagando pelo concreto (Tipo M); fissura inclinada com desprendimento do reparo (Tipos I-1 e I-2) e com o desprendimento do reparo e subsequente fissuração do concreto (Tipo D), como observa-se na Figura 13.



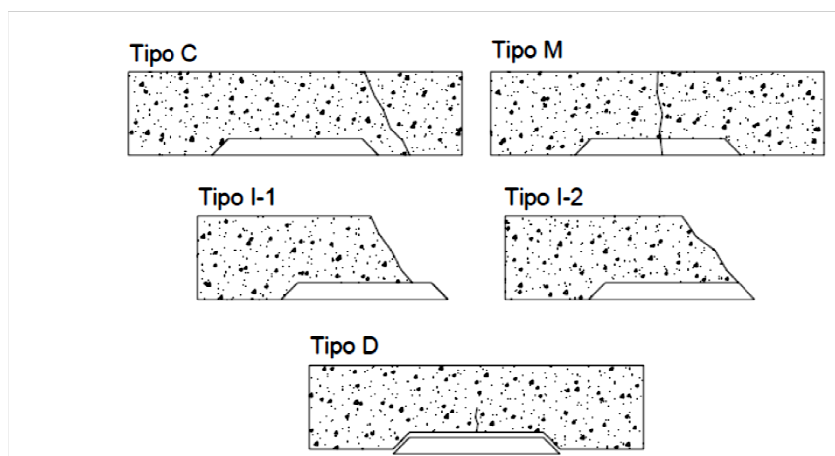


Figura 13 – Tipos de rompimento ensaio aderência cisalhamento na flexão. (Moreno, 2007 apud Gusmão, 2017).

#### 1.3.2.4) Ensaio de corpo de prova composto de três prismas

Segundo Galletto (2005), a resistência de aderência ao cisalhamento direto é difícil de medir pois sempre existe a possibilidade de ocorrer excentricidades que produzem momentos e trações que prejudicam a avaliação correta do cisalhamento e a reprodução dos ensaios. Resultados satisfatórios têm sido obtidos com um ensaio de compressão realizado sobre um corpo de prova composto de três prismas, conforme observa-se na Figura 14.

Para determinar a resistência de aderência ao cisalhamento direto, Galletto (2005) diz que deve-se moldar corpos de prova com prismas de concreto velho/novo e velho/velho, sendo os últimos considerados como referência. Com base nesses modelos determina-se a resistência de aderência da ligação entre concreto velho/velho e entre concreto velho/novo. Além de determinar a força de ruptura, deve-se também avaliar a superfície de ligação entre os prismas de concreto.

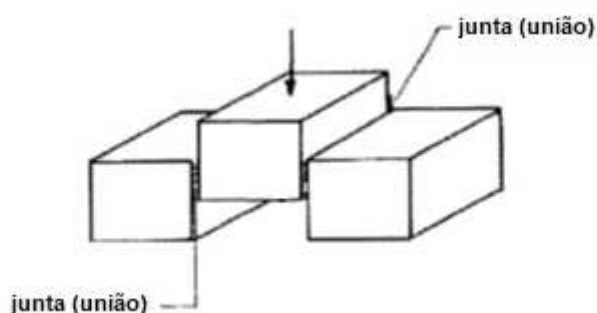


Figura 14 – Esquema do ensaio de resistência ao cisalhamento direto em corpo de prova composto de três prismas (Helene, 1988 *apud* Galletto, 2005).

### 1.3.2.5) Ensaio de corpo de prova de um único prisma

Gusmão (2017) diz que para determinação da resistência de aderência ao cisalhamento direto pode-se utilizar também uma configuração que emprega um só prisma de concreto de 40 x 40 x 160 mm (Figura 15).

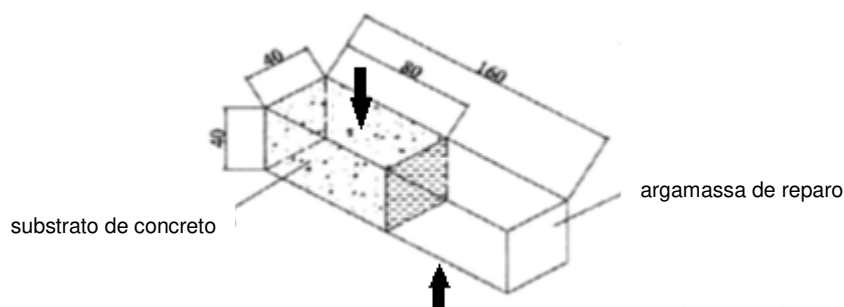


Figura 15 – Esquema do ensaio de resistência ao cisalhamento direto em corpo de prova composto de um único prisma (Santana, 2004 *apud* Gusmão, 2017).

Nesse caso não são produzidas tensões de compressão ou de tração na interface argamassa/substrato, 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 (SANTANA, 2004).

## 1.3.3) Ensaio de compressão e cisalhamento

### 1.3.3.1) *Slant shear test*

O ensaio consiste na aplicação de uma força axial de compressão no sentido longitudinal de um prisma ou um cilindro composto no qual a superfície da junta faz um determinado ângulo com a direção da força aplicada. O estado de tensões na interface da junta combina tensões normais e cisalhantes. As vantagens deste método referem-se ao fato de que o estado de tensões gerado no ensaio é típico

das situações de reparo, apresenta baixo coeficiente de variação e o procedimento é simples.

#### **1.4) Normas existentes**

##### 1.4.1) Normas para o ensaio de cisalhamento oblíquo

Para o ensaio laboratorial do método *slant shear test*, duas normas são aplicáveis:

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

-ASTM C882 / C882M (2015). *Standard Test Method – Bond Strength of Epoxy-Resin Systems used with Concrete by Slant Shear*.

##### 1.4.1.1) Norma britânica

A EN 12615:1999 descreve um método para determinação da resistência de aderência entre dois substratos de concreto, em prismas compostos submetidos à carregamento axial de compressão. São previstas duas situações:

- a) ligação de concreto endurecido à concreto endurecido. Para tal são utilizados prismas compostos de 40x40x160xmm.
- b) ligação de concreto fresco à concreto endurecido. Para tal são utilizados prismas compostos de 100x100x400xmm.

Esta norma determina que os espécimes devem ser moldados em moldes metálicos e após a cura de 28 dias devem ser retirados da água e então cortados sob um ângulo de 60° em relação ao eixo de sua seção transversal. A interface deve ser limpa com usando água, escova de arame e jato de água com partículas abrasivas. Cada metade endurecida recebe então o concreto fresco após aplicação de um agente adesivo, formando assim o prisma composto indicado na figura. Após cura de 28 dias e regularização das faces para garantia do paralelismo, são submetidos à carregamento axial de compressão que irá submeter a superfície de

aderência a uma combinação de tensões normais de compressão e tangenciais no plano de ligação.

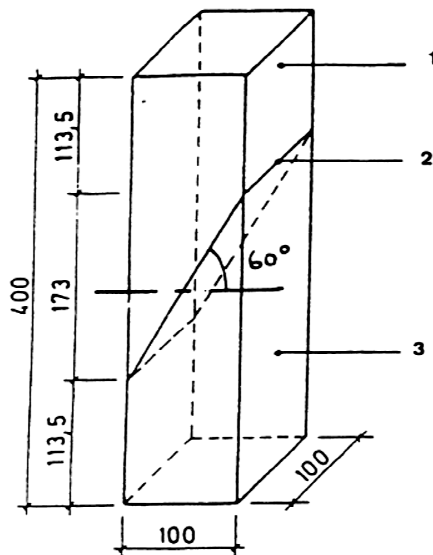


Figura 16 – Geometria do prisma composto (EN 12615, 1999)

A resistência de aderência  $f_b$  expressa em  $\text{N}/\text{mm}^2$  deve ser calculada da seguinte forma:

$$f_b = \frac{F\sqrt{3}}{40000}$$

Esta expressão refere-se a (Figura 17):

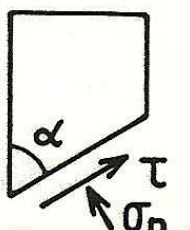


Figura 17 – Esquema de forças na interface (BS 12615, 1999)

Sendo  $\alpha = 30^\circ$ , tem-se: 
$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{100 \cdot 100} \cdot \sin 2 \cdot 30^\circ = \frac{F\sqrt{3}}{40000}$$

Esta norma ainda prevê a moldagem de um prisma de referência, monolítico de concreto e a sua ruptura por compressão axial.

Esta BS EN 12615 (1999) é uma atualização da BS 6319-4 (1984). Nesta antiga versão, os prismas compostos possuíam pequenas dimensões (Figura 18). Eram moldadas placas de 150x150mm com os dois materiais a serem testados – substrato de concreto e material de reparo. Após a cura, esta placa era serrada e apenas o prisma central com as dimensões de 55x55x150 era aproveitado para o ensaio. A superfície de ligação fazia um ângulo de 60° com a horizontal. A resistência de aderência  $f_b$  de cada prisma composto era calculado dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal.

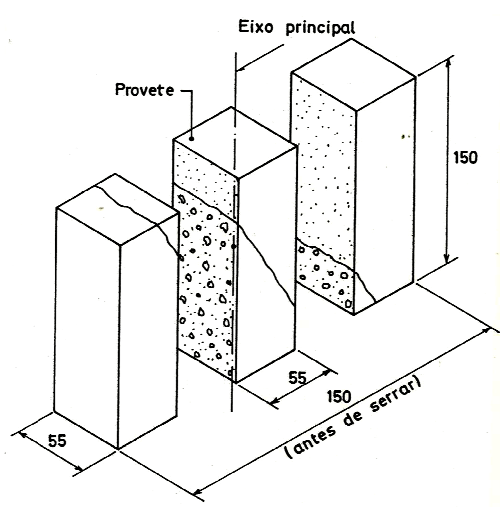


Figura 18 – Dimensões dos corpos de prova (BS 6319-4, 1984)

#### 1.4.1.2) Norma americana

O código americano para o ensaio de cisalhamento oblíquo é o ASTM C882 / C882M-15. Este método de ensaio se refere-se à avaliação da aderência entre concretos endurecidos e do concreto endurecido ao concreto fresco. Os modelos constituem-se de cilindros com 75 mm de diâmetro e 150mm de altura, seccionados em duas metades por um plano diagonal a 60° do plano horizontal. A resistência de aderência é obtida aplicando-se uma força de compressão axial no cilindro composto. São requeridos três espécimes. A resistência e aderência é obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área de aderência (Figura 19).

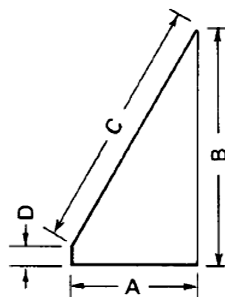


Figura 19 – Corte do corpo de prova (ASTM C882, 2015)

Considerando a área elíptica da interface igual a  $9116 \text{ mm}^2$ , a resistência de aderência é expressa por:

$$f_b = \frac{F (N)}{9116 \text{ mm}^2} \text{ (MPa)}$$

Embora alguns dos métodos sejam menos comuns na prática, o ensaio de cisalhamento oblíquo é usado extensivamente porque tem menos problemas e falhas, é fácil de configurar e executar, tem uma grande variedade de aplicações, não tem alto custo e oferece grande confiabilidade de resultados (Sahmaran et al., 2014).

Portanto, a relação entre os valores de aderência por estes dois métodos é:

$$\frac{f_{b, cilindro}}{f_{b, prisma}} = 2,53$$

#### 1.4.2) Normas para o ensaio de arrancamento

O método do arrancamento é considerado um ensaio de campo e regulado pelas seguintes normas:

- ASTM C1583 / C1583M (2013). *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*

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

- NBR 13528 (1995). Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração.

De acordo com as recomendações da NBR 13528 (1995) deve-se, primeiramente, executar cortes circulares na superfície reparada a uma profundidade tal que ultrapasse o plano de ligação dos dois materiais. Posteriormente, deve-se regularizar a superfície com lixa grossa, limpar as superfícies e proceder a colagem das pastilhas cilíndricas de 50mm de diâmetro com resina epóxi, poliéster ou similar. Após a cura da resina procede-se o ensaio de arrancamento (Figura 8).

O ensaio consiste na aplicação de uma força de tração aplicada ao disco metálico por meio de um dinamômetro. A ruptura poderá ocorrer no substrato, no material de reparo ou na ligação entre ambos.

Para a apresentação dos resultados, a NBR 13528 (1995) especifica que o valor da resistência de aderência deve ser expresso juntamente com a forma de ruptura e esclarece, dentre outras questões, que o valor da resistência de aderência é obtido quando a ruptura ocorre na interface reparo/substrato. No caso de rupturas na argamassa de reparo, no substrato ou na interface revestimento/cola, a resistência de aderência à tração não é determinada, pois é maior do que o valor obtido no ensaio.

#### 1.4.3) Limites normativos

A classificação da aderência entre o concreto do substrato e o material de reparo pode ser avaliada pelas seguintes normas de ensaio:

##### 1.4.3.1) Classificação de argamassas de acordo com a EN 1504 parte 3

A Norma europeia EN 1504-3 (2006) define quatro classes de argamassas de reparo **R4, R3, R2, R1**. Estas estão então divididas em argamassas de reparo estrutural e não-estrutural, isto é, aplicações onde a transferência de carga tem que ser considerada no projeto de especificação do reparo, ou alternativamente para trabalhos ditos cosméticos. A norma classifica também os produtos de reparo para

cada tipo de aplicação, em argamassas de elevada resistência ou elevado módulo de elasticidade e baixa resistência ou baixo módulo de elasticidade. A norma apenas indica que classe de argamassa de reparo deve ser usada para cada tipo de aplicação, por exemplo:

- concreto de elevada resistência sujeito a cargas elevadas deve ser reparado com um produto de reparo de elevada resistência / alto módulo de elasticidade, portanto, uma argamassa de classe R4

- concreto de baixa resistência sujeito a cargas deve ser reparado com uma argamassa de reparo estrutural de resistência média e/ou módulo de elasticidade médio, portanto, de classe R3

- todo o tipo de concreto numa situação não-estrutural, ex: onde não serão transferidas cargas para a zona de reparo, pode ser reparado com uma argamassa de reparo não-estrutural de alta qualidade, classe R2

Tabela 2 - Classificação de argamassas (EN 1504-3, 2006)

Nº	Características de desempenho	Substrato de referência (EN 1766)	Método de ensaio	Requisito			
				Estrutural		Não estrutural	
				Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
1	Resistência à compressão	-	EN 12190	> 45 MPa	> 25 MPa	> 15 MPa	> 10 MPa

#### 1.4.3.2) Classificação de acordo com a EN 1504 parte 4

De acordo com a NP EN 1504-4 (2006), Quadro 3.2, a resistência de aderência obtida pelo método da EN 12615:1999 deve provocar ruptura pelo concreto.

Tabela 3 – Requisito conforme EN 1504-4 (2006)

Nº	Características de desempenho	Betão ou argamassa de referência	Método de ensaio	Requisito
14b	Aderência (método alternativo)	EN 766 C (0,40) ou MC (0,40)	EN 12615	O ensaio de corte por compressão deve provocar uma rotura pelo betão

De acordo com a NP EN 1504 (2006) parte 3, Quadro 3, a resistência de aderência obtida pelo método da EN 1542 deve atender aos limites verificados na Tabela 4.



Tabela 4 – Requisitos de desempenho de produtos de reparo (EN 1504-3, 2006)

Nº	Características de desempenho	Substrato de referência (EN 1766)	Método de ensaio	Requisito			
				Estrutural		Não estrutural	
				Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
1	Resistência à compressão	-	EN 12190	> 45 MPa	> 25 MPa	> 15 MPa	> 10 MPa
2	Teor de cloretos	-	EN 1015-7	< 0,05 %		< 0,05 %	
3	Aderência	MC (0,40)	EN 1542	>2,0 MPa	>1,5 MPa	> 0,8 MPa	

## 1.5) Análise das tensões mobilizadas no ensaio de cisalhamento oblíquo

### 1.5.1) Segundo Eyre (1985)

A relação entre as tensões que surgem nas juntas entre um substrato de concreto endurecido e um material fresco varia consideravelmente, mas pode ser prevista através do ensaio do prisma composto. A figura abaixo apresenta um prisma sob tensão uniaxial, do tipo usado no ensaio, com a representação das tensões de aderência pelo círculo de Mohr, e suas relações (Figura 20).

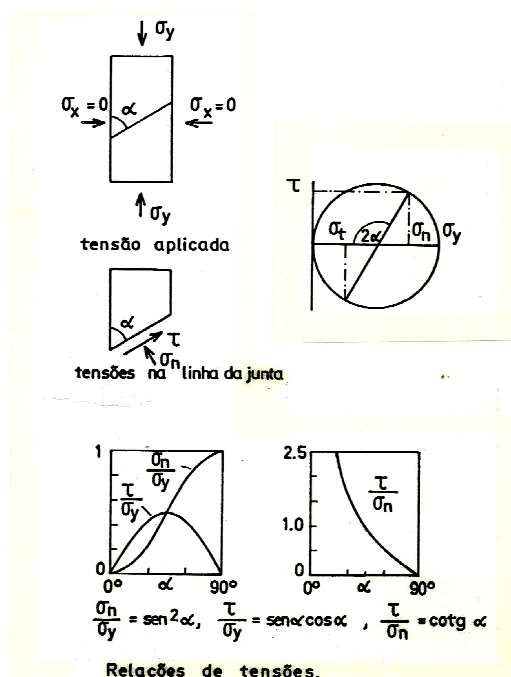


Figura 20 – Ensaio de aderência por compressão de prismas compostos (Eyre, 1985).

Variando-se o ângulo da junta é possível obter-se uma variedade de relações  $\tau/\sigma_n$  na superfície de ligação. A ruptura irá ocorrer sob uma combinação de tensões

normais ( $\sigma_n$ ) e tangenciais ( $\tau$ ) e espera-se que um aumento da tensão normal promova uma grande resistência ao corte, seguindo um critério de ruptura de Coulomb aproximado (Figura 21).

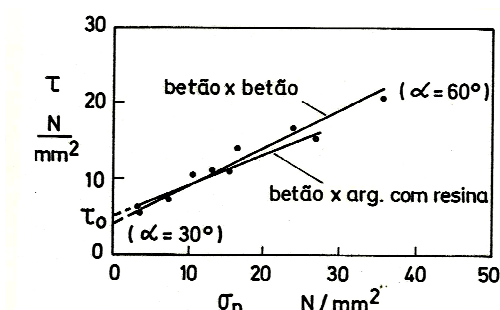


Figura 21 – Critério de ruptura para dois sistemas de reparo (Eyre, 1985)

A análise de tensões e a resistência última pode ser avaliada por um critério de Coulomb:

$$\tau = c + \mu \cdot \sigma$$

Onde:

$\tau$  = tensão tangencial ou de corte

$\sigma$  = tensão normal

$c$  = coesão aparente

$\mu$  = coeficiente de atrito na interface

Se a ruptura é governada pelo critério de Coulomb, e considerando um valor constante para a coesão, o ângulo crítico da junta irá depender do valor do coeficiente de atrito da interface, que por sua vez, depende da rugosidade da junta.

### 1.5.2) De acordo com a teoria da plasticidade

De acordo com Chen (1998), o critério de ruptura de Mohr-Coulomb considera que a tensão cisalhante limite num plano é uma função da tensão normal no mesmo plano, ou seja,  $|\tau| = f(\sigma)$ . A representação gráfica mostrada na Figura 22 indica que a ruptura do material irá ocorrer se o raio do maior círculo principal for tangente à curva envelope  $f(\sigma)$ . A Figura 23 apresenta uma representação simplificada, onde a curva envelope é substituída por uma reta.

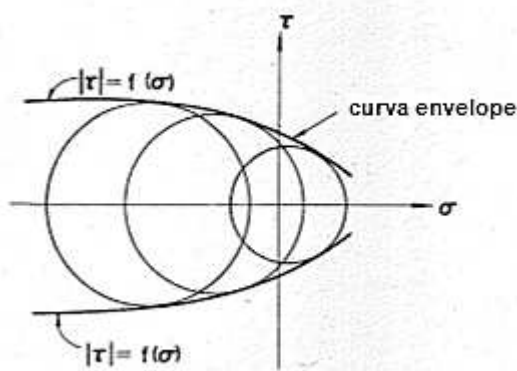


Figura 22 – Representação gráfica do critério de Mohr (Chen, 1998).

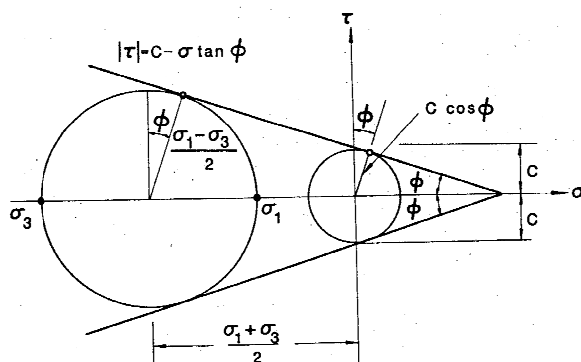


Figura 23 – Critério de Mohr-Coulomb (Chen, 1998).

A equação da reta envelope é conhecida pela equação de Coulomb, datada de 1773:

$$\tau = c + \tan \phi \cdot \sigma$$

$$\mu = \tan \phi \quad \text{ou} \quad \tan \phi = \tan (\tan^{-1} \phi)$$

Onde  $c$  é a coesão e  $\phi$  o ângulo de atrito interno são valores constantes, determinados experimentalmente. Neste critério de ruptura, designado por Critério Mohr-Coulomb, pode-se distinguir dois modos de ruptura, ruptura de deslizamento e ruptura de separação (Figura 24).

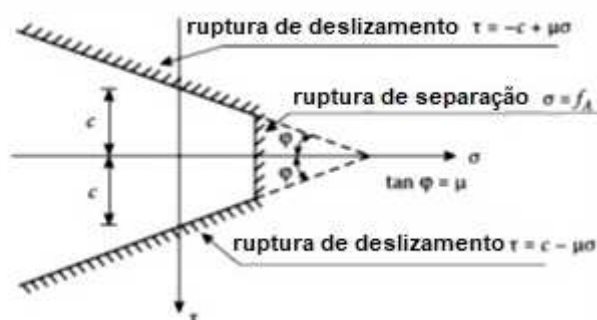


Figura 24 – Critério de Coulomb para um material modificado (Chen, 1998).

Para Nielsen (2010), quando as tensões indicadas no círculo de Mohr estiverem dentro das linhas limítrofes, nenhuma ruptura ocorrerá, mas quando as tensões indicadas nos círculos tocarem as linhas limítrofes, estas representam combinações de tensão que ocorrem na ruptura. Quando o ponto de contato dá-se na linha:

$$|\tau| = c - \mu\sigma$$

tem-se ruptura de deslizamento (Figura 25), quando o ponto de contato dá-se no contorno extremo tem-se ruptura de separação, caracterizada pela tensão normal  $f_A$ . A ruptura por separação dá-se pelo fendilhamento do concreto, associado à sua resistência à tração.

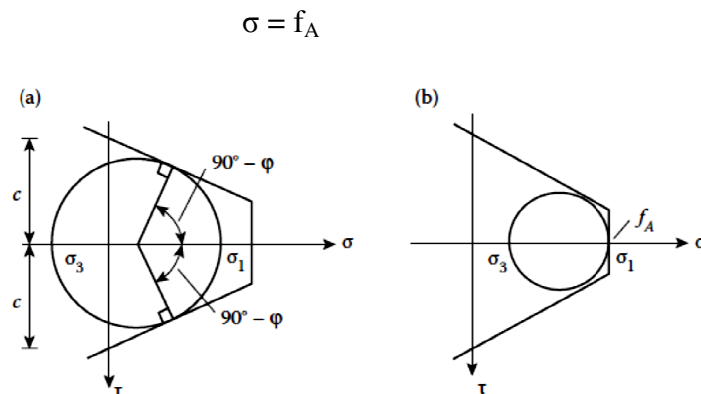


Figura 25 – Círculos de Mohr nas rupturas por escorregamento e separação (Chen, 1998).

Ambas equações acima podem ser expressas pelas tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ . A partir da Figura 25 encontramos, por projeção perpendicular em uma das linhas correspondentes à ruptura de deslizamento, as seguintes equações:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = c \cos \varphi - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi$$

Introduzindo  $\mu = \tan \varphi$ , temos:

$$(\mu + \sqrt{1 + \mu^2})^2 \sigma_1 - \sigma_3 = 2c(\mu + \sqrt{1 + \mu^2})$$

Se o parâmetro  $k$  for definido por:

$$k = (\mu + \sqrt{1 + \mu^2})^2$$

Dessa forma, as condições para se obter ruptura por deslizamento, pode ser descrita como:

$$k \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) = 2c\sqrt{k}$$

A resistência à compressão do concreto  $f_c$  está associada a um campo de tensão definido por  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  e  $\sigma_3 = -f_c$ . Como um ensaio de compressão sempre envolverá deslizamento, tem-se:

$$-\sigma_3 = f_c = 2c\sqrt{k}$$

A ruptura de compressão dá-se em dois planos que formam o ângulo de  $90^\circ - \varphi$  um com o outro e, como visto pelo círculo de Mohr, formam o ângulo de  $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$  com a direção da força aplicada (ver Figura 26). A ruptura em forma de um cone é típica dos ensaios de compressão de modelos cilíndricos.

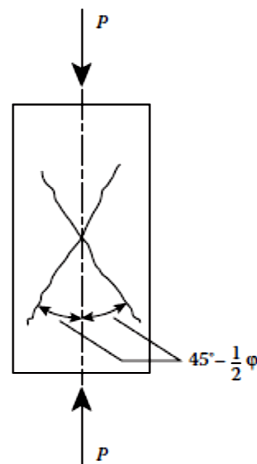


Figura 26 – Planos de ruptura em compressão pura (Chen, 1998).

Em resumo, tem-se para o ângulo crítico:

$$\alpha_{crit} = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$$

$$\sigma_{min} = f_{c,min} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 2c \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} = 2c \cdot \text{tg} \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\tau_{crit} = c(1 + \text{sen } \varphi)$$

O ensaio dos prismas compostos, como proposto pela norma inglesa, pretende avaliar a tensão cisalhante que ocorre numa junta, considerando a situação mais desfavorável. Assim, a fim de maximizar a probabilidade de obter-se ruptura por aderência, é necessário selecionar um ângulo que corresponda à menor resistência de ruptura da ligação.

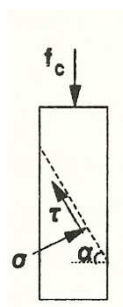


Figura 27 – Esquema do prisma composto (Clímaco, 2001).

Dadas as condições do prisma da Figura 27 acima e considerando uma junta perfeita, o que caracteriza ruptura monolítica pelo concreto, obtém-se as equações abaixo referentes às tensões normal e cisalhante últimas na interface, em termos da resistência à compressão longitudinal.

$$\sigma = f_c \cdot \cos^2 \alpha$$

$$\tau = f_c \cdot \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha$$

Onde:

$\tau$  = tensão tangencial ou de corte

$\sigma$  = tensão normal

$c$  = coesão aparente (resistência de adesão, ou seja, resistência em corte puro)

$\mu$  = coeficiente de atrito na interface

Aplicando estas equações, obtém-se o valor de  $f_c$ , ou seja, a resistência à compressão do prisma composto governada pelo plano de aderência:

$$f_c = c \cdot \frac{(1 + \text{tg}^2 \alpha)}{\text{tg } \alpha - \mu}$$

A coesão  $c$  é função da resistência do concreto à compressão e à tração e parece ser afetada pelas condições do ambiente, preparação da superfície e duração do carregamento. O coeficiente de atrito  $\mu$  é governado pela aspereza da superfície do concreto base na junta. Assumindo um valor constante para  $c$  para um dado concreto e condições definidas, o ângulo crítico da junta que corresponde à resistência mínima do prisma é:

$$\sigma_{crit} = tg^{-1}(\mu + \sqrt{\mu^2 + 1})$$

Fornecendo a seguinte equação para a resistência à compressão do prisma composto:

$$f_{c,min} = c \cdot \frac{(1 + (\mu + \sqrt{\mu^2 + 1})^2)}{\sqrt{\mu^2 + 1}}$$

À luz do critério de ruptura de Coulomb, a ruptura por deslizamento numa junta ocorre numa seção submetida a uma combinação de tensões normais e cisalhantes, como descreve a equação acima, graficamente representada pela linha reta da Figura 28. Nesta figura também estão representadas as resistências à tração  $f_{ct}$  e à compressão  $f_c$  do concreto pelos semi-círculos pontilhados. Se desprezarmos a tensão de tração do concreto, como é usual nos projetos de estruturas de concreto, o critério de Coulomb modificado para o caso de rupturas de juntas é simplificado pela reta de inclinação  $\phi$  que intercepta o eixo vertical no ponto  $c$  (representado pela coesão) e tangencia o círculo de Mohr de diâmetro  $f_{c,min}$ . Esta curva envelope está representada por uma linha sólida na Figura 28. As equações de tensões normal e cisalhante estão representadas na Figura 28 pelo semicírculo de Mohr mostrado em linha tracejada-pontilhada, cujo diâmetro é dado pela resistência à compressão do prisma monolítico de concreto e a tensão normal última é dada por:

$$f_c = 0,95 \cdot f_{cc} = 0,75 f_{cu}$$

sendo  $f_{cc}$  = resistência à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos.



Figura 28 – Critério de ruptura de prismas compostos (Clímaco,2001).

## 1.6) Comparação entre diferentes tipos de ensaios, de tratamento de superfície e de materiais de reparo

### 1.6.1) Wall e Shrive (1985)

A combinação de tensões que se apresenta numa ligação entre dois concretos varia consideravelmente, dependendo do tipo e do uso da estrutura. Por exemplo, a ligação de uma camada de revestimento num tabuleiro de ponte estará sujeita a tensões cisalhantes em conjunto com tensões de tração ou de compressão devidas à retração ou aos efeitos da temperatura, associadas às tensões de compressão e de corte advindas das cargas de utilização. A ligação de elementos pré-moldados, entretanto, deve estar exposta a tensões elevadas de compressão devidas ao carregamento axial ou a tensões de tração causadas por retração térmica.

Agentes de ligação como por exemplo resina epóxi, látex acrílico, látex SBR, PVA e argamassa de cimento Portland são normalmente usados com a intenção de promover uma melhor aderência na junta.

Os autores analisaram diferentes métodos de avaliação da aderência sob uma combinação de tensões de tração, compressão e corte, como o ensaio de cisalhamento oblíquo, o teste de tração indireta e o teste de flexão. Avaliaram



também o ensaio de cisalhamento oblíquo a partir de uma análise numérica em elementos finitos.

Com isso verificaram o efeito do módulo de elasticidade na ligação de uma camada horizontal de reparo sobre substrato de concreto, sob ação de carregamento vertical de compressão.

Quando o material de reparo for menos rígido que o concreto do substrato, este irá expandir-se lateralmente, mas será contido pelo concreto. Tensões laterais de compressão e de tração se desenvolverão no material de reparo e no substrato, respectivamente. Consequentemente, surgirão tensões cisalhantes na interface.

Por outro lado, quando o material de reparo for mais rígido que o concreto do substrato, este irá expandir-se lateralmente, com deformação menor do que a do concreto. Tensões laterais de tração e de compressão se desenvolverão no material de reparo e no substrato, respectivamente. Consequentemente, surgirão tensões cisalhantes na interface.

No método de ensaio de cisalhamento oblíquo, os efeitos devidos às diferenças nos materiais serão sobrepostos ao efeito da transmissão do esforço cortante ao longo na interface. Os autores concluíram que materiais de reparo com módulo de elasticidade maior do que o do concreto causam altas tensões de compressão na interface e baixas tensões de tração no concreto adjacente. É desejável que o material de reparo tenha módulo de elasticidade similar ao concreto adjacente. Altas tensões de compressão numa ligação rígida são aceitáveis, se o material de reparo for mais resistente do que o concreto.

#### 1.6.2) Clímaco (1989); Clímaco (1990); Clímaco (2001);

O autor avaliou a resistência de aderência, a partir do o ensaio de cisalhamento oblíquo do prisma reconstituído com junta diagonal (*slant shear test*). O autor fez um estudo considerando as prescrições da BS6319 (1984) e de um prisma modificado sugerido por ele, o que levou a modificações nesta norma, como se vê na versão de 1999.

Os resultados indicaram que este tipo de ensaio pode ser empregado com sucesso na avaliação da aderência do concreto fresco ao endurecido, dependendo de uma combinação adequada do ângulo da junta diagonal, dimensões dos

espécimes e preparação da superfície da junta. O autor apresenta também uma equação com base no critério de ruptura de Coulomb para previsão da resistência mínima à compressão de tais prismas compostos.

Para a determinação das tensões  $\sigma_{crit}$  e  $f_{c,min}$  foram adotados os valores de  $c$  e  $\mu$  propostos por Regan, conforme indica a Tabela 5.

Tabela 5 – Valores críticos do ângulo da junta e resistência mínima à compressão do prisma composto, propostos por Regan.

Interface	$c$	$\mu$	$\alpha, crit$	$f_{c,min}$
Áspera	$0,25 \cdot f_{cc}^{2/3}$	1,4	72,2°	$1,56 \cdot f_{cc}^{2/3}$
Média	$0,25 \cdot f_{cc}^{2/3}$	0,9	66,3°	$1,12 \cdot f_{cc}^{2/3}$
Lisa	$0,50 \cdot MPa$	0,7	62,5°	$1,92 \cdot MPa$

$f_{cc}$  = resistência à compressão cilíndrica do concreto do substrato (MPa)

$f_{c,min}$  = resistência à compressão mínima do prisma composto (MPa)

$\alpha$  = ângulo entre a junta e a normal à tensão axial do prisma composto

“áspera” indica interface com o agregado exposto

O autor considera que para avaliação de técnicas de reparo estrutural, a interface deve simular a textura usual, ou seja, áspera com agregado graúdo levemente exposto. Pondera que o uso de superfícies obtidas por corte não parece adequado, por serem lisas e não representarem efetivamente situações reais de reparação. Refere ainda que a profundidade de tratamento definida como média para jato de areia, suficiente para expor o agregado graúdo (exposição máxima de 6mm) é mais realista e fácil de se obter com escurificação manual ou mecânica, principalmente quando feita logo após a desforma do corpo de prova.

Quanto ao ângulo da junta, Clímaco argumenta que para atender ao critério de Coulomb, o ângulo crítico da junta depende do valor do coeficiente de atrito da interface, que assume diferentes valores seguindo diferentes autores;

- segundo Regan, para superfícies ásperas com agregado exposto,  $\mu = 1,4$  e  $\alpha, crit = 72,2^\circ$ .

- o ACI 318-83 estipula para superfícies ásperas com agregado graúdo exposto no máximo 6mm  $\mu = 1,0$  e  $\alpha, crit = 67,5^\circ$ .

- Franke adota  $\mu = 0,7$  para superfícies jateadas logo após a desforma e adota  $\alpha, crit = 60^\circ$ .

Tendo por base estas considerações, o autor desenvolveu um vasto programa experimental, constituído por 3 séries. Na 1ª série adotou as regras da BS

6319:Part 4, adotando a dosagem de concreto e o corte dos espécimes conforme indicado. Para a confecção dos prismas compostos avaliou quatro situações:

- limpeza da superfície fraturada com escova de aço e preenchimento do material de reparo contra superfície seca sem camada adesiva. O modo de ruptura desses prismas compostos foi monolítico, com resistências semelhantes às de controle.

- a superfície da junta foi coberta com uma camada de 1-3mm de cera comum de polimento para produzir aderência “virtualmente zero”. As resistências desses prismas foram de aproximadamente 55% dos prismas de controle, provavelmente devido ao efeito favorável da extrema rugosidade da superfície fraturada.

- os espécimes foram apenas trincados pelo processo da norma, mas não foram separados em duas metades.

- os espécimes foram fendilhados e separados e os prismas preenchidos, sem qualquer tratamento da superfície, ou seja, com junta seca.

Os resultados estão indicados na figura abaixo:

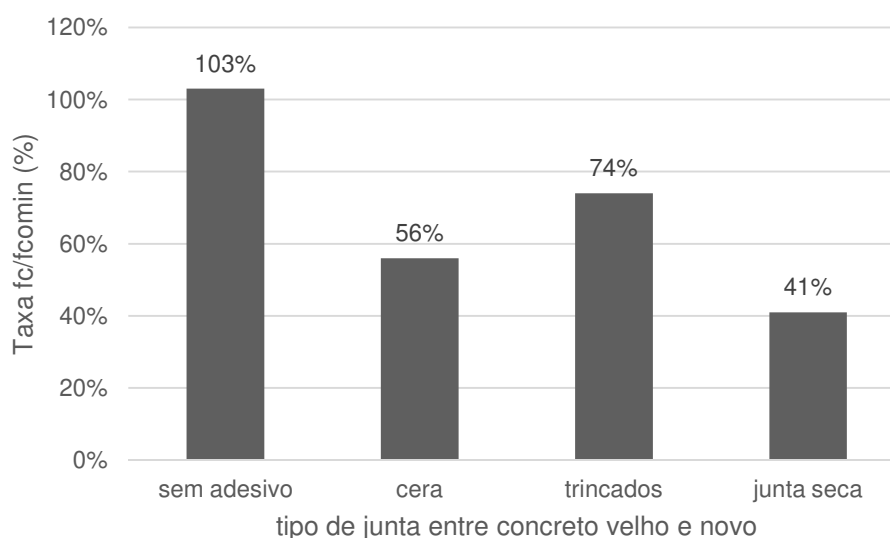


Figura 29 – Resultados da série 1 (Clímaco, 1990).

Os prismas compostos sem camada adesiva desenvolveram resistências próximas às dos prismas sólidos de controle do concreto mais fraco, base ou reparo ( $f_{c, min}$ ). As rupturas foram monolíticas e claramente não se poderia esperar nenhum melhoramento pelo uso de camada adesiva neste tipo de teste. A elevada resistência dos prismas trincados levanta dúvidas sobre a aplicabilidade sugerida pela norma inglesa.

Na 2ª série o autor aumentou as dimensões dos espécimes, de modo a melhor simular as condições reais de um reparo. Adotou ângulo de  $70^\circ$  com a horizontal e superfície mecanicamente escarificada com martelo pneumático de agulha, expondo os agregados graúdos e obtendo rugosidade definida como média. A geometria do concreto base foi projetada para evitar danos à peça durante a escarificação da superfície.

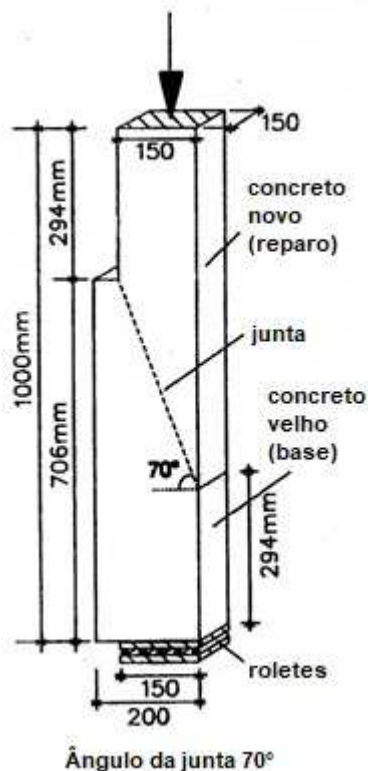


Figura 30 – Modelos para teste de compressão-cisalhamento modificado (Clímaco, 1990).

Nesta série foram estudados:

- superfície da junta mantida úmida por 4 horas, união sem camada adesiva;
- superfície seca, união sem camada adesiva;
- camada adesiva constituída por argamassa com consistência cremosa;
- camada adesiva constituída por resina epóxi aplicada com brocha e concreto fresco lançado antes da pega da resina;
- camada adesiva constituída por argamassa modificada por polímeros (SBR) aplicada com brocha em base saturada e concreto fresco lançado antes da pega da resina;
- duas camadas de SBR, sendo a segunda camada aplicada após a secagem da primeira;

- g) duas camadas de resina epóxi, sendo a segunda camada aplicada após a secagem da primeira;
- h) espécimes de controle.

Os resultados estão resumidos na Figura 31 a seguir:

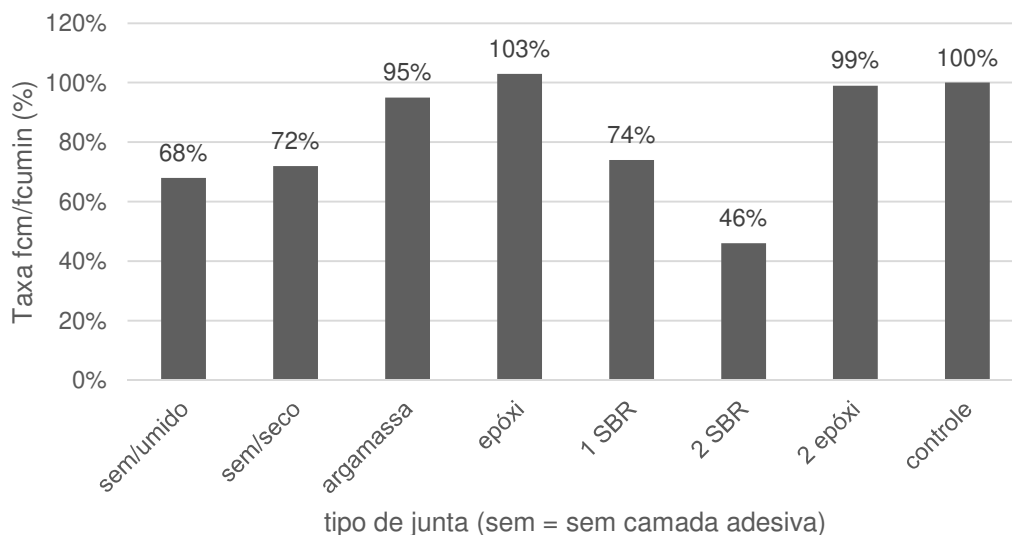


Figura 31 – Resultados da segunda série (Clímaco, 1990).

Nota-se que o teste com o prisma modificado é mais sensível a variações de aderência que o da norma inglesa e que o grupo 2.3 embora tenha tido ruptura na junta, apresentou resultados próximos daqueles onde foi usada resina epóxi para colagem.

Na 3ª série o autor procurou avaliar o efeito da retração diferencial e, para tal, o reparo foi executado após o concreto base completar 8 meses e os ensaios foram realizados após o reparo atingir 2 meses de idade. Foram executados os mesmos tratamentos da 2ª série, com exceção dos grupos com duas camadas e foram acrescentados testes sem roletes na base e um grupo com camada adesiva de argamassa base epóxi. Os resultados estão apresentados na Figura 32:

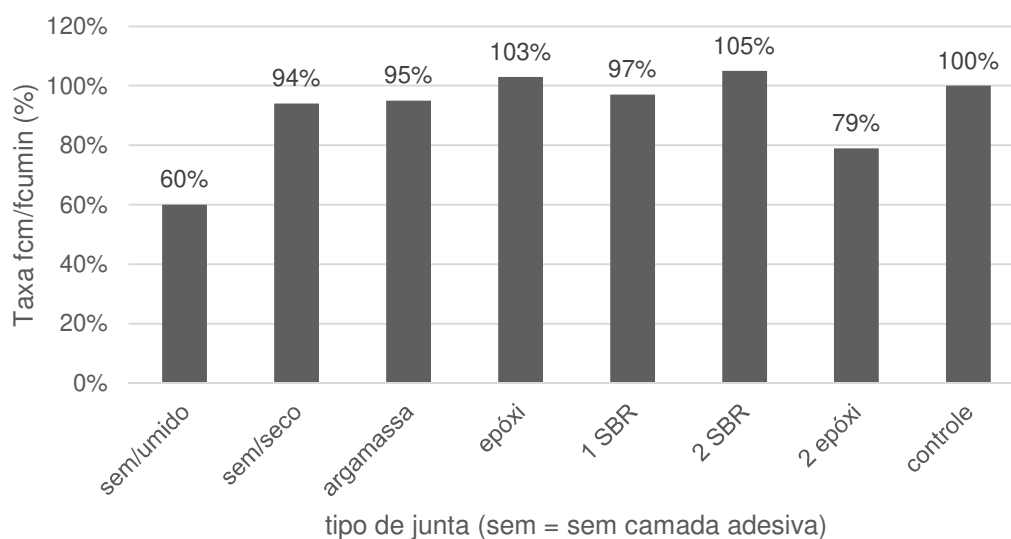


Figura 32 – Resultados da 3ª série (Clímaco, 1990).

Desses resultados os autores verificaram que o grupo 3.2, sem adesivo/superfície seca apresentou resistência de 94%, apenas 9% inferior ao grupo 3.3 com adesivo epóxi. Comparando-se as séries 2 e 3 nota-se que as resistências das juntas sem camada adesiva aumentaram com a idade do concreto-base, não acontecendo o mesmo com os grupos com epóxi e SBR. O ensaio sem rolete sob a base mostrou acréscimo de 11% na resistência.

Finalmente, o autor concluiu que as especificações da norma inglesa BS6319 (1984) são inapropriadas, provavelmente devido à extrema aspereza da superfície do concreto fraturado da junta e à adoção de um ângulo inadequado. As altas resistências dos prismas trincados, com junta seca e mesmo dos prismas com camada de cera na junta levantam sérias dúvidas sobre a capacidade da avaliação da aderência por esta norma. Os testes segundo a BS6319 (1984) mostram rupturas monolíticas enquanto os testes modificados apresentaram rupturas por aderência.

Nestes testes modificados, o grupo sem camada adesiva apresentou baixas resistências apenas nos testes de curto prazo. Nos testes de longo termo, as resistências obtidas foram entre as maiores, com pequena melhoria com uso de adesivos. O uso de uma camada de epóxi resultou nas maiores resistências de aderência. Duas camadas de epóxi não parecem ser prejudiciais embora se observassem ruptura parcial de aderência.

Em resumo, este autor avaliou outros ângulos de junta além de 60°, como 63,3°, 70° e 90°, oito tipos de adesivos, três tipos de espécimes com diferentes

dimensões e o efeito do envelhecimento do substrato e do material de reparo. Suas principais conclusões indicaram que os prismas de maiores dimensões reproduzem melhor as situações reais; as contribuições oferecidas pelos adesivos diminuem com o envelhecimento do prisma; embora a utilização de adesivos à base de epóxi ou cimentícios tenham sido parcialmente superiores aos prismas com junta seca, estes últimos mostraram-se seguros; molhar o substrato antes da aplicação do reparo mostrou-se levemente prejudicial à resistência de aderência de curta e longa duração; as juntas secas apresentaram maiores resistências nos testes que consideram o envelhecimento, ou seja, houve um ganho de resistência com o tempo.

Os resultados desta pesquisa indicam que a consideração de resistência à tração do concreto nula, indicada no critério de ruptura dos prismas compostos, por Coulomb (Figura 33) é conservativa para interfaces de junta ásperas (agregados expostos) e propõe uma modificação no início da curva envelope de ruptura. A figura abaixo indica que os resultados de ensaios de diferentes autores apresentam boa correlação com o critério de ruptura proposto pelo autor, considerando as tensões ultimas na junta do prisma composto proporcionais ao fator  $f_{cc}^{2/3}$  e os valores de coesão e atrito de Regan.

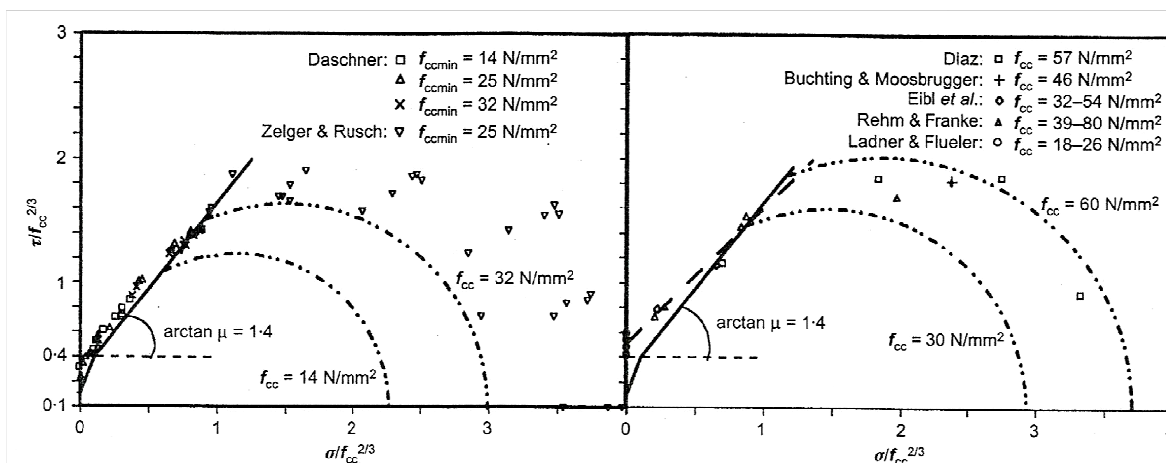


Figura 33 – Critérios de ruptura propostos

### 1.6.3) Souza (1990)

Souza (1990) avaliou a aderência concreto-argamassa de reparação comercial e concreto-concreto projetado, à luz do ensaio da BS 6319-part 4: 1984.

Considerando a expressão  $\tau = f_c \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ$  a autora obteve como resultados:  $\tau_{ad} = 14\text{MPa}$  para o caso do reparo de argamassa e  $\tau_{ad} = 13\text{MPa}$  para o reparo com concreto projetado. Para os valores de resistência dos prismas compostos, obteve os seguintes resultados:  $f_{c,mim}=33\text{MPa}$  para o caso do reparo de argamassa e  $f_{c,mim}=30\text{MPa}$  para o reparo com concreto projetado. Considerando a proposta de Regan para superfície áspera,  $f_{c,min} = 1,56 \cdot f_{cc}^{2/3}$ , tem-se  $f_{c,min}= 17\text{MPa}$  para reparo com argamassa e  $f_{c,min}= 14\text{MPa}$  para o concreto projetado. Portanto, na verificação segundo os critérios de Regan, a aderência dos dois tipos de materiais testados foi verificada.

A autora também avaliou a resistência de aderência a partir do ensaio de arrancamento e obteve os seguintes resultados para a tensão de aderência:  $\tau = 1,3\text{MPa}$  entre concreto e argamassa de reparo e  $\tau = 1,6\text{MPa}$  entre concreto e concreto projetado. A ruptura ocorreu quase sempre na ligação, com valores inferiores aos obtidos para a resistência à tração dos materiais de per s, mostrando que a ligação constitui a zona mais fraca do conjunto. Os ensaios de tração por arrancamento nos materiais envolvidos levaram aos seguintes resultados:  $f_{ct,c} = 3,6\text{MPa}$ ;  $f_{ct,arg} = 3,2\text{MPa}$  e  $f_{ct,proj} = 2,8\text{MPa}$ .

Como conclusões, Souza (1990) constatou que, em relação ao grau de eficiência dos métodos de ensaio existentes para avaliação da resistência de aderência, os valores da tensão de aderência obtidos com o ensaio de arrancamento estão relacionados com a resistência à tração dos materiais envolvidos, mas parecem exprimir resultados satisfatórios. Além disso, é um ensaio de fácil execução, podendo ser executado em obra como controle de qualidade ou para qualquer necessidade de inspeção.

Em adição, o método dos prismas compostos reproduz melhor o estado de tensões atuante na interface do reparo, mas requerem maior cuidado na sua elaboração. Destaca-se sobremaneira a dificuldade de reprodução das condições de rugosidade da interface em corpo de prova tão pequeno e com fragilidade nas suas bordas. Outra questão refere-se à dificuldade de reprodução, no caso de promover superfícies rugosas.

Ao final, Souza (1990) verificou a necessidade de se realizarem muitas outras pesquisas sobre o tema, analisando os vários estados de tensão a que estão submetidos os elementos estruturais reparados – pilares, vigas, pisos, paredes, etc.,



para carregamentos de curta e longa duração, experimentando diversos materiais e técnicas de reparação e fazendo-se uma correlação entre os métodos dos prismas compostos e do arrancamento, em ensaios de laboratório e em elementos estruturais das obras.

#### 1.6.4) Austin et al. (1999)

Estes autores fazem um levantamento histórico e tecem críticas à norma britânica antiga BS 6319 (1984).

Existe uma ampla gama de métodos de ensaios propostos para avaliar as propriedades das ligações e o desempenho dos materiais de reparo em geral. No entanto, cada teste é influenciado por diferentes combinações de fatores e não pode, por si só, dar um resultado completo. Também é importante saber como aplicar os resultados obtidos com esses ensaios em situações reais onde a interface pode estar sob compressão, tração ou sob um estado de tensões múltiplas.

Este artigo discute três métodos de ensaios de aderência que consideram a presença de tensões cisalhantes na interface de um material de reparo e substrato sob diferentes estados de tensão, a saber, compressão/cisalhamento, cisalhamento puro e tração/cisalhamento. Um objetivo deste trabalho era mostrar que, embora esses ensaios individuais possam fornecer informações úteis sobre a resistência da aderência, eles têm limitações.

O método que submete a interface de ligação à uma combinação de tensões de compressão e cisalhamento apareceu pela primeira vez na forma do ensaio de cisalhamento inclinado de Kreigh (1976 apud Austin et al. 1999) e foi posteriormente modificado usando prismas retangulares por Tabor (1978 apud Austin et al. 1999). Foi adotado pela BS6319: Parte 4 (1984) como um método de ensaio para avaliar materiais de reparo.

Os autores concordam que este ensaio é usado por fabricantes e especificadores para caracterizar produtos de reparo, embora o método apresente algumas deficiências graves. A ruptura é fortemente dependente do ângulo que define o plano diagonal, impossibilitando a obtenção de ruptura de aderência em um plano diferente. Também é relativamente insensível à rugosidade da superfície; produz rupturas por aderência somente com superfícies lisas. Por fim, o teste é

sensível a diferenças do módulo de elasticidade dos materiais de reparo e do substrato, o que pode causar concentrações de tensões.

#### 1.6.4.1) Rugosidade e orientação da junta

A rugosidade da superfície tem um efeito significativo no ensaio de cisalhamento oblíquo. Em uma rugosidade promovida com pistola de agulha, o modo de ruptura passa a ser por compressão do material de reparo ou do substrato de concreto.

Os autores realizaram estudos experimentais e teóricos. Procederam a ensaios de cisalhamento oblíquo para avaliar superfícies lisas submetidas à pistola de agulha, ao jato de areia e à contaminação com óleo de desmoldagem. A resistência de aderência aumentou com a rugosidade da superfície de 26,0 a 50,4 MPa; a superfície rugosa média contaminada produziu uma resistência maior que a da superfície lisa.

A orientação da superfície de ligação tem um efeito significativo no valor da carga de ruptura e no seu modo. Um ângulo crítico da ligação pode ser definido como aquele que permita obter a menor carga necessária para produzir ruptura de aderência. A força de ruptura do prisma irá depender do ângulo de ligação selecionado e da rugosidade da superfície.

Se forem adotados valores para os coeficientes de atrito  $\mu$  de 0,75; 1,0 e 1,25 para rugosidades lisas, médias e ásperas, a relação entre o ângulo de ligação e  $\sigma/c$  mostrada na Figura 34 indica que 27°, 23° e 19° são os ângulos críticos que correspondem às superfícies com rugosidades suaves, médias e ásperas, respectivamente.

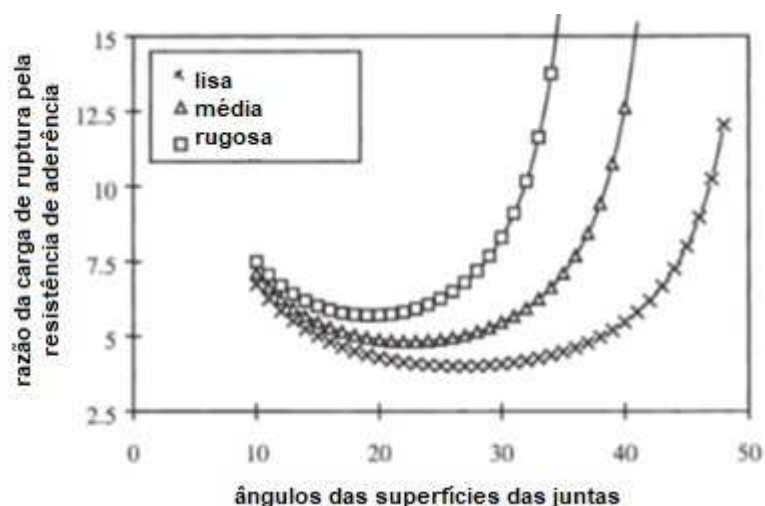


Figura 34 – Influência dos ângulos e rugosidades no modo de ruptura (Austin et al. 1999).

Para o ângulo de ligação de  $30^\circ$  recomendado pela BS 6319 (1984), a tensão de ruptura correspondente a uma superfície lisa está próxima da tensão mínima. A tensão de ruptura para uma superfície rugosa com um ângulo de ligação de  $30^\circ$  é muito maior do que a tensão mínima para o ângulo crítico de  $19^\circ$ , aumentando a probabilidade de o material resistir à ruptura por aderência.

Com a Figura 34 fica claro que, se o ângulo do plano da junta for significativamente maior que o  $\alpha_{crit}$ , a taxa de tensão para causar ruptura de aderência aumenta muito. Desta Figura 34 pode-se concluir que:

- a) a força necessária para produzir ruptura de cisalhamento ao longo da interface de ligação varia com o ângulo de ligação selecionado;
- b) há um ângulo crítico de ligação,  $\alpha_{crit}$ , sob o qual a força necessária para produzir ruptura de cisalhamento na ligação (ruptura de aderência) é mínima;
- c) o coeficiente de atrito,  $\mu$ , afeta o ângulo crítico de ligação;
- d) superfícies mais rugosas têm ângulos de ligação críticos mais baixos, o que reduz a possibilidade de obter uma ruptura na ligação ao usar a geometria padrão do plano de ligação indicado pela norma.

#### 1.6.4.2) Ruptura do concreto por cisalhamento

A resistência de aderência não é comumente mensurada sob um estado de tensão de corte puro. Um estado de tensão de corte puro pode ser visto como uma

combinação de forças de tração e compressão e, portanto, a ruptura irá depender dos valores relativos das resistências à compressão e à tração dos materiais e da resistência da aderência na ligação.

Num material frágil como concreto, que possui baixa resistência à tração, quando submetido a um estado de tensões de cisalhamento, a ruptura será geralmente dominada por fissuras de tração em vez de cisalhamento, o que significa que mesmo que uma tensão cisalhante seja imposta, a força de ruptura indicará a resistência à tração.

Como a interface agregado-pasta de cimento é geralmente a parte mais fraca do concreto, a ruptura inicia-se por fissuração de tração na direção da tensão principal de tração e não por deslizamento ao longo do plano de cisalhamento. O plano de cisalhamento também passará através de alguns agregados, mas a ruptura ocorrerá na zona interfacial em torno de cada partícula, pois é a região mais fraca e envolverá combinações variadas de tração e cisalhamento. Portanto, a textura do agregado gráúdo afeta a ligação entre a pasta de cimento e o agregado e como consequência, as resistências à tração e à compressão do concreto são afetadas pela rugosidade da superfície, mas a natureza da ruptura (fissuração de tração ao invés de corte) permanece inalterada.

#### 1.6.4.3) Rugosidade e integridade da superfície de aderência

Assim como a rugosidade do agregado afeta a ruptura por corte do concreto e da argamassa, a rugosidade e integridade da superfície de ligação têm uma influência fundamental sobre o comportamento de um ensaio de aderência. Se a interface da ligação for reta e suave, tal como aquela produzida por um corte de serra, o plano de ruptura por corte pode passar ao longo da interface de ligação, sem necessidade de vencer qualquer resistência extra causada pelo intertravamento mecânico. Em tais casos, aumenta-se a chance de obter ruptura de aderência por cisalhamento (ou seja, escorregamento). Como na realidade as superfícies de ligação não são retas e suaves e haverá a contribuição do intertravamento mecânico, a textura da superfície será irregular, resultando em um aumento da carga de cisalhamento que levará à ruptura; o resultado pode ser visto como um aumento da resistência nominal de aderência (força de cisalhamento/área nominal

de cisalhamento), embora o mecanismo de ruptura seja uma combinação de ruptura de cisalhamento e de tração no material e de aderência ao longo do plano de ruptura. Como resultado, o mecanismo de ruptura tem uma contribuição significativa da fissuração de tração, o que possibilita alguma correlação com os resultados de ensaios de aderência por tração.

A integridade do substrato é condição essencial para a realização de um ensaio de aderência por tração, caso contrário surgirão microfissuras precipitando a ruptura do material por tração.

Os autores concluem que vários ensaios já foram propostos para avaliação da aderência de uma ligação. Aspectos como a rugosidade da superfície, incompatibilidade do módulo de elasticidade e sobretudo o estado de tensões atuante na junta afetam o resultado obtido. A configuração de ensaio deve retratar de forma mais fidedigna possível as condições de tensões atuantes em uma junta.

Enfim, a construção de uma curva envelope permite obter uma visão completa do desempenho da aderência na ligação, pois cobre toda a gama de combinações de tensões normais e cisalhantes que podem surgir na prática e, assim, ser usada para prever a capacidade de ligação em uma variedade de configurações de reparo. Os dados podem ser obtidos a partir do ensaio de cisalhamento oblíquo (Figura 35).

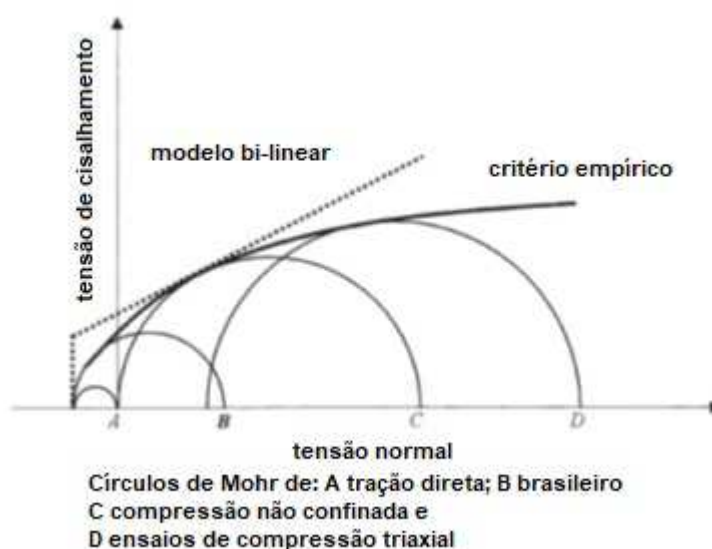


Figura 35 – Diversos círculos de Mohr propostos (Austin et al., 1999)

### 1.6.5) Julio et al. (2004)

Júlio et al (2004) realizaram um estudo experimental para avaliar a resistência da ligação entre duas camadas de concreto usando diferentes técnicas para o aumento da rugosidade da superfície do substrato. Os substratos das amostras foram preparados por escovação, jato de areia, apicoamento ou deixados como desformados. Três meses depois, foi adicionado o novo concreto. Testes de arrancamento de pastilha foram realizados para avaliar a resistência da ligação à tensão. Ensaio de cisalhamento oblíquo foram realizados para quantificar a resistência de aderência da ligação.

Um dos objetivos definidos na pesquisa de Júlio et al (2004) foi quantificar a influência da rugosidade da superfície do substrato sobre a resistência da ligação. Dessa forma, foi possível classificar as técnicas de preparação da superfície utilizadas a partir da rugosidade obtida, da mais alta para a mais baixa: jato de areia (5), escovação de aço (2), apicoamento (3) e como desformado (1). Na Figura 36, podem ser vistos os resultados, respectivamente.

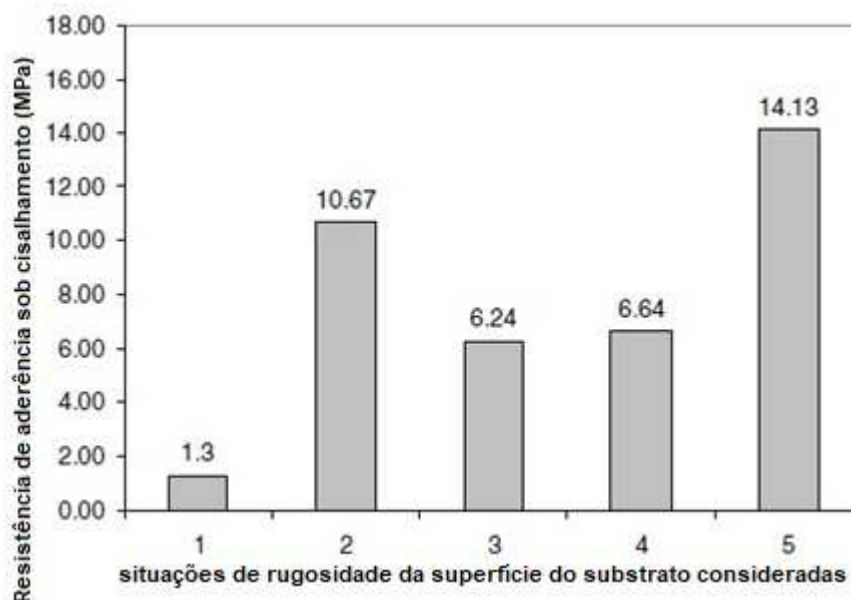


Figura 36 – Influência da rugosidade da superfície do substrato sobre a resistência da ligação (Julio et al., 2004)

Os resultados indicaram que o maior valor da resistência da ligação foi obtido com o uso do jato de areia e que os testes de *pull-off* são adequados para estimar a

resistência de ligação *in situ*. Além disso, os autores observaram que pré-molhar a superfície do substrato não parece influenciar a resistência da ligação.

#### 1.6.6) Doria et al. (2005)

Doria et al (2015) analisaram a resistência de aderência entre concretos de diferentes idades e entre aço e concreto, visando à recuperação de estruturas de concreto armado. Para análise da aderência entre concretos de diferentes idades, foram realizados ensaios com corpos de prova que receberam três tipos de tratamentos distintos na interface entre os concretos: escovação; escovação e camada de argamassa e escovação e camada de epóxi. Foram feitos ensaios de tração indireta e cisalhamento oblíquo e vertical na interface. Os resultados dos ensaios de aderência dos corpos de prova de concreto mostraram aumento na resistência de aderência por tração indireta de 15% e 37%; de 4% e 12% para o ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo, e de 108% e 178%, para o ensaio de cisalhamento vertical, respectivamente, para os corpos de prova cujas interfaces receberam, além de escovação, camada de argamassa e ponte de epóxi, em relação àqueles que somente receberam escovação.

Os resultados obtidos para a resistência de aderência por tração sob compressão diametral estão mostrados na Figura 37. Quando foi aplicada, além da escovação, uma fina camada de argamassa na superfície de contato entre os concretos, os resultados mostraram que houve um incremento de 15% na aderência, em relação à interface entre o substrato e o concreto de recuperação que somente recebeu escovação. Foi verificado um aumento de 37% na resistência de aderência para os corpos de prova com ponte de aderência de epóxi, quando comparados àqueles submetidos somente à escovação, com os submetidos à escovação e aplicação de camada de epóxi.

Método de tratamento	Parâmetros de resistência de aderência	
	Média (MPa)	Coef. de variação (%)
Escovação	1,94	8,99
Escovação-argamassa	2,23	9,00
Escovação-epóxi	2,66	19,49

Figura 37 – Resultados dos ensaios de aderência por tração por compressão diametral entre concreto de recuperação e de substrato. (Doria et al., 2015)

Os resultados dos ensaios de aderência por cisalhamento oblíquo são mostrados na Figura 38. Observou-se que, a resistência de aderência dos corpos de prova que receberam escovação e camada intermediária de argamassa foi superior em 4%, em relação aos corpos de prova de concreto de recuperação e de substrato apenas com escovação. Para os corpos de prova com ponte de aderência de epóxi, a resistência de aderência média foi superior em 12%.

Método de tratamento	Parâmetros de resistência de aderência	
	Média (MPa)	Coef. de variação (%)
Escovação	20,88	17,83
Escovação-argamassa	21,71	14,07
Escovação-epóxi	23,38	8,07

Figura 38 – Resultados dos ensaios de aderência por cisalhamento oblíquo entre concreto de recuperação e de substrato (Doria et al., 2015).

A Figura 39 apresenta os valores obtidos no ensaio de aderência por cisalhamento vertical. Na comparação do desempenho de aderência por cisalhamento vertical entre concreto de substrato e de recuperação, foi observado que, para os corpos de prova que receberam camada de argamassa na interface, a resistência de aderência foi superior ao dobro da resistência de aderência dos corpos de prova que receberam apenas escovação na interface. Para os corpos de prova que receberam camada de epóxi na interface, esse aumento da resistência de aderência foi de 178%.

Método de tratamento	Parâmetros de resistência de aderência	
	Média (MPa)	Coef. de variação (%)
Escovação	1,43	6,68
Escovação-argamassa	2,97	4,58
Escovação-epóxi	3,97	25,48

Figura 39 – Resultados dos ensaios de aderência por cisalhamento vertical entre concreto de recuperação e de substrato (Doria et al., 2015).

Doria et al (2015) chegaram à conclusão que o tratamento de interface que apresentou melhores resultados na aderência entre concreto de substrato e concreto



de recuperação, entre os três tipos de tratamento estudados, foi a escovação da superfície e posterior aplicação de ponte de aderência de epóxi. Esse tratamento pode ser tomado como a melhor alternativa de reparo ou reforço de estrutura de concreto, dentre os tratamentos estudados, chegando a superar em até 178%, como no ensaio de cisalhamento vertical, a resistência de aderência entre concretos, quando comparado aos valores obtidos para corpos de prova que receberam apenas camada de escovação.

#### 1.6.7) Momayez et al. (2005)

Os autores examinaram a variedade de métodos de ensaios para avaliar a ligação entre substrato de concreto e materiais de reparo cimentícios modificados ou aditivados. Em seu estudo, eles compararam a resistência de aderência medida por quatro tipos de testes e duas categorias de materiais de reparo diferentes.

Os ensaios realizados por Momayez et al. (2005) foram: arrancamento, cisalhamento oblíquo, tração indireta e cisalhamento bi-superfície. Este último foi desenvolvido como um novo método, onde a parte de material de reparo constitui um terço do espécime. A dimensão dos prismas foi de 150x150x150mm, sendo que a parte de concreto media 100x150x150mm e a parte do reparo, 50x150x150mm. A carga foi aplicada como representada na Figura 40 abaixo:

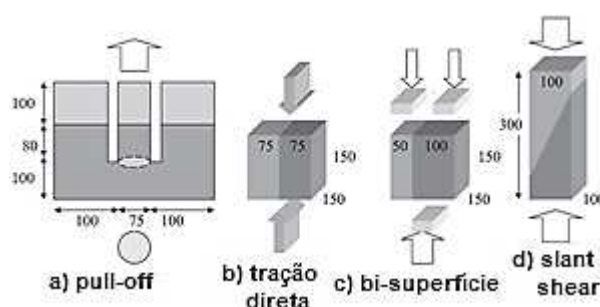


Figura 40 – métodos de ensaio (Momayez et al., 2005).

Neste estudo, os autores usaram o mesmo traço de concreto em todas as bases. Após dois dias da moldagem, foi conferida rugosidade às superfícies de reparo com uso de escova de aço. Após isso, foram imersos para cura por 28 dias.

Antes da aplicação do reparo, os espécimes foram mantidos fora da cura úmida por mais 30 dias. A limpeza da superfície foi feita com ar comprimido.



Figura 41 – Rugosidades obtidas 2 dias após a moldagem (Momayez et al., 2005).

Foram usadas seis misturas de materiais de reparo. Quatro delas foram compósitos com teores 0%, 5%, 7% e 10% de sílica ativa. As outras foram argamassas cimentícias modificadas com 10% de aditivo polimérico (K100) e 20% de resina de estireno butadieno (SBR). Para todos foram utilizadas argamassas correspondentes como agentes de ligação nas interfaces, aplicadas com pincel e espessuras entre 1 e 3mm. Em um total de 164 corpos de prova, todos foram rompidos com a idade de 28 dias. Assim, o estudo desconsiderou os efeitos a longo termo.

Os modos de ruptura foram caracterizados pela localização da fratura. A ruptura na ligação ocorreu ao longo da interface. Em alguns exemplares, houve ruptura parcial no concreto ou no reparo. Em todos os ensaios de arrancamento e fendilhamento, a ruptura foi na ligação.

Os resultados mostraram que a resistência na ligação é muito dependente do tipo de ensaio executado, com valores até oito vezes maiores para uns que outros. Os valores obtidos foram elencados em ordem decrescente, como: cisalhamento oblíquo, bi-superfície, tração indireta e arrancamento. O uso de sílica ativa aumentou a resistência em todos os teores, mas os efeitos foram considerados insignificantes a partir de 7%. Foi observado também que quanto maior a rugosidade, maior a resistência de aderência, conduzindo a incrementos desde 9% no arrancamento até 25% no cisalhamento oblíquo. A influência da rugosidade é mais pronunciada quando o material de reparo tem baixa adesão, como no caso dos cimentícios.

Para os autores, o ensaio bi-superfície proposto foi de fácil execução e proveu resultados consistentes. O teste representa um estado de cisalhamento puro na interface. Por fim, foi recomendado que o tipo de teste escolhido seja aquele que representem melhor o estado de tensões que a estrutura avaliada esteja submetida em campo.

1.6.8) Saldanha et al. (2012); Júlio et al. (2006); Santos e Júlio (2011); Saldanha et al. (2013)

Neste artigo os autores propõem um método de ensaio modificado para o *slant shear test*. Os autores referem que a escolha do Método da BS EN 12615:1999 deve-se principalmente ao fato de: *i*) ser sensível à preparação da superfície da interface (rugosidade), um dos parâmetros que mais influencia a resistência da interface; e *ii*) a interface estar sujeita a tensões de corte e compressão, tal como acontece na generalidade das estruturas reais. Entretanto, ponderam que um inconveniente deste ensaio relaciona-se com o fato de serem frequentemente obtidos dois tipos de ruptura distintos: *i*) adesão/aderência (descolamento pela interface); e *ii*) coesiva (esmagamento do concreto mais fraco). No caso de ruptura coesiva apenas é obtido um limite inferior da resistência ao corte da interface concreto-concreto, dado que nesta situação a ruptura é controlada pela resistência à compressão do concreto mais fraco e não pelas características da interface.

Os autores ensaiaram 223 corpos de prova com diferentes ângulos ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $26.7^\circ$ ) e verificaram que, mesmo quando os ângulos são selecionados para obter rupturas adesivas/aderência, as rupturas coesivas também ocorrem e, portanto, apesar de considerarem que o ângulo da interface tem um papel extremamente importante no modo de rotura, não é possível obter rupturas na interface apenas ajustando o ângulo.

Júlio et al. (2006) avaliaram a influência da rigidez diferencial no comportamento de interfaces concreto-concreto usando o SST. Mantiveram constante o concreto do substrato, com uma resistência à compressão de 30 MPa e variaram a resistência à compressão do concreto adicionado: 30 MPa, 50 MPa e 100 MPa. A superfície da interface foi preparada com jato de areia para aumentar a rugosidade. A análise dos resultados permitiu concluir que os espécimes com o

mesmo concreto o nas duas metades (30/30) apresentaram rupturas adesivas, enquanto que os restantes espécime (30/50 e 30/100) apresentaram rupturas coesivas, provando que a rigidez diferencial também influencia o tipo de ruptura.

Santos e Júlio (2011) também observaram o aumento do número de rupturas coesivas com o aumento da rugosidade. A influência da retração diferencial foi também estudada, considerando-se diferentes idades e condições de cura para substrato e concreto adicionado.

Saldanha et al. (2012) apresentam a curva envelope da resistência de aderência que pode ser obtida usando os resultados de SST combinados com os resultados do ensaio de tração ( $f_{t,i}$ ) e a resistência de corte puro ( $\tau_0$ ) estimada usando o critério de Mohr-Coulomb (Figura 42). Se ocorrer ruptura coesiva, a curva envelope pode também ser determinada, no entanto, com menor inclinação, representada pela linha tracejada na Figura 42, onde  $f_c$  é a resistência à compressão da interface.

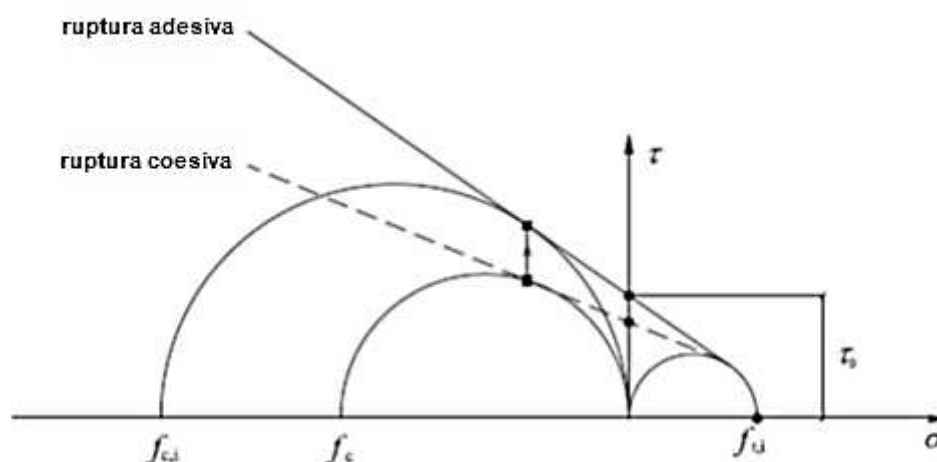


Figura 42 – Curvas envelope para rupturas coesivas ou adesivas (na interface) (Saldanha et al., 2012).

Em resumo, os autores afirmam que o tipo de ruptura no ensaio de cisalhamento oblíquo é influenciado pelos seguintes parâmetros: *i)* ângulo da interface; *ii)* rugosidade da interface; *iii)* rigidez diferencial; e *iv)* retração diferencial.

Diante disso, os autores propõem uma solução designada por *Modified Slant Shear Test* que visa induzir a ocorrência de rupturas na interface em todas as situações. Os espécimes têm a mesma geometria da norma atual, ângulo da

interface com a horizontal de  $60^\circ$ , mas com as dimensões de  $150 \times 150 \times 600$  mm e armaduras em cada uma das partes constituintes.

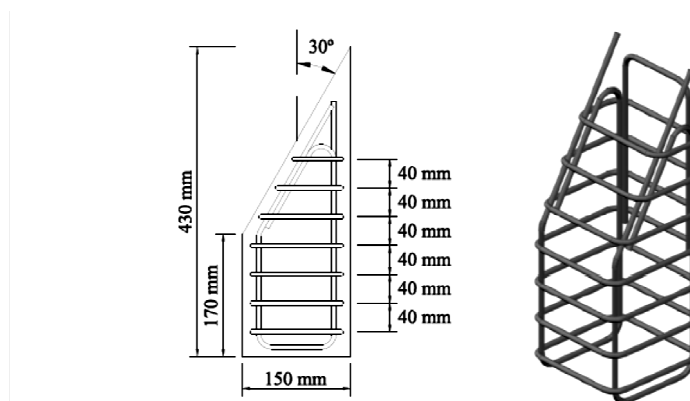


Figura 43 – Esquema da armadura utilizada (Santos e Júlio, 2011).

Para comprovar a eficiência do modelo foram moldados e ensaiados dois espécimes monolíticos, sendo um com e outro sem armadura. Os ensaios revelaram que nos prismas sem armadura, as fissuras apresentaram-se aproximadamente verticais e que naqueles com armadura, as fissuras distribuíram-se ao longo da interface com um ângulo de aproximadamente  $60^\circ$  com a horizontal. Concluíram que a presença da armadura condicionava o modo de ruptura, forçando a que esta ocorresse pela interface e não pelo material de menor resistência à compressão.

Os autores concluem que o ensaio proposto apresenta as mesmas vantagens do ensaio SST, permitindo ultrapassar um dos seus principais inconvenientes que é a incerteza na obtenção de rupturas adesivas/de aderência. Utilizando este ensaio modificado é possível quantificar, de forma objetiva, a real resistência da interface concreto-concreto, e não estimar apenas um limite inferior, quando esta se encontra sujeita a um estado combinado de tensões de compressão e de corte.

#### 1.6.9) Tayeh et al. (2013)

Tayeh et al. (2003) avaliaram a resistência de aderência entre concreto convencional e concreto de ultra alto desempenho com fibras (UHPFC). O programa experimental conduzido por estes abrangeu os ensaios de cisalhamento oblíquo e tração indireta, segundo as normas ASTM C882 e C496, respectivamente.

Para o representar o substrato, o concreto utilizado por TAYEH (2003) alcançou com 28 dias a resistência à compressão média de 45 MPa. Como material de reparo, foi empregado um concreto de ultra alto desempenho, contendo sílica ativa, superplastificante e microfibras de aço de ultra alta resistência. As fibras, usadas em um teor de 157 kg/m<sup>3</sup>, tinham comprimento de 10mm, diâmetro de 0,2mm e resistência última à tração de 2500 MPa. O UHPFC deste estudo atingiu a resistência a compressão de 170 MPa com 28 dias.

Todos os espécimes testados por Tayeh (2003) eram compostos de dois materiais, sendo o substrato de concreto convencional e um concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras de aço como material de reparo. Após três dias da moldagem do substrato, a superfície da interface foi tratada de cinco formas diferentes: sem rugosidade, jato de areia, escova de aço, apicoamento mecânico e ranhuras. A moldagem do reparo ocorreu 90 dias após a primeira concretagem.



Figura 44 – Diferentes rugosidades testadas (Tayeh et al., 2003).

No ensaio de cisalhamento oblíquo realizado por Tayeh (2003) de acordo com a ASTM-C882 1999, os 15 corpos de prova prismáticos tinham as dimensões de 100x100x300mm. Já no ensaio de tração indireta por compressão diametral (ASTM-C496 1996), os espécimes cilíndricos mediam 100mm de diâmetro e 200mm de comprimento. A Figura 45 ilustra os dois tipos de testes realizados. Em ambos os testes, os resultados convergiram na mesma classificação de resistência de aderência em relação às rugosidades: jato de areia, ranhuras, escova de aço, apicoamento mecânico e sem tratamento, em ordem decrescente.

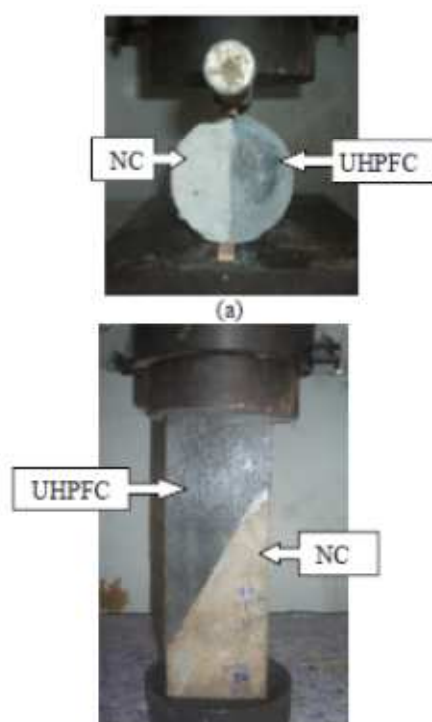


Figura 45 – corpos de prova dos ensaios de tração indireta e cisalhamento oblíquo (Tayeh et al., 2003).

Tayeh et al. (2003) concluíram que os resultados do ensaio de tração indireta demonstram ótima qualidade da ligação, uma vez que a maioria das rupturas dos cilindros ocorreu no substrato de concreto. No ensaio de cisalhamento oblíquo, concluíram que a resistência de aderência era muito forte, pois a ruptura na interface ocorreu após danos no substrato. Em alguns casos, a ruptura ocorreu apenas no concreto e não houve separação entre as partes, o que indica comportamento de aderência superior do concreto de ultra alto desempenho testado.

Por fim, os autores confirmam que a resistência de aderência entre concretos depende do tratamento aplicado na superfície da interface, sendo maior quanto maior for a rugosidade. Neste estudo, a maior resistência de aderência foi obtida com o jateamento de areia.

#### 1.6.10) Sahmaran et al. (2014)

No estudo experimental desenvolvido por Sahmaran et al. (2014), foi avaliada a resistência de aderência entre um substrato de concreto convencional e três tipos

de revestimentos, sendo: um compósito cimentício com fibras de PVA e adição de cinza volante (F\_ECC), um compósito cimentício com fibras de PVA (S\_ECC) e adição escória de alto forno e um concreto com microsilica (MSC). Foram testadas superfícies com texturas lisa e rugosa.

O concreto do substrato tinha, aos 28 dias, resistência mínima à compressão de 30 MPa. Os compósitos com fibras tinham 712 kg/m<sup>3</sup> de escória de alto forno ou 680 kg/m<sup>3</sup> de cinza volante classe F e tinham propriedades no estado fresco semelhantes ao concreto auto adensável. O teor de fibra PVA com 8mm de comprimento era de 2%. Foi usada uma proporção de 45 kg/m<sup>3</sup> no compósito com microsilica. Os revestimentos (F\_ECC), (S\_ECC), (MSC), apresentaram aos 28 dias resistências à compressão de 53,8 MPa; 71,2MPa e 68,7MPa, respectivamente.

O estudo de Sahmaran et al. (2014) usou o ensaio de cisalhamento oblíquo e o de tração à compressão diametral, adaptado para prisma para obter a resistência de aderência em compressão-cisalhamento e tração indireta, respectivamente. O primeiro ensaio foi modificado com base na ASTM C882, usando cilindros de 100x200 mm. O ensaio de tração indireta foi adaptado da ASTM C496 e testou cubos de 76,2x50x30 mm, que foram cortados de uma peça maior, resultando em duas superfícies: lisa, na face onde houve corte e rugosa, na face deixada como desmoldada, sem tratamento. Já as metades os cilindros do teste de cisalhamento oblíquo foram cortadas com serra diamantada e não foi utilizado nenhum agente de ligação nos substratos antes da aplicação do revestimento. Os corpos de prova foram rompidos com idades de 1, 7 e 28 dias.

Os resultados obtidos por Sahmaran et al. (2014) mostraram que o efeito do tipo de revestimento é significativo. A mistura com escória de alto forno apresentou o maior valor de resistência de aderência, enquanto que o compósito com microsilica, o menor. Outro fator importante foi o tipo de rugosidade. As resistências dos compósitos com cinza volante, escória e microsilica aumentaram em 12, 10 e 5% com as interfaces rugosas, comparado com as superfícies lisas. Durante o ensaio de cisalhamento oblíquo, todos os espécimes apresentaram ruptura ao longo da interface, para as misturas com cinza volante e escória de alto forno. Por outro lado, nos exemplares com microsilica a ruptura foi com o descolamento da interface ou monolítica. Assim, os autores concluíram que os compósitos cimentícios com cinza volante e escória de alto forno podem atingir resistências de ligação adequadas com outros concretos.



### 1.6.11) Mirmoghtadaei et al. (2015)

Os autores conduziram um programa experimental no qual foi avaliada a influência de vários tipos de preparo de superfície na aderência entre concretos. Também foi examinado o efeito do uso de vários teores de metacaulim. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a norma ASTM C882 e ensaiados por cisalhamento oblíquo.

Dentro de um total de 54 corpos de prova, foram aplicadas três tipos de argamassas de reparo e seis tipos de rugosidade. Para as misturas de reparo, variou-se o teor de metacaulim em 0%, 10% e 15% e foi usado aditivo superplastificante. Os corpos de prova cilíndricos tinham dimensões de 75x150mm. Os efeitos de envelhecimento foram analisados, com os testes executados nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Após a cura imersa por 28 dias, aplicou-se no substrato de concreto seis métodos diferentes de preparo da superfície: como desformado, para controle; textura com escova de aço; aplicação de ácido hidro clorídrico de acordo com a ASTM D4262; ranhuras feitas com ferramenta mecânica, com 3mm de espessura e 6mm de profundidade; ranhuras e escovação; ranhuras e aplicação de ácido. Em todos os espécimes foi usada uma pasta de cimento no traço 1:2, como agente de ligação.



Figura 46 – Rugosidade obtida com ranhuras e aplicação de ácido (Mirmoghtadaei et al., 2015).

Os autores concluíram que a maior resistência na ligação, em todas as idades, foi obtida com a rugosidade de ranhuras e ácido. O aumento significativo foi atribuído devido à superfície mais áspera entre todos os métodos e ao melhor intertravamento entre o substrato e o revestimento. Nestes espécimes, a ruptura ocorreu com grandes fissuras no concreto base e pequenas no reparo. Os exemplares tratados com escova de aço apresentaram modo de ruptura com pequenas fissuras no substrato completando ao longo da interface. Nos corpos de prova sem nenhum preparo da superfície, a ruptura ocorreu ao longo da interface. Dessa forma, foi comprovado que o uso de ácido pode remover melhor a nata de cimento da superfície dos agregados, em comparação com a escovação.

Para todos os tipos de rugosidades, o uso de 10% de metacaulim no material de reparo, ao invés de 0% ou 15%, foi o que levou a melhor resistência na ligação. Entretanto, como se vê nos gráficos abaixo (Figura 47), comparando os resultados dos teores de 10% e 0%, a rugosidade obtida por meio de ranhuras por si só não melhora a resistência de aderência. Nos exemplares contendo material de reparo pozolânico, a resistência aumenta em relação aos isentos.

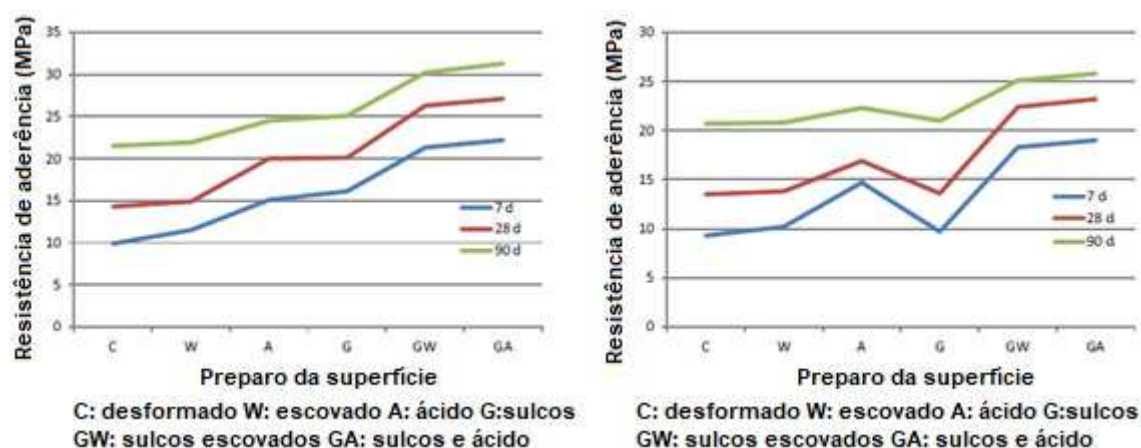


Figura 47 – Resultados com teores de 0% e 10% de metacaulim (Mirmoghtadaei et al., 2015).

#### 1.6.12) Ahmed et al. (2017)

Estes autores estudaram a resistência de aderência entre um concreto velho e um novo auto adensável. Foram avaliados parâmetros como tipo do agente de

ligação, rugosidade do concreto base e o efeito da adição de fibras de polipropileno no concreto auto adensável, assim como a compatibilidade entre as resistências à compressão e rigidez entre os materiais constituintes.

Ahmed et al. (2017) utilizou dois tipos de corpos de prova, cilíndricos e prismáticos, e de dois tamanhos diferentes para cada forma. A superfície da interface entre o concreto base e reparo foi saturada e escovada manualmente. Foram considerados quatro tipos de rugosidade diferentes: escovação manual, rugosidade mecânica por escova de aço, sulcos com 3mm de profundidade e espessura e sulcos com 6mm de largura e profundidade, mostrados na figura abaixo. Foram utilizados três tipos de agente de ligação, adesivo epóxi, pintura látex e nata de cimento. Em alguns traços de concreto de reparo foram usadas frações de 0,1% e 0,2% de fibras de polipropileno.

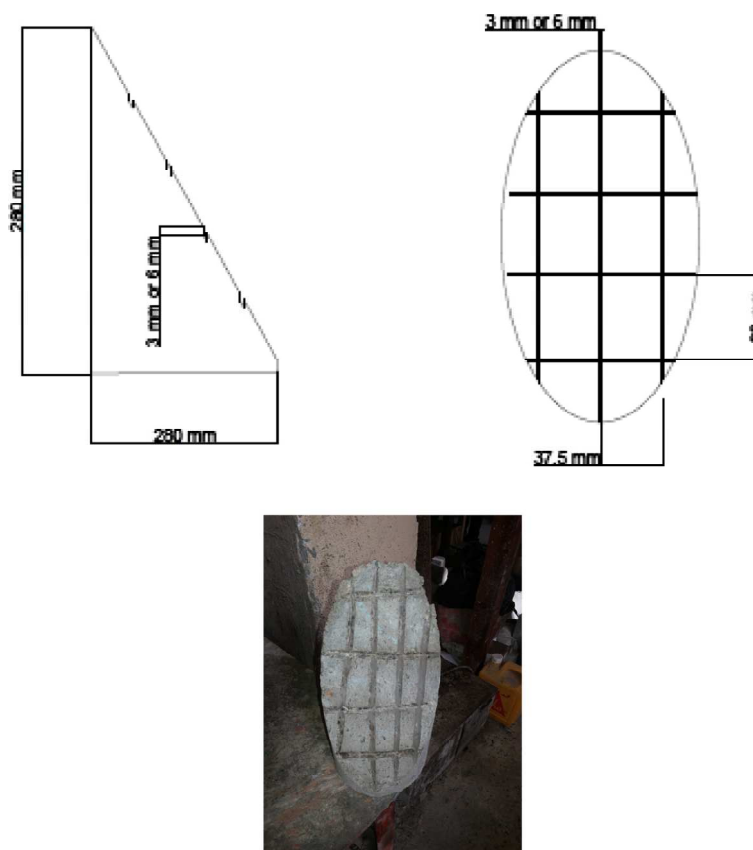


Figura 48 – Configuração dos sulcos nos corpos de prova (Ahmed et al., 2017).

Os resultados mostraram que a resistência de aderência na ligação aumentou com o aumento da rugosidade, especialmente nos processos mecânicos. A aderência máxima foi obtida com os sulcos de 6mm de espessura e profundidade. Este comportamento pode ser atribuído à maior interação entre o concreto base e

novo, que aumenta a força da ligação. Além disso, esta interação reduz a retração autógena diferencial entre os concretos. Este resultado concorda com o ACI 546 quando diz que uma rugosidade mais profunda é necessária para melhor desempenho do reparo estrutural. O estudo também aponta que o tratamento da superfície com sulcos menores (3mm) não apresentou o desempenho esperado, o que pode ser devido ao fato do maior tamanho do agregado em relação a dimensão dos sulcos (Figura 49).

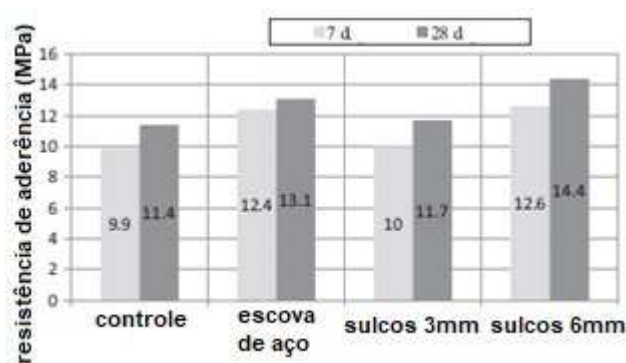


Figura 49 – Resistências de aderência obtidas com diferentes técnicas de rugosidade (Ahmed et al., 2018)

Quanto ao emprego de agentes de ligação, ficou claro ao autor que a resistência aumenta pronunciadamente com a resina epóxi e pintura látex. A nata de cimento, porém, tem efeito considerado insignificante. O agente de ligação também tem efeito sobre o modo de ruptura. Os exemplares com epóxi não rompem na superfície da interface.

Assim, concluiu-se que a rugosidade obtida com os maiores sulcos aumentou em 26% a resistência a aderência na ligação. Os resultados mostraram que os corpos de prova prismáticos apresentam resultados mais confiáveis no ensaio de cisalhamento oblíquo, quando comparado aos espécimes cilíndricos, mesmo estes apresentando geometria com menor coeficiente de variação. Por fim, o uso de teores de 0,1% e 0,2% de fibras de polipropileno no concreto auto adensável aumentou em 9% e 14%, respectivamente a resistência obtida no ensaio de compressão-cisalhamento.

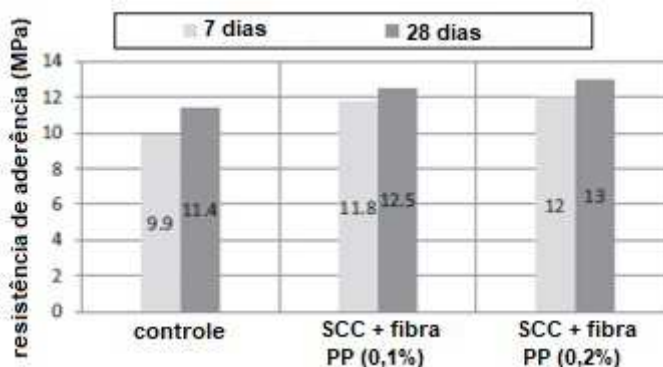


Figura 50 - Resistências de aderência obtidas com o uso de fibras de polipropileno (Ahmed et al., 2017).

### 1.6.13) Bentz et al. (2018)

Em seu estudo, Bentz et al. (2018) aplicaram uma variedade de ferramentas de caracterização para investigar a microestrutura interfacial que se desenvolve quando um material de reparo fresco é aplicado a um substrato. Foram empregadas simultaneamente radiografias com nêutrons e raio-X para observar a dinâmica dos rearranjos microestruturais que ocorrem na interface durante as primeiras 4 horas da cura.

Para avaliar a aderência da ligação entre concreto e material de reparo, Bentz et al. (2018) realizaram ensaios de cisalhamento oblíquo e tração direta (*pull off* ou arrancamento), de acordo com os códigos ASTM C882 e C1583, respectivamente. A resistência à compressão do substrato de concreto foi de 55 MPa aos 28 dias. Para o ensaio de cisalhamento oblíquo, também foi usado um outro substrato de argamassa. Os materiais de reparo foram duas argamassas comerciais, uma monocomponente reforçada com fibras e outra cimentícia, com respectivas resistências à compressão de 62 MPa e 48 MPa.

Nos testes executados por Bentz et al. (2018), as superfícies da interface eram lisas ou rugosas, sendo que para cada ensaio foi aplicado um tipo de tratamento que conduziu a rugosidades diferentes. Dessa forma, para o ensaio de cisalhamento oblíquo, a superfície do substrato composto por argamassa comum foi preparada um dia antes da aplicação do material de reparo (após cura mínima de 28 dias), utilizando uma esmerilhadeira para promover rugosidade. Já para o ensaio de arrancamento, após a moldagem, foi aplicado na superfície de concreto um agente

retardante, para que os agregados fossem facilmente expostos por lavagem pressurizada após 24 horas.

Os resultados obtidos por Bentz et al. (2018) indicaram a importância da rugosidade da superfície no incremento da aderência, desde que os espécimes com a superfície lisa exibiram resistências 50% menores que os valores obtidos com as interfaces rugosas. No ensaio de tração direta, as resistências das interfaces sem tratamento foram significativamente menores que as do substrato com exposição dos agregados.

Os autores também concluíram que, em relação à condição de umidade da interface, uma superfície saturada seca promove as maiores resistências de aderência no ensaio de arrancamento. Pelo contrário, no ensaio de cisalhamento oblíquo, a melhor aderência do material de reparo foi observada nos exemplares com substrato na condição seca. Por fim, afirma-se que a tríade formada pela fluidez do material de reparo, condição de umidade do substrato e rugosidade da superfície é considerada crítica para otimizar a performance da ligação em estruturas de concreto no campo. Entretanto, ainda não há consenso sobre as implicações do substrato nas condições seca ou saturada.

## **1.7) Conclusões da revisão bibliográfica**

### 1.7.1) Resumo comparativo

A tabela a seguir compara todos os ensaios de cisalhamento oblíquo revisados anteriormente:

Tabela 6 – Comparação dos estudos revisados

<b>Autor</b>	<b>país</b>	<b>norma</b>	<b>forma</b>	<b>dimensões (mm)</b>	<b>material reparo</b>	<b>melhores resultados</b>	<b>outros ensaios</b>
Climaco (1989)	Inglaterra	BS 6319 modificado	prisma	200/150x150x1000	argamassa de reparo com pontes cimentícia, SBR ou epóxi	corpos de prova com ponte de epóxi	nenhum
Julio et al. (2004)	Portugal	nenhuma	prisma	200x200x400	concreto de recuperação	espécimes tratados com epóxi e jato de areia	arrancamento
Doria et al. (2005)	Brasil	nenhuma	prisma	100x100x300	concreto auto adensável com 12,5% de sílica ativa	corpos de prova com ponte de epóxi	tração indireta, cisalhamento vertical
Momayez et al. (2005)	Irã	nenhuma	prisma	100x100x300	4 compósitos c/ 0%, 5%, 7% e 10% de sílica ativa, 2 argamassas c/ polímero e SBR	argamassa cimentícia com 20% de SBR	arrancamento, tração indireta, bi-superfície
Saldanha et al. (2012)	Portugal	BS EN 12615 modificada	prisma	150x150x430	concretos com ou sem armaduras	espécimes com armadura e ângulo de 60°	<i>push off</i>
Tayeh et al. (2013)	Malásia	ASTM C882 modificada	prisma	100x100x300	concreto de ultra alto desempenho, com sílica ativa e microfibras de aço	espécimes tratados com jato de areia	tração por compressão diametral
Sahmaran et al. (2014)	Turquia	ASTM C882 modificada	cilindro	100x200	3 compósitos, 2 com fibras de PVA e escória ou cinza, e um com microsilica	compósito com fibras PVA e escória alto forno	tração indireta
Mirmoghtadaei et al. (2015)	Irã	ASTM C882	cilindro	75x150	argamassas com teores de 0%, 10% e 15% de metacaulim	argamassa com 10% de metacaulim	nenhum
Ahmed et al. (2016)	Egito	BS EN 12615	prisma	100x100x400	diversos traços de concreto auto adensável, alguns com 0,1% e 0,2% de fibras de polipropileno	concreto com 0,2% de fibra	nenhum
		ASTM C881	cilindro	150x300			
		ASTM C882	cilindro	75x150			
		nenhuma	prisma	200x200x500			
Bentz et al. (2018)	EUA	ASTM C882	cilindro	75x150	2 argamassas comerciais, com fibras e cimentícia	argamassa com fibra	arrancamento

Apesar da literatura técnica referir que há consenso sobre a boa representatividade das tensões que atuam numa junta entre dois materiais cimentícios oferecida pelo método do *slant shear test*, diversos autores propõem modificações não só neste método como também em outros, indicando que ainda há a necessidade de realizar muitas outras pesquisas sobre a busca de um método ideal para a avaliação da resistência de aderência da interface.

De modo geral, os autores estudados concluíram que:

- quanto maior a rugosidade da interface, maior a resistência de aderência;
- a rugosidade obtida com ranhuras é eficiente;
- a adição de fibras e um material de reparo de alto desempenho melhoram a resistência de aderência;
- um adesivo à base de resina epóxi ou látex melhora a resistência de aderência;
- ainda não há consenso quanto às condições de umidade da superfície de ligação.

Quanto ao modo de ruptura Momayez et al. (2005), Tayeh et al. (2003), Saldanha et al. (2012), bem como a EN 12615 (1999) referem que quando um prisma composto de concreto com uma junta diagonal é submetido à compressão axial, o estado de tensões na ruptura depende da eficiência da junta e da resistência à compressão dos materiais envolvidos. Assim, o valor da resistência de aderência é caracterizado pela ruptura da ligação. Quando a ruptura ocorrer no concreto ou no material de reparo, isto significa que estes materiais são menos resistentes que a ligação e, portanto, a resistência de aderência não é determinada. Esta definição contradiz o preconizado pela EN 12615 (1999), que refere que o ensaio deve provocar uma ruptura pelo concreto



## **2) PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL**

Atualmente, no mercado da construção civil, são oferecidas inúmeras opções de materiais para reparo, recuperação e reforço das estruturas de concreto. Porém, ainda não existe todo um conjunto de normas específicas para fabricação e aplicação destes novos materiais de reparo, o que muitas vezes leva a utilização destes produtos sem o conhecimento adequado de suas propriedades químicas e mecânicas, principalmente no que se refere à capacidade de aderência.

Este capítulo descreve o rol de materiais utilizados neste trabalho, bem como os detalhes dos ensaios executados.

Todos os testes foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UERJ. A parte experimental deste trabalho teve início em maio de 2018 e se estendeu até dezembro do mesmo ano. Para alguns materiais, os ensaios de caracterização já haviam sido realizados anteriormente por Teixeira (2018), para o mesmo lote e especificações, dentro da referida instalação.

### **2.1) Materiais e métodos**

Com a pesquisa sobre ensaios de cisalhamento oblíquo em trabalhos internacionais e nacionais, observou-se que poucos seguem os modelos da norma BS EN 12615:1999. A maior parte dos estudos analisados propuseram ensaios modificados, alterando as dimensões dos corpos de prova ou o ângulo da interface. Desta forma, um dos primeiros objetivos que este trabalho se propôs foi seguir os modelos da referida norma britânica.

Por outro lado, nos últimos anos, a oferta de materiais industrializados para recuperação de estruturas aumentou significativamente. Então, foi planejado empregar alguns tipos de argamassas industrializadas específicas para reparo de estruturas, tanto cimentícias como poliméricas.

Como apontado por Momayez (2005) e Mehta e Monteiro (2006), em comparação aos materiais de reparo poliméricos, os compósitos cimentícios apresentam melhor custo-benefício. Assim, foi programado utilizar diferentes traços de compósitos reforçados com fibras.

Também planejou-se comparar os resultados obtidos em laboratório, com a realização do ensaio de cisalhamento oblíquo (*slant shear test*) e correlacionar com os resultados obtidos nas amostras testadas por arrancamento de pastilha (*pull off test*), pois é um ensaio simples e bastante empregado em inspeções de campo.

## **2.2) Caracterização dos materiais**

### 2.2.1) Concreto

Para representar o substrato de uma estrutura existente, foi dosado um mesmo traço de concreto convencional para as bases de todos os corpos de prova de ambos ensaios.

#### 2.2.1.1) Cimento

O cimento utilizado para a produção do concreto convencional foi do tipo CP II E 32 – cimento Portland composto com escória de alto forno, do fabricante Holcim. O cimento tem massa específica igual a 3,1 g/cm<sup>3</sup>.

#### 2.2.1.2) Agregado graúdo

Como agregado graúdo, foi usada brita 0 com diâmetro máximo de 19 mm, massa específica de 2,73 g/cm<sup>3</sup>, acondicionada em sacos de 20 kg, obtida em lojas locais de materiais de construção. As análises granulométricas deste material encontram-se no Anexo I e foram realizadas no mesmo laboratório (LEC-UERJ), de acordo com as recomendações da NBR NM 248:2003.

#### 2.2.1.3) Agregado miúdo

Utilizou-se areia média lavada com módulo de finura igual a 2,58, também comercializada em sacos de 20 kg e obtida no comércio local. Os resultados dos ensaios de caracterização encontram-se no Anexo II, conforme instruções da NBR NM 248 (2003).

#### 2.2.1.4) Água

Foi usada a água provida pela rede pública de abastecimento do município do Rio de Janeiro.

#### 2.2.1.5) Traço do concreto

O concreto (ver Tabela 7 e Anexo III) foi produzido em sala climatizada ( $21 \pm 1^\circ\text{C}$ ), no laboratório da UERJ. Os materiais foram dosados com balança de precisão com capacidade máxima de 1000 kg, e a mistura foi feita com uso de betoneira fixa, com capacidade de 100 litros.

Para evitar desvios no fator água/cimento, as formas de madeira foram previamente molhadas, mas tomou-se o cuidado de não haver acúmulo de água superficial. Para facilitar a desforma, foi aplicado óleo desmoldante nas formas metálicas e de madeira.

Tabela 7 – Quantitativo dos materiais utilizados na fabricação do concreto

<b>material</b>	<b>traço unitário</b>	<b>Consumo (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>cimento</b>	1	472,07
<b>agregado miúdo</b>	1,510	712,87
<b>agregado graúdo</b>	1,710	807,28
<b>água</b>	0,419	197,93

Após a mistura, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) para verificar a trabalhabilidade das misturas. Este é o ensaio mais utilizado na produção do concreto e deve ser realizado de acordo com a NBR 7223 (2003). Também foi realizado ensaio de massa específica pela medida da massa fresca e volume, utilizando-se um recipiente metálico de 8l. Em seguida, foram moldados os corpos de prova. O adensamento das misturas no estado fresco foi realizado manualmente, com a ajuda de uma haste metálica. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h e transferidos para câmara úmida com umidade relativa de 100% e temperatura de  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , onde foram mantidos até a idade de realização dos ensaios.

### 2.2.2) Argamassas comerciais

Como materiais de reparo, foram testadas quatro argamassas industrializadas específicas, de dois fabricantes diferentes. Todas as argamassas ensaiadas eram prontas para uso, somente se adicionou água de acordo com as fichas técnicas, que constam no Anexo IX.

#### 2.2.2.1) Sikagrout TIX

Argamassa cimentícia, tixotrópica, monocomponente, específica para reparos estruturais. Composta basicamente de cimento Portland, areia de quartzo e aditivos especiais, fabricada pela Sika.

#### 2.2.2.2) Monotop 622

Argamassa cimentícia, polimérica, com fibras sintéticas, monocomponente e tixotrópica, também produzida pela Sika. Composta de cimento, areia, fibras sintéticas e resina sintética.

#### 2.2.2.3) Zentrifix CR

Argamassa polimérica cimentícia para reparos estruturais com agente adesivo integrado e inibidor de corrosão. Tixotrópica, monocomponente, composta por fibras sintéticas e aditivos especiais. Fabricada no Brasil pela MC-Bauchemie.

#### 2.2.2.4) Zentrifix TIX

Argamassa polimérica, monocomponente, para reparos em concreto. Pode ser aplicada de forma manual ou projetada. Do fabricante MC-Bauchemie Brasil.

### 2.2.3) Argamassas fabricadas em laboratório

Para avaliar o comportamento e potencial como materiais de reparo, foram produzidos três traços de compósitos cimentícios com adição de cinza volante e

fibras de PVA. Além dos compósitos foi produzida também uma argamassa de referência sem fibras (matriz do compósito) para comparação.

#### 2.2.3.1) Cimento

Foi usado o mesmo tipo de cimento utilizado na fabricação do concreto para a fabricação dos compósitos, o CP II E 32 – cimento Portland composto com escória de alto forno, do fabricante Holcim.

#### 2.2.3.2) Areia

A areia empregada foi de igual proveniência, porém, só foi usada a parcela passante na peneira de 600  $\mu\text{m}$ .

#### 2.2.3.3) Cinza volante

A cinza volante foi usada na condição como recebida, diretamente do sistema de coleta de cinzas de uma usina termoeletrica no sul do Brasil. Possui massa específica de 2,26  $\text{g}/\text{cm}^3$  e índice de finura de 35,91%, sendo classificada como tipo C, de acordo com a NBR 12653. As características granulométricas estão no Anexo IV. A Figura 51 mostra imagem com ampliação de 800 vezes da cinza utilizada, onde se vê as pequenas partículas redondas e de textura relativamente suave.

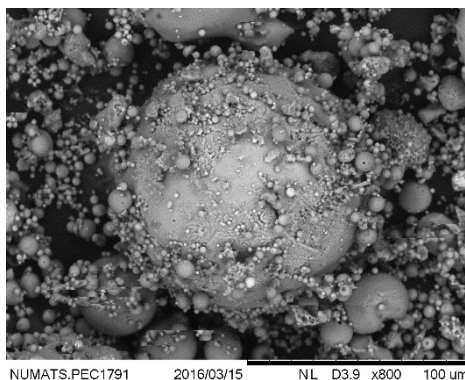


Figura 51 – imagem da cinza ampliada em 800 vezes

#### 2.2.3.4) Fibras

Neste estudo, foram utilizadas fibras de polyvinyl alcohol - PVA (REC 15) de 12 mm de comprimento e PVA (RECS 15) de 8 mm de comprimento, fabricadas e fornecidas pela Kuraray Co, no Japão, cujas características, como fornecidas pelo fabricante, estão listadas abaixo.

Tabela 8 – Propriedades das fibras de PVA.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Comprimentos (mm)	12 e 8 mm
Diâmetro (mm)	0,040
Resistência à Tração (MPa)	1600
Módulo de Elasticidade (GPa)	40,00
Alongamento (%)	7,00
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,30

Fonte: Dados do fabricante.

#### 2.2.3.5) Traços e produção das argamassas

A matriz cimentícia (denominada de S/F) era composta de cimento, cinza volante, areia fina, água e aditivo superplastificante, nas proporções vistas na Tabela 9. Além da argamassa sem fibras (S/F), foram especificados três tipos de compósitos. Um compósito com 2% de fibras de PVA de 12 mm de comprimento (denominado 2% 12mm), utilizado e caracterizado por Magalhães (2010), e dois outros compósitos com fibras de 8 mm de comprimento, com 1% (1% 8mm) e 2% (2% 8mm) de fibras de PVA.

Empregou-se a mesma matriz para todos os traços (Tabela 9), logo, somente os teores e comprimentos de fibras foram variáveis.

Tabela 9 – Traços dos compósitos

	<b>S/F</b>	<b>2% 12mm</b>	<b>2% 8mm</b>	<b>1% 8mm</b>
<b>Cimento – C (kg/m<sup>3</sup>)</b>	505	505	505	505
<b>Cinza volante – CV (kg/m<sup>3</sup>)</b>	606	606	606	606

<b>Areia (kg/m<sup>3</sup>)</b>	404	404	404	404
<b>Água (kg/m<sup>3</sup>)</b>	404	404	404	404
<b>SP/(C+CV)</b>		0,001	0,001	
<b>Fibra (12 mm)</b>		26		
<b>Fibra (8 mm)</b>			26	13

As argamassas foram moldadas em sala climatizada ( $21 \pm 1^\circ\text{C}$ ) utilizando-se uma argamassadeira com capacidade para 20 litros. As argamassas industrializadas foram produzidas pela mistura do material seco com a água, no teor estimado no manual do fabricante. A mistura dos compósitos foi realizada seguindo a sequência abaixo:

- Colocação de todos os ingredientes sólidos da matriz (cimento, areia e cinza volante) e homogeneização durante 3 minutos;
- Adição da água e superplastificante e mistura por mais 2 minutos (tempo necessário para efeito total do aditivo utilizado);
- Adição da fibra de forma lentamente, para evitar que elas formem grumos na mistura, o que pode ocasionar uma dispersão não homogênea das fibras na matriz. Até esta fase utilizou-se uma velocidade média (velocidade 2) de rotação da pá da argamassadeira;
- Após adição das fibras, aumentou-se a velocidade da argamassadeira para a velocidade 3 (máxima) e misturou-se por mais 2 minutos para uma melhor distribuição das fibras na mistura. Em seguida, reduziu-se a velocidade de rotação para a anteriormente utilizada (velocidade 2) e misturou-se por mais 1 min.

Após a mistura, foram realizados ensaios de consistência segundo a NBR 13276 (2005) e massa específica. O ensaio de massa específica foi realizado pela medida da massa fresca e volume, utilizando-se um recipiente metálico de 400 ml. Em seguida, foram moldados os corpos de prova. O adensamento das misturas no estado fresco foi realizado manualmente, com a ajuda de um tubo metálico de adensamento. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h e transferidos para câmara úmida com umidade relativa de 100% e temperatura de  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , onde foram mantidos até a idade de realização dos ensaios.

#### 2.2.4) Ensaios de caracterização do concreto e argamassas de reparo

Foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral. Para o ensaio de compressão foram utilizados três corpos de prova cilíndricos com 100mm de diâmetro e 200 mm de altura para o concreto e 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para as argamassas. Antes dos ensaios os corpos de prova cilíndricos foram nivelados utilizando-se a técnica de faceamento, tendo em vista que as superfícies irregulares e não planas dos topos dos corpos de prova causam problemas como transmissão não uniforme da tensão de compressão, causando ruptura prematura das amostras.

Os ensaios de compressão foram realizados na prensa hidráulica de 1000 KN da marca Losenhausenwerk – LOS. Os deslocamentos axiais foram medidos por dois relógios comparadores, posicionados na região central da amostra.

### **2.3) Ensaio de cisalhamento oblíquo (*slant shear test*)**

O ensaio de cisalhamento oblíquo é um método usado extensivamente porque é um método simples de montar e executar, apresenta menos problemas e deficiências, tem uma grande variedade de aplicações, não é dispendioso e oferece boa confiabilidade de resultados (Sahmaran et al, 2014).

No programa experimental desenvolvido, os testes de cisalhamento oblíquo foram conduzidos de acordo com a norma britânica BS EN 12615:1999. Esta norma europeia descreve um método para determinar a resistência de aderência entre dois substratos de concreto. O ensaio pode ser usado para medir a resistência de aderência em dois tipos de situações: na união entre concretos endurecidos ou na aplicação de um concreto fresco em um substrato existente.

Este trabalho considerou a segunda opção, ou seja, primeiramente foram moldadas as partes que representam o substrato existente, usando o mesmo traço de concreto convencional. Depois disso, foram aplicados diversos tipos de materiais de reparo – quatro argamassas comerciais específicas, uma argamassa e três compósitos cimentícios reforçados com fibras.



### 2.3.1) Corpos de prova

Durante este trabalho, foi produzido um total de 24 corpos de provas prismáticos com dimensões de 100 mm x 100 mm x 400 mm (largura x profundidade x altura), sendo 3 unidades para cada tipo de material de reparo (Figura 52).

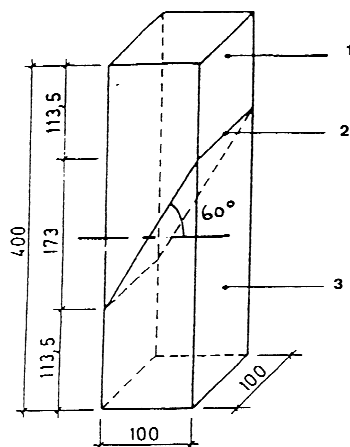


Figura 52 – esquema do corpo de prova prismático ensaiado

Os espécimes foram nomeados da seguinte maneira:

Tipo “A”: argamassas comerciais específicas para reparos estruturais

SK TIX – argamassa cimentícia Sikagrout TIX (Sika)

SK 622 – argamassa polimérica Sika Monotop 622 (Sika)

MC Z CR – argamassa polimérica Zentrifix CR (MC Bauchemie)

MC Z TIX – argamassa cimentícia Zentrifix TIX (MC Bauchemie)

Tipo “B”: compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno

S/ F – compósito sem adição de fibras

2% 12mm – compósito com 2% de fibras de 12 mm de comprimento

2% 8mm – compósito com 2% de fibras de 8 mm de comprimento

1% 8mm – compósito com 1% de fibras de 8 mm de comprimento



Figura 53 – corpos de provas moldados

### 2.3.2) Formas

As formas foram fabricadas em compensado naval conforme a Figura 55 a seguir, seguindo os esquemas da norma, porém com algumas alterações construtivas de forma a otimizar a execução. Desta forma, foram confeccionados 20 caixotes individuais, todos fixado por parafusos. A divisão da interface inclinada foi feita com a mesma madeira e espessura (Figura 54). Quando foi realizada a moldagem das argamassas de reparo sobre as bases de concreto, esta divisória foi retirada e a diferença de altura equivalente foi compensada com o uso de placas de isopor (Figura 55).



Figura 54 – formas de compensado naval utilizadas



Figura 55 – detalhe das formas na segunda etapa

### 2.3.3) Método de cura

Foram realizadas três concretagens, a primeira para todas as bases de concreto convencional, a segunda para as argamassas comerciais e a última para os compósitos. Os corpos de prova foram desmoldados no dia seguinte, e colocados em câmara úmida por 77 dias. Após a cura, na segunda etapa foram aplicados os materiais de reparo, e depois de 28 dias, os corpos de prova completos foram ensaiados (Figuras 56 e 57).



Figura 56 – corpos de prova durante a cura



Figura 57 – corpos de prova completos

### 2.3.4) Preparo da superfície da interface

Grande parte dos trabalhos internacionais faz uso do jato de areia para conferir rugosidade para a superfície do substrato de concreto. No Brasil, o trabalho

de jateamento que utilize areia seca ou úmida como abrasivo é proibido desde 2004, conforme Portaria n.º 99, de 19 de outubro de 2004.

Trabalhos mais recentes fazem uso de ferramentas mecânicas para imprimir sulcos ou ranhuras na superfície da interface, como visto em Ahmed et al (2017), Mirmoghtadaei et al (2015) e Tayeh et al (2003).

Além disso, atualmente no cotidiano dos canteiros de obras, atividades como apicoamento manual tem caído em desuso, devido à baixa produtividade e dependência das habilidades dos profissionais.

Desta forma, para o preparo da superfície optou-se pela execução de ranhuras aleatórias na superfície, como visto na Figura 58. Para isto, foi utilizada serra mármore 4 3/8", com 1450 W de potência, da marca Makita. Os sulcos tinham 5 mm de espessura e de 3 a 5 mm de profundidade. O procedimento foi realizado quando o concreto das bases tinha 73 dias de idade.



Figura 58 – Detalhe da superfície da interface

#### 2.3.5) Condição de umidade da superfície

No momento da aplicação das argamassas ou compósitos de reparo, as interfaces de todos os corpos de prova foram mantidas na condição saturada seca, pois os espécimes foram retirados da cura 48 horas antes e imersos novamente cerca de 30 minutos antes da aplicação dos materiais. Antes de serem dispostos para drenar a água superficial, cada peça foi cuidadosamente lavada, de forma a retirar poeiras ou sujeiras acumuladas na câmara úmida (Figura 59).



Figura 59 – Condição de umidade da interface

### 2.3.6) Outras considerações

Não foram utilizados quaisquer agentes de ligação, como resina epóxi ou argamassas como ponte de aderência. Não foram moldados corpos de prova de controle, como previsto pela BS EN 12615:1999. Para a resistência a compressão do substrato, foram utilizados os resultados dos ensaios de caracterização do concreto, de acordo com a ABNT NBR 5739:2007.

Metade dos 24 corpos de prova prismáticos foram nivelados antes de serem submetidos a compressão, de forma a garantir uma distribuição uniforme do carregamento. Para isto, foi feito capeamento com pasta de cimento CPV de alta resistência inicial, como mostra a Figura 60.



Figura 60 – capeamento dos prismas



O ensaio de cisalhamento oblíquo foi realizado quando o concreto da base, argamassas e compósitos de material de reparo tinham idades de 105 e 28 dias, respectivamente. Os prismas compostos foram submetidos a compressão simples em prensa hidráulica da marca Losenhausenwerk – LOS com capacidade de 300 tf. As fotos de todos os corpos de prova testados constam no Anexo VII (Figura 61).



Figura 61 – detalhes do ensaio de cisalhamento oblíquo

#### 2.4) Ensaio de arrancamento (*pull off*)

Outro ensaio realizado foi o de arrancamento de pastilhas, por ser um teste de execução prática e muito utilizado em campo. O ensaio também foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UERJ, seguindo as recomendações da norma europeia EN 1542:1999.

### 2.4.1) Peças ensaiadas

Para o ensaio de arrancamento, foram moldadas duas placas medindo 600 mm x 600 mm x 80 mm (comprimento x largura x altura). Para moldagem foram utilizadas formas metálicas com dimensões de 600 x 600 x 100 mm (comprimento x largura x altura), como se vê na Figura 62. Para compensar a espessura da camada de material de reparo e garantir o nivelamento, foram usadas placas de isopor com 20 mm de espessura.



Figura 62 – corpos de prova preparados para o ensaio de arrancamento

### 2.4.2) Métodos de cura, preparo e condicionamento

O preparo das peças também ocorreu em duas etapas, durante as mesmas três concretagens para o ensaio de cisalhamento oblíquo. Na primeira fase, as placas foram moldadas com concreto convencional com 8 cm de espessura. Após 73 dias de cura em câmara úmida, as placas passaram pelo mesmo preparo de superfície.

Na segunda etapa, foram delimitadas 4 faixas de 15 cm de largura para cada material de reparo (Figura 63). Então, foram aplicadas as quatro argamassas comerciais em uma placa e a argamassa produzida no laboratório junto com os três compósitos reforçados com fibras na outra placa. Todas as camadas dos materiais

de reparo tinham a mesma espessura de 2 centímetros. As placas foram molhadas 30 minutos antes do lançamento dos materiais.

Após as concretagens das argamassas e compósitos, não foi possível levar as placas à câmara úmida, devido ao elevado peso em conjunto com as formas metálicas. Assim, a cura ocorreu em ambiente climatizado e a superfície das placas foi frequentemente molhada até formação de lâmina d'água.



Figura 63 – placas com faixas de argamassas e compósitos

#### 2.4.3) Preparo da superfície

A rugosidade conferida às placas foi obtida pelo mesmo método empregado para os espécimes do ensaio de cisalhamento oblíquo, pela execução de ranhuras na superfície, como visto na Figura. Para isto, foi utilizada serra mármore 4 3/8", com 1450 W de potência, da marca Makita. Os sulcos tinham 5 mm de espessura e de 3 a 5 mm de profundidade. O preparo da superfície ocorreu quando o concreto da camada de substrato tinha idade de 73 dias (Figura 64).





Figura 64 – detalhe da rugosidade da superfície

#### 2.4.4) Detalhes do teste

O ensaio de arrancamento foi realizado quando o concreto convencional do substrato tinha 115 dias de idade, e as argamassas e compósitos tinham idades de 38 e 36 dias, respectivamente.

Oito dias antes do ensaio de arrancamento, foram executadas semi-carotagens nas placas, com os espaçamentos previstos na norma EN 1542:1999. Para isto, empregou-se um equipamento de extração de testemunhos de concreto (Figura 65), que serrou circularmente até a profundidade de 3 cm, ultrapassando 1 cm da espessura da camada de argamassa (Figura 67). Os cortes realizados tinham 50 mm de diâmetro e espaçamentos de 5 cm entre eles.

Como as placas foram molhadas durante as carotagens (Figura 66), a colagem das pastilhas ocorreu 5 dias após o procedimento. As pastilhas utilizadas eram de alumínio, tinham 48 mm de diâmetro e foram coladas com a resina epóxi Sikadur 32, do fabricante Sika. A fixação das pastilhas foi feita 3 dias antes do ensaio, para permitir a cura do adesivo (Figura 68).



Figura 65 – Execução das semicarotagens

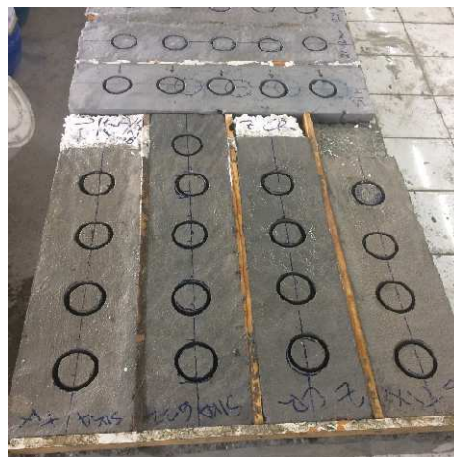


Figura 66 – placas com os cortes parciais



Figura 67 – Detalhe da profundidade do corte



Figura 68 – Detalhe da colagem da pastilha

Para este teste, foi utilizado o equipamento manual do fabricante Proceq, modelo Dyna pull off tester Z16 (Figura 69). Na parte superior das pastilhas, havia um furo onde rosqueou-se um pino. Em seguida, o aparelho foi posicionado, e a parte inferior do eixo foi acoplada ao pino preso na pastilha (Figura 70). Então, o carregamento de tração era aplicado ao girar a manivela do aparelho, até que a pastilha se destacasse, como mostra a Figura 71.



Figura 69 – Equipamento utilizado



Figura 70 – Detalhe do acoplamento



Figura 71 – Detalhe da amostra após o arracamento



Figura 72 – Visão geral após o ensaio

Em algumas amostras, a pastilha descolou quase que imediatamente. Isto pode ser sido causado por quebra durante o corte ou por falha pontual na aplicação do material de reparo. Nestes casos, as amostras foram descartadas e o valor obtido não foi considerado. Todas as fotos das amostras constam no Anexo VIII (Figura 72).

### 3) ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do concreto e argamassa de reparo e dos ensaios de cisalhamento oblíquo e arrancamento no conjunto. Os valores obtidos são comparados com alguns parâmetros das normas aplicáveis.

Para condensar a apresentação dos dados em tabelas e figuras, os materiais de reparo ensaiados são abreviados da seguinte maneira:

- a) argamassas comerciais específicas para reparos estruturais
  - argamassa cimentícia Sikagrout TIX (Sika): “SK TIX”
  - argamassa polimérica Sika Monotop 622 (Sika): “SK 622”
  - argamassa polimérica Zentrifix CR (MC Bauchemie): “MC Z CR”
  - argamassa cimentícia Zentrifix TIX (MC Bauchemie): “MC Z TIX”
- b) compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA
  - argamassa sem adição de fibras: “S/ F”
  - compósito com 2% de fibras de 12 mm de comprimento: “2% 12mm”
  - compósito com 2% de fibras de 8 mm de comprimento: “2% 8mm”
  - compósito com 1% de fibras de 8 mm de comprimento: “1% 8mm”

#### 3.1) Apresentação dos resultados

##### 3.1.1) Caracterização do concreto e argamassas de reparo

Os valores médios e respectivos desvios padrões (DP) obtidos dos ensaios de consistência, massa específica ( $\rho$ ) no estado fresco, resistência à compressão ( $f_c$ ), módulo de elasticidade (E) e resistência à tração ( $f_t$ ) do concreto de base e das diferentes argamassas de reparo são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – resultados dos ensaios de caracterização

	Consistência / abatimento (mm)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	DP	E (GPa)	DP
Concreto	215	2303,13	37,77	1,29	32,61	1,56
SK TIX	212	2278,00	39,03	10,19	29,77	3,27
SK 622	200	2181,00	42,58	11,84	25,67	2,95
MC Z CR	198	2156,25	70,04	6,23	35,62	5,67
MC Z TIX	265	2161,00	48,53	2,35	32,35	1,42
ARG S/F	344	1865,00	39,49	3,57	19,25	1,39
2% 12mm	237	1792,75	37,00	0,57	19,00	0,40
2% 8mm	256	1836,25	33,31	1,87	18,18	1,25
1% 8mm	375	1887,50	36,33	2,65	18,51	2,23

### 3.1.2) Ensaio de cisalhamento oblíquo

Os corpos de prova prismáticos, compostos por partes de concreto convencional e materiais de reparo, unidas em um ângulo de 60° com a horizontal e sem ponte de aderência, foram submetidos à compressão simples. As médias das cargas de ruptura  $F$  em N e da resistência de aderência  $f_b$  em N/mm<sup>2</sup> (Mpa) estão na Tabela 11. O valor de  $f_b$  foi calculado de acordo com norma EN BS 12615:1999 para 3 corpos de prova de cada mistura. Os valores obtidos para espécime ensaiado estão no Anexo VII.

Tabela 11 – resultados do ensaio de cisalhamento oblíquo

<b>material</b>	<b>F (N)</b>	<b><math>f_b</math> (MPa)</b>
<b>SK TIX</b>	284833	11,82
<b>SK 622</b>	262667	10,83
<b>MC Z CR</b>	375167	15,45
<b>MC Z TIX</b>	255500	11,98
<b>S/ F</b>	161167	7,95
<b>2% 12mm</b>	157000	6,67
<b>2% 8mm</b>	120000	5,55
<b>1% 8mm</b>	115683	5,05



### 3.1.2.1) Resistências de aderência

Os gráficos a seguir mostram os valores médios das resistências de aderência obtidas. Considerando os resultados para os reparos realizados com argamassas industrializadas, tem-se o gráfico da Figura 73:

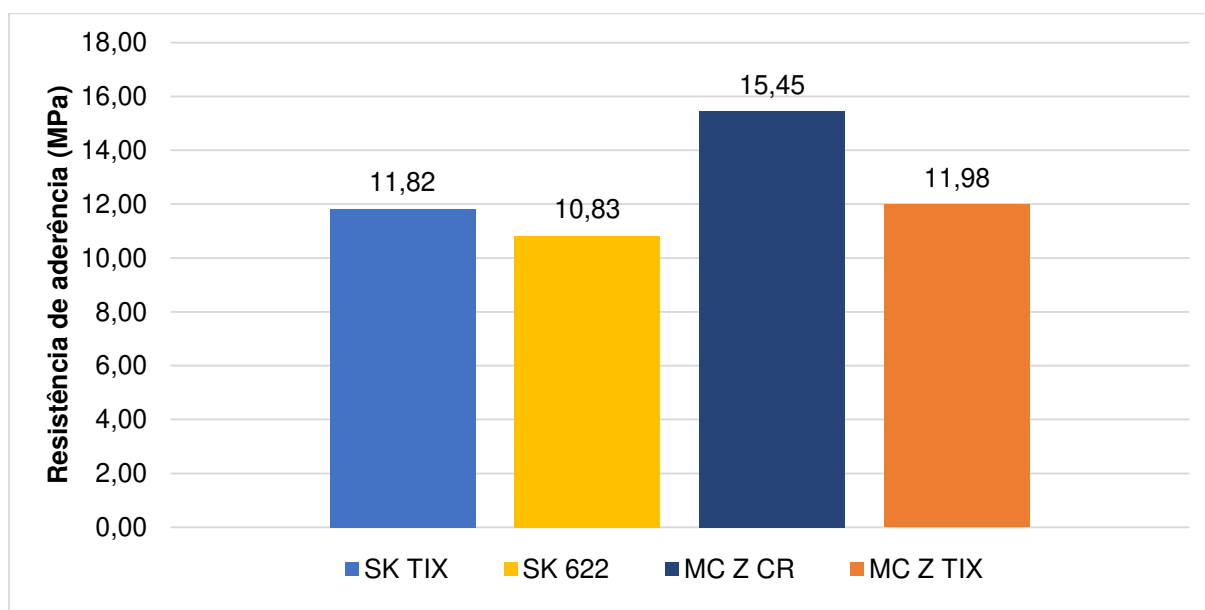


Figura 73 – resistências de aderência para as argamassas comerciais

Dentre todos os materiais testados, a maior resistência de aderência igual a 15,45 MPa foi obtida com a aplicação da argamassa polimérica Zentrifix CR, fabricada pela MC Bauchemie. Para as outras argamassas industrializadas, os valores de aderência foram 11,98 MPa, 11,82 MPa e 10,83 MPa, respectivamente 22%, 23% e 3% menores em relação ao valor máximo.

Já para os compósitos reforçados com fibras de PVA, produzidos no laboratório LEC-UERJ, os resultados atingidos são apresentados no gráfico da Figura 74:

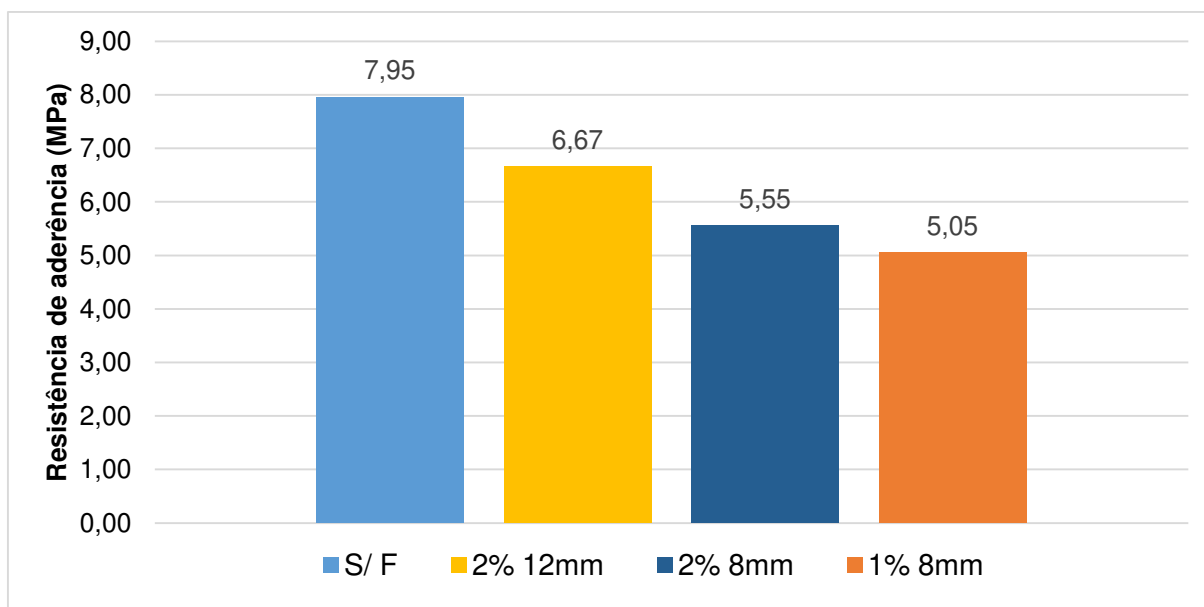


Figura 74 – resistências de aderência para os compósitos

Analisando os valores das resistências de aderência resultantes do emprego de compósitos como materiais de reparo, pode-se ver que foram muito menores se comparados com os resultados das argamassas comerciais. O valor máximo da resistência de aderência para as argamassas de laboratório foi de 7,95 MPa, para a argamassa sem adição de fibras. Com a adição de 2% de fibras de PVA com comprimento de 12mm, obteve-se uma resistência próxima ao valor máximo da matriz, igual a 6,67 MPa, 16% menor. Porém, para os compósitos com teores de 2% e 1% de fibras de 8mm, as resistências de aderência médias foram de 5,55 MPa e 5,05 MPa, respectivamente 30% e 36% menores que a da matriz. Se comparados a resistência máxima obtida neste estudo, de 15,45 MPa com a argamassa Zentrifix CR, os valores de aderência dos compósitos são 49%, 57%, 64% e 67% menores, da matriz sem fibras, 2% 12mm, 2% 8mm e 1% 8mm, respectivamente.

Todavia, as argamassas comerciais são constituídas pela inclusão de vários materiais cuidadosamente dosados e exaustivamente testados pelos fabricantes, o que as torna produtos específicos de alta qualidade.

### 3.1.2.2) Modos de ruptura

De acordo com a EN BS 12615:1999, os modos de ruptura podem ser divididos nos seguintes grupos:

- Tipo A: ruptura coesiva em qualquer um dos substratos de concreto;
- Tipo B: ruptura por adesão em uma das interfaces de concreto;
- Tipo C: ruptura coesiva do adesivo;
- Tipo D: ruptura por adesão em ambas as interfaces de concreto.

Entretanto, a principal adaptação feita nos ensaios realizados em relação à referida norma foi que as partes de concreto dos espécimes já foram moldadas no formato e ângulo finais. A norma EN BS 12615:1999 diz que os corpos de prova prismáticos devem ser moldados inteiros e cortados por serra diamantada no ângulo de 60° com a horizontal. Como também não foi utilizado qualquer tipo de adesivo como ponte de aderência neste trabalho, alguns tipos de ruptura segundo a norma não são pertinentes (C e D), e o tipo B passa a ser ruptura por aderência na interface.

Em seu estudo, Momayez et al (2003) caracterizaram os modos de ruptura pela localização da fratura. Dessa forma, classificou-se quando há ruptura na ligação, que ocorre ao longo da interface, ou quando há ruptura parcial no concreto ou no reparo. Por sua vez, o trabalho de Zanotti et al (2017) separa os modos de ruptura em cinco casos: quando ocorre ruptura na ligação, na ligação e há separação do substrato próximo a interface, na ligação com ruptura parcial do substrato, na ligação com ruptura parcial do reparo e na ligação com ruptura parcial em ambas partes de substrato e reparo.

Assim, após revisão da literatura e referências normativas, a classificação dos modos de ruptura foi dividida nos seguintes tipos:

- a) na ligação;
- b) na ligação com ruptura parcial no concreto;
- c) na ligação com ruptura parcial no reparo (argamassas ou compósitos);
- d) ruptura no substrato de concreto ou reparo

Os gráficos da Figura 75 mostram os resultados obtidos considerando os modos de ruptura dos espécimes no ensaio de cisalhamento oblíquo.



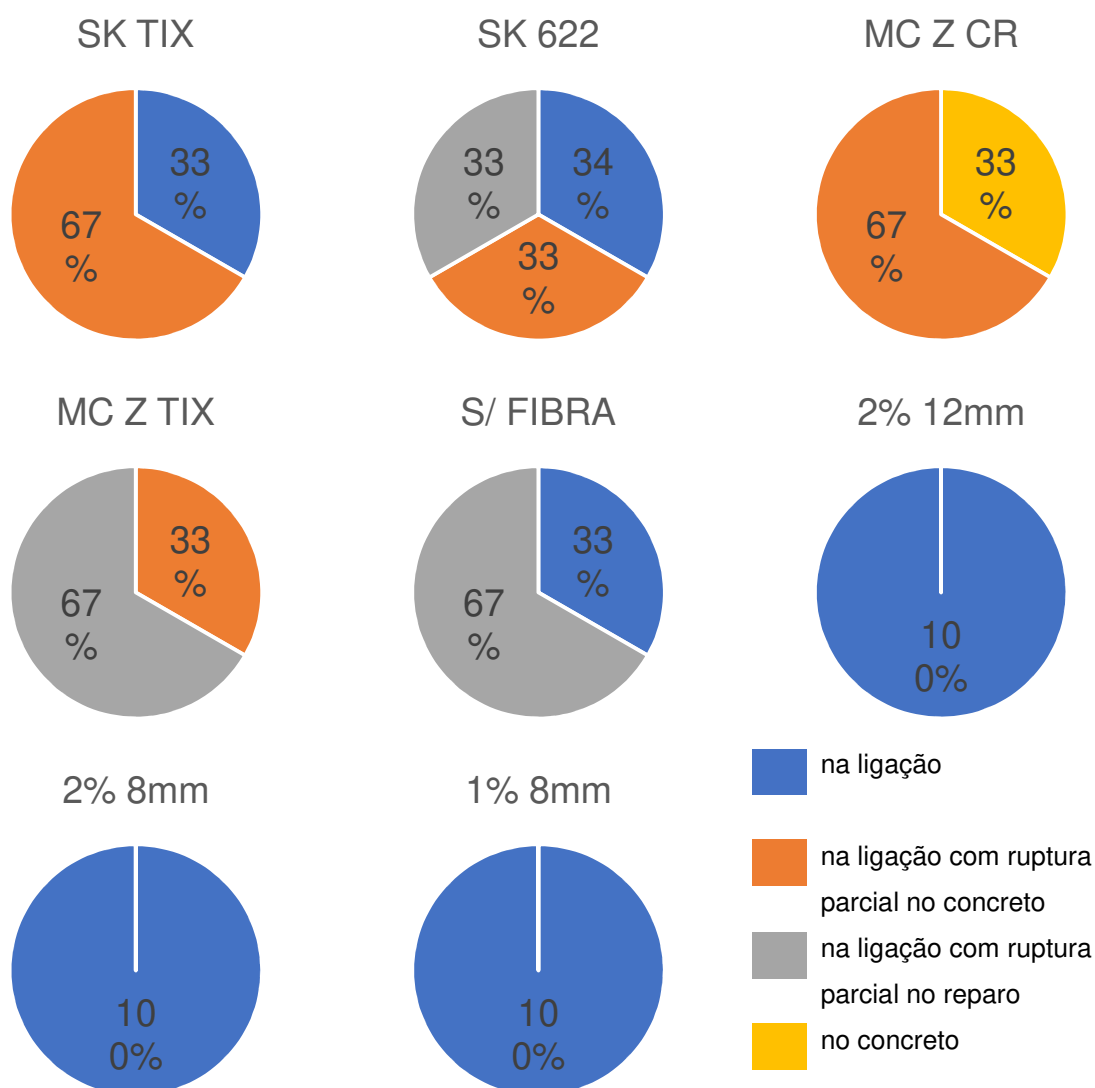


Figura 75 – modos de ruptura resultantes no ensaio de cisalhamento oblíquo

Dentro do total de 24 corpos de prova prismáticos ensaiados, 13 romperam apenas na ligação, sete na ligação com fissuração no concreto, seis na ligação com fissuração no reparo e um rompeu somente no substrato de concreto, deixando a ligação intacta. Considerando os espécimes onde foram aplicadas argamassas industrializadas, a ruptura ocorreu na ligação em 17% dos casos, 50% na ligação e concreto, 25% na ligação e reparo e 8% apenas no concreto. Já nos exemplares onde foram utilizadas as argamassas produzidas no laboratório como materiais de reparo, a ruptura ocorreu na ligação em 83% dos corpos de prova e em 17% houve ruptura na ligação com fissuração parcial no concreto. Nos compósitos com fibras, mesmo após a ruptura não houve separação entre substrato e reparo.

### 3.1.2) Ensaio de arrancamento

Outro ensaio realizado foi o de arrancamento de pastilhas, seguindo as recomendações da norma europeia EN 1542:1999. Os corpos de prova testados constituíam-se por placas compostas por uma camada de concreto convencional representando o substrato, e por outra camada com faixas para cada tipo de material de reparo. Em cada faixa de argamassa de reparo foram testados 6 exemplares. Os valores médios das cargas de ruptura (Fh) e das resistências de aderência (fh) constam na Tabela 12. Os resultados individuais estão no Anexo VIII.

Tabela 12 – resultados do ensaio de arrancamento

<b>material</b>	<b>Fh (N)</b>	<b>fh (MPa)</b>
<b>SK TIX</b>	1910	1,06
<b>SK 622</b>	1870	1,03
<b>MC Z CR</b>	1083	0,60
<b>MC Z TIX</b>	1207	0,67
<b>S/ F</b>	717	0,39
<b>2% 12mm</b>	373	0,23
<b>2% 8mm</b>	420	0,24
<b>1% 8mm</b>	1087	0,47

Para os reparos que empregaram argamassas industrializadas, no ensaio de arrancamento foram obtidos os resultados mostrados pelo gráfico da Figura 76:

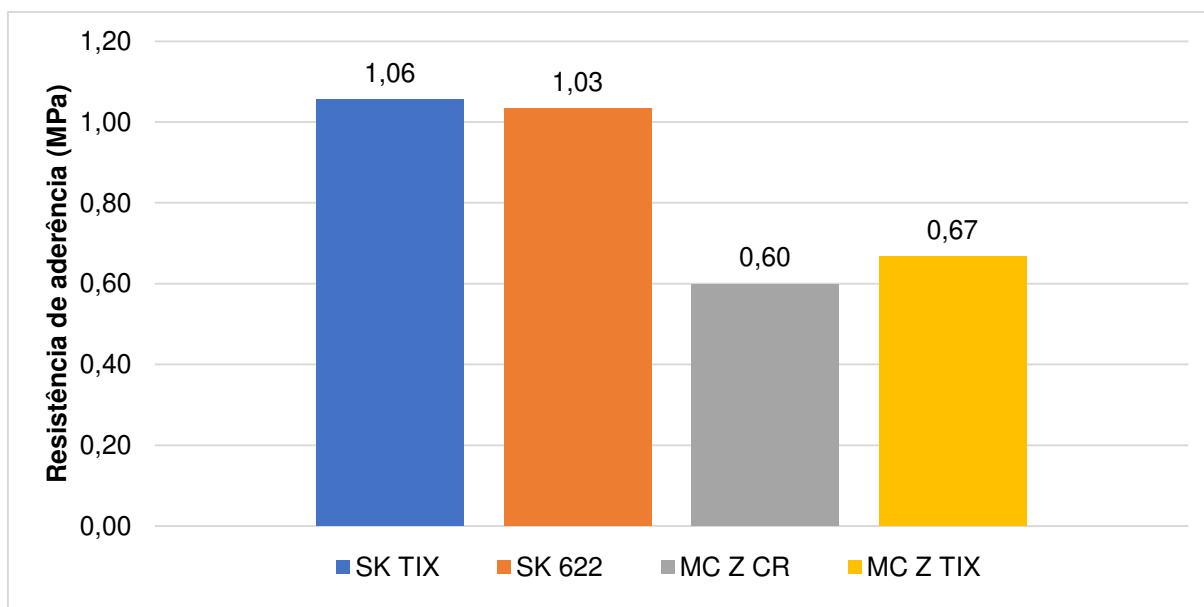


Figura 76 – resistências ao arrancamento das argamassas comerciais

Dentre todos os materiais testados, as maiores resistências de aderência foram obtidas com o uso das argamassas SikagROUT TIX e Zentrifix CR, de 1,06 MPa e 1,03 MPa. Para as outras argamassas industrializadas, os valores de aderência foram 0,60 MPa e 0,67 MPa, respectivamente 43% e 37% menores em relação aos maiores valores.

Para os compósitos reforçados com fibras de PVA, produzidos no laboratório LEC-UERJ, os resultados alcançados são apontados no gráfico da Figura 77:

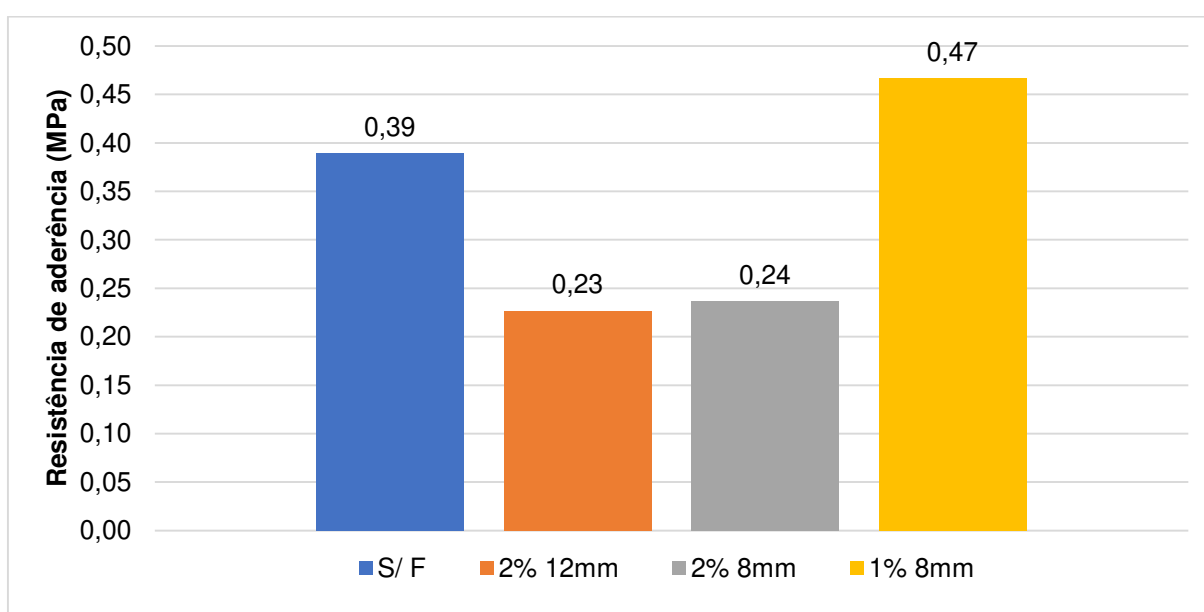


Figura 77 – resistências ao arrancamento dos compósitos

Ao observar os valores das resistências de aderência por arrancamento considerando compósitos como materiais de reparo, pode-se ver que foram nitidamente menores comparados com os resultados das argamassas industrializadas. O valor máximo da resistência de aderência para os compósitos foi de 0,47 MPa, para o traço com 1% de fibras de 8mm. A matriz sem fibras obteve uma resistência relativamente próxima ao valor máximo entre os compósitos, igual a 0,39 MPa, sendo 17% menor. Porém, para os compósitos com teores de 2% de fibras de 12 mm e 8mm, as resistências de aderência médias foram de 0,23 e 0,24 MPa, respectivamente 51% e 49% menores.

Considerando todos os resultados do ensaio de arrancamento, os valores das resistências de aderência da matriz sem fibras, 2% 12mm, 2% 8mm e 1% 8mm são, respectivamente, 63%, 79%, 78% e 56% menores que o valor, da resistência máxima obtida com a argamassa Sikagrout TIX.

Para analisar os modos de ruptura, como não houve fissuração de argamassa nem no substrato de concreto, foi avaliado se a ruptura foi adesiva ou coesiva. Em uma ruptura adesiva, ambas interfaces permanecem limpas, sem resquício de materiais. Já na ruptura considerada coesiva, existem fragmentos de materiais aderidos em alguma das interfaces.

Desta maneira, dentre todos os materiais de reparo, houve ruptura adesiva em 55% das amostras e coesiva em 45%. Considerando as argamassas industrializadas, a taxa foi de 33% de rupturas coesivas e 67% adesivas. Para os compósitos, a proporção foi praticamente a mesma, de 53% e 47% de rupturas coesivas e adesivas, respectivamente, com apenas uma amostra de diferença.

Como observação, cabe reportar que das 34 pastilhas arrancadas, foram descartados três valores, pois as pastilhas já estavam quebradas na ligação, devido ao processo de carotagem realizado anteriormente ao ensaio de arrancamento.

## **3.2) Discussão dos resultados**

### **3.2.1) Ensaio de cisalhamento oblíquo**

O guia para reparo em concreto do comitê do Instituto Americano de Concreto (*ACI Concrete Repair Guide*) especifica uma faixa de valores de resistência de aderência aceitáveis para resultados do ensaio de cisalhamento oblíquo. De acordo com Chynoweth (1996 apud Tayeh et al. 2013) e o ACI 546R (2004), a resistência de aderência de um material de reparo deve estar entre 13,8 MPa e 20,7 MPa, para o ensaio de cisalhamento oblíquo realizado na idade de 28 dias.

Também o guia para reparo em concreto (*Guide to concrete repair*) do Departamento de Interior dos EUA (2015) especifica que aos 28 dias o valor mínimo da resistência de aderência no ensaio de cisalhamento oblíquo deve ser de 2.000 psi, ou 13,8 MPa.

Porém, como foi abordado no item 1.4.1.2, esse parâmetro se aplica a norma americana ASTM C882, que emprega corpos de prova cilíndricos. Assim, a relação entre os valores de aderência por estes dois métodos é dada por:

$$\frac{fb, cilindro}{fb, prisma} = 2,53$$

Comparando esse valor com o ensaio realizado com prismas compostos, baseado na norma britânica, o valor de resistência de aderência deve ser maior que 5,45 MPa.

Dessa forma, dos resultados obtidos por este trabalho, somente dois compósitos não atenderam a este critério. No gráfico apresentado na Figura 78 a linha em vermelho representa o valor mínimo de resistência de aderência de 5,45 MPa, como discutido acima. No gráfico também se observa que ambos compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA de 8 mm de comprimento apresentaram um desempenho aquém do esperado.

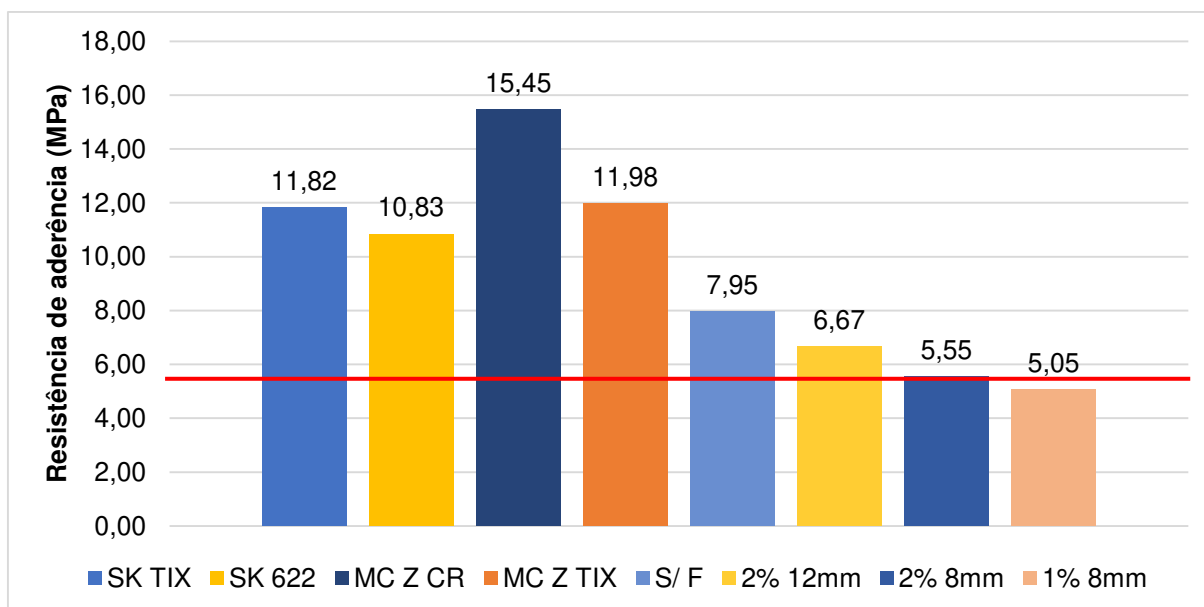


Figura 78 – análise da resistência de aderência  $f_b$

Após a revisão da literatura, constatou-se que dentre os principais fatores responsáveis por uma baixa resistência de aderência estão a condição de umidade e limpeza da superfície da interface, adensamento da camada de reparo, emprego ou não de ponte de aderência e, principalmente, a rugosidade da interface. Foi cogitado que a técnica de imprimir sulcos ou ranhuras não seria apropriada, porém, diversos estudos recentes fizeram uso da mesma e tiveram bons resultados.

Considerando os resultados quando o tipo de rugosidade da interface é por sulcos, Tayeh et al. (2013) obtiveram uma resistência de aderência média de 13,63 MPa, utilizando concreto de ultra alto desempenho. Ahmed et al. (2017) variaram a profundidade dos sulcos, e obtiveram maiores resistências quanto mais profundos, com valores médios de 11,7 MPa (sulcos de 3 mm) e 14,4 MPa (6mm), aos 28 dias. Já Mirmoghtadaei et al. (2015) alcançaram maiores resistências de aderência com a adição de metacaulim ao concreto do reparo, com valores médios de 13,6 MPa, 20,1 MPa e 18 MPa para teores de 0%, 10% e 15% de metacaulim, respectivamente. Então, para os exemplares com rugosidade por sulcos e sem adições, a resistência média obtida pelos últimos autores foi de 13,6 MPa.

Dessa forma, ao avaliar os valores obtidos neste programa experimental, em relação aos resultados das argamassas industrializadas, pode-se ver que os valores são próximos aos dos estudos citados, pois a média da resistência de aderência para todas as argamassas comerciais foi de 12,52 MPa.

Assim, considerando todas as argamassas e compósitos testados, a resistência média de aderência total foi de 9,41 MPa, maior que o mínimo aceitável de 5,45 MPa. Para as argamassas comerciais, o valor médio foi de 12,52 MPa, então pode-se avaliar que a aderência destes materiais foi muito boa.

### 3.2.2) Ensaio de arrancamento

De acordo com o critério da Organização Internacional de Normalização (ISO apud Bentz et al. 2018) o valor da resistência de aderência obtida pelo ensaio de arrancamento de pastilhas deve ser de no mínimo 1,5 N/mm<sup>2</sup>, ou MPa. Esse limite aplica-se ao ensaio de arrancamento realizado de acordo com a norma americana ASTM C1583.

De acordo com a NP EN 1504:2006 parte 3, Quadro 3, a resistência de aderência obtida pelo método da EN 1542 deve atender aos limites verificados na Tabela 13 abaixo.

Tabela 13 – Requisitos de desempenho de produtos de reparo (EN 1504-3, 2006)

Nº	Características de desempenho	Substrato de referência (EN 1766)	Método de ensaio	Requisito			
				Estrutural		Não estrutural	
				Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
1	Resistência à compressão	-	EN 12190	> 45 MPa	> 25 MPa	> 15 MPa	> 10 MPa
2	Teor de cloretos	-	EN 1015-7	< 0,05 %		< 0,05 %	
3	Aderência	MC (0,40)	EN 1542	>2,0 MPa	>1,5 MPa	> 0,8 MPa	

Então, de acordo com ambas as normas, a resistência de aderência obtida no ensaio de arrancamento deve ser maior que 1,5 MPa, pois a resistência do concreto do substrato é maior que 25 MPa.

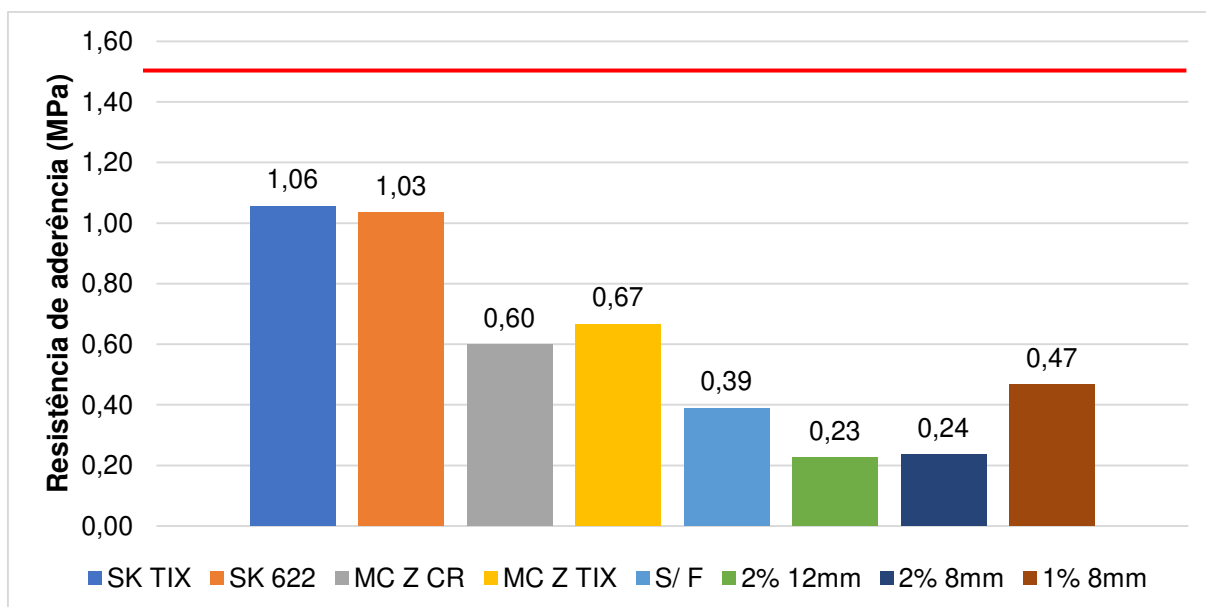


Figura 79 – análise da resistência de aderência ao arrancamento  $f_h$

Pelo gráfico da Figura 79 acima, é possível verificar que para o ensaio de arrancamento de pastilhas, nenhum dos oito materiais de reparo testados apresentou valores de resistência de aderência satisfatórios.

Mais uma vez, é provável atribuir a baixa aderência obtida no ensaio de arrancamento ao tipo de rugosidade executada, mas não é possível descartar outros fatores que influenciam diretamente, como o adensamento apropriado da camada de reparo e o uso ou não de algum material específico como ponte de aderência entre o substrato e o reparo. A falta de perpendicularidade durante os cortes e as diferenças nos tempos de pega entre as argamassas cimentícias e poliméricas (mais rápida) também são aspectos que podem ter influenciado nos resultados.



## 4) CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1) Conclusões

Devido a importância do comportamento da ligação entre concretos no reforço e recuperação de estruturas, este trabalho analisou o desempenho de aderência de diversos materiais de reparo diferentes. Para isso, foram executados principalmente os ensaios de cisalhamento oblíquo (*slant shear test*) e arrancamento (*pull off*). Pretendia-se também correlacionar os resultados destes, comparando-os.

No ensaio de cisalhamento oblíquo a classificação decrescente das resistências de aderência dos materiais de reparo testados foi: Zentrifix CR, Sikagrout TIX, Monotop 622, Zentrifix TIX, matriz sem fibras, compósito com 2% de fibras de polipropileno com 12 mm de comprimento, em seguida, 2% de 8mm e por último, 1% de 8mm. Apenas os compósitos com fibras de 8 mm não apresentaram resultados satisfatórios. A argamassa com maior resistência de aderência foi a Zentrifix CR, de 15,45 MPa. O resultado médio das argamassas comerciais foi de conferir 12,52 MPa, evidenciando uma capacidade de aderência muito boa destes materiais.

Já no teste de arrancamento de pastilhas a classificação de resistências de aderência obtida foi: Sikagrout TIX, Monotop 622, Zentrifix TIX, Zentrifix CR, compósito com 1% de fibras de 8mm, matriz sem fibras, compósito com 2% de 8mm e por fim, 2% de 12mm. Os melhores resultados foram das argamassas da Sika, mas nem mesmo estas alcançaram o desempenho esperado.

Como se vê, não foi possível correlacionar os resultados destes dois ensaios, pois as classificações dos materiais de reparo divergiram bastante entre si.

Comparando o uso de argamassas industrializadas ou compósitos com fibras como materiais de reparo, este estudo mostrou claramente que as argamassas comerciais têm melhor desempenho. Por serem prontas para uso, são as mais apropriadas para fins de reparo estrutural. Além disso há que se referir que os compósitos com fibras testados constituem um estudo preliminar para a verificação do seu desempenho como materiais de reparo.

Pela observação da superfície após a ruptura dos corpos de prova dos dois tipos de ensaios realizados, verificou-se que o tratamento superficial oferecido pelos sulcos com ferramenta mecânica não se mostrou satisfatório, pois manteve muitas

superfícies lisas e não sendo as ranhuras suficientemente profundas para garantir o interloque entre os dois materiais. A transferência dos esforços foi devida mais à qualidade dos materiais de reparo do que à ligação mecânica promovida pela interface. Esta pode ter sido a causa pela qual nenhum prisma tenha tido ruptura monolítica e dos baixos valores apresentados pelos materiais compósitos no ensaio de cisalhamento oblíquo. Também pode ter levado aos baixos valores dos resultados dos ensaios de arrancamento, para os dois tipos de materiais testados.

Assim, o ensaio de cisalhamento oblíquo foi o que apresentou os melhores resultados. Por este e tantos outros motivos percorridos neste trabalho, que este teste é realizado ampla e mundialmente, e daí a importância de ser executado segundo as normas vigentes, formuladas após décadas de estudos experimentais.

Finalmente, a especificação do tipo de material de reparo deve ser apropriada às características singulares do projeto de reparo de estruturas de concreto em questão.

#### **4.2) Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se que sejam testadas novas argamassas comerciais, de acordo com os lançamentos do mercado de recuperação e reforço, ou conforme necessidades de específicas de algum projeto ou obra.

Também é válido testar novos traços de compósitos cimentícios, até alcançar combinações e proporções que correspondam ao desempenho esperado.

Outra sugestão é buscar outras formas inovadoras de preparo da rugosidade da interface, como hidrojateamento ou aplicação de ácido, em detrimento das técnicas mais manuais e menos produtivas, como apicoamento ou escovação, visto que atualmente não são mais empregadas no cotidiano real dos canteiros de obra.

Por fim, mas como a sugestão que já vem sendo executada no LEC-UERJ, é a utilização de materiais específicos como ponte de aderência na ligação entre substrato e material de reparo.



## REFERÊNCIAS

AHMED M. D.; Abd Elmoaty M.; Mohamed R.T.E. Slant shear bond strength between selfcompacting concrete and old concrete. *Construction and Building Materials*, v. 130, p. 73-82, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Guide to cast-in-place architectural concrete practice. Chapter 9 – Treated architectural surfaces, ACI Committee 303, R-74.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Code requirements for evaluation, repair and rehabilitation of concrete buildings (ACI 562M-13) and commentary. ACI Committee 562, 2013.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1583 / C1583M. Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method). 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2007 - Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: 2009 - Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52:2009 - Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 45:2006 - Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM30:2001 - Agregado miúdo: Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248:2003 - Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522:2017 - Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

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

AUSTIN, S.; Robins, P; Pan, Y. Shear bond testing of concrete repairs. Cement and Concrete Research. Elsevier Science Ltd, v. 29, p. 1067-1076, 1999.

BENTZ, D.P.; Varga, I.D.; Munoz, J.F.; Spragg, R.P.; Graybeal, B.A.; Hussey, D.S.; Jacobson, D.L.; Jones, S.Z.; LaManna, J.M. Influence of substrate moisture state and roughness on interface microstructure and bond strength: Slant shear vs. Pull-off testing. Cement and Concrete Composites, v. 87, p. 63-72, 2018.

BISSONNETTE B., VAYSBURD A.M., FAY K.F.V. Best Practices for Preparing Concrete Surfaces Prior to Repairs and Overlays. Report Number MERL 12-17. U.S. Department of the Interior, Denver, Colorado, May 2012.

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

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

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

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

DORIA, M.R., SALES, A.T.C., ANDRADE N.F.A. Aderência aço-concreto e entre concretos de diferentes idades em recuperação de estruturas. Rev. IBRACON Estrut. Mater. v.8, n.5, São Paulo Oct. 2015.

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

EYRE, J.R. The slant shear testing of bond of repair materials for concrete structures. Proceedings of the Second International Conference on Structural Faults and Repair, Engineering Technics Press, England, p. 141-148, 1985.

GUSMÃO, A.C. Aderência do concreto de pós reativos ao concreto convencional. Dissertação de mestrado, UFV, 2017.

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

KOJIMA, S.; SAKATA, N.; KANDA, T.; HIRAISHI, T. Application of Direct Sprayed ECC for Retrofitting Dam Structure Surface – Application Mitaka Dam. *Concrete Journal*, v. 42, n. 5, p. 135-139, 2004.

KREIGH, J.D. Arizona slant shear test, *ACI Journal* v. 73, p. 372-373, 1976.

JULIO E.N.B.S., BRANCO F.A.B., SILVA V.D. Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface. *Construction and Building Materials*, v.18:9, p. 675-681. Elsevier, 2004.

JULIO, E. [et al.] Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate. *Building and Environment*, v. 41, n. 12, p. 1934-1939, 2006.

LANKARD, D.R. Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON): Properties and Applications. *Proceedings of Symposium on Very High Strength Based Materials*, Materials Research Society, v. 42, J.F. Young, Editor, Pittsburgh, 1985.

LANKARD, D.R., NEWELL, J.K. Preparation of Highly Reinforced Steel Fiber Reinforced Concrete Composites. *Fiber Reinforced Concrete – International Symposium*, American Concrete Institute, SP-81, Detroit, p. 277-306, 1984.

LI, V.C., LEUNG, C.K.Y. Steady State and Multiple Cracking Of Short Random Fiber Composites. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, v. 118, n. 11, p. 2246-2264, 1992.

LI, V.C., WU, H.C. Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *Journal of Applied Mechanics*, v. 45, n. 8, p. 390-398, 1992.

LI, V.C. Damage tolerance of engineered cementitious composites. *Advances in Fracture Research*, Proc. 9th ICF Conference on Fracture, Sydney, Australia, Ed. B.L. Karihaloo, Y.W. Mai, M.I. Ripley and R.O. Ritchie, Pub. Pergamon, UK, 619-630, 1997.

LI, V.C., WANG, S. WU, C. Tensile Strain-hardening Behavior of PVA-ECC. *ACI Materials Journal*, v. 98, n. 6, p. 483-492, 2001.

LI, V.C. On Engineered Cementitious Composites (ECC). A Review of the Material and its Applications. *Journal Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 3, p. 215-230, 2003.

LI, V.C. Strategies for High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites Development. *Proceedings of International Workshop on Advances in Fiber Reinforced Concrete*, Bergamo, Italy, p. 93-98, 2004.

MAALEJ M, LI V.C. Introduction of strain-hardening engineered cementitious composites. Design of reinforced concrete flexural members for improved durability. *ACI Structural Journal*, v. 2, p. 167-76, 1995.

MAGALHÃES, M.S. “Caracterização experimental de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA: processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica”, Tese de doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete Microstructure, Properties, and Materials – Third Edition*. McGraw-Hill, 2006.

MIRMOGHTADAEI R.; Mohammadi M.; Samani N.A.; Mousavi S. The impact of surface preparation on the bond strength of repaired concrete by metakaolin containing concrete. *Construction and Building Materials*, v. 80, p. 76-83, 2015.

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

NAAMAN, A.E., REINHARDT, H.W. Proposed Classification of FRC Composites Based on their Tensile Response. *Materials and Structures*, v.39, p. 547–555, 2006.



NAAMAN, A.E. Fiber reinforced concrete: five decades of progress. Brazilian Conference on Composite Materials, Rio de Janeiro, p. 35-56, 2018.

NIELSEN, M.P.; Hoang,L.C. Limit Analysis and Concrete Plasticity. CRC Press. 2010.

NP EN 1504 parte 3 – Produtos e Sistemas para proteção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 3: reparação estrutural e não estrutural. 2006.

NP EN 1504 parte 4 – Produtos e Sistemas para proteção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 4: colagem estrutural. 2006.

ROKUGO K., KUNIEDA M., LIM S.C. Patching repair with ECC on cracked concrete surface. Proc. of ConMat05, Vancouver, Canada [CD-ROM], 2005.

SAHMARAN, M.; Yucel H.E.; Yildirim, G.; Al-Eman, M.; Lachemi M. Investigation of the bond between concrete substrate and ECC overlays. Journal of material in civil engineering, v. 26(1), p. 167-174, 2014.

SALDANHA, R.; Júlio, E.; Dias-da-Costa,D.; Santos,P. - Ensaio Slant Shear Modificado para Obter Roturas Adesivas. Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012 FEUP, Out 2012.

SALDANHA, R.; Júlio, E.; Dias-da-Costa, D.; Santos, P. A modified slant shear test designed to enforce adhesive failure. Construction and Building Materials, v. 41, p. 673-680, 2013.

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

SANTOS, P.; JULIO, E. Factors affecting bond between new and old concrete, *ACI Materials Journal*, v. 108, n. 4, p. 449-456, 2011.

SOUZA, R.H.F. Análise do comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão e ao esforço transverso. Tese de Doutoramento, IST, Lisboa, 320p.,1990.

SOUZA, R.H.F. Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. Notas de Aula. Faculdade de Engenharia, PGECIV, UERJ, 2009.

TABOR, L.J. The evaluation of resin systems for concrete repair. *Mag Concr Res*, v. 30, p. 221–225, 1978.

TAYEH B.A.; Abu Bakar B.H.; Megat Johari M.A.; Yen Lei Voo. Evaluation of Bond Strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material. *Procedia Engineering* v. 54, p. 554-563, 2013.

TEIXEIRA, B.A.C. Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro - um estudo experimental. Dissertação de mestrado. 179p. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2018.

U.S. Department of Interior. Guide to concrete repair. Second edition. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, August 2015.

WANG, S., LI, V.C. Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances. Proceedings of Int'l workshop on HPFRCC in structural applications, Honolulu, Hawaii, USA, may, p. 23-26, 2005.

WALL, J.S.; SHRIVE, N.G. Factors affecting bond between new and old concrete. *ACI Materials Journal*. Technical Paper. Mar-Abr, p. 117-125, 1985.

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

## **ANEXOS**

**ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS**

**ANEXO II – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS**

**ANEXO III – DOSAGEM DO CONCRETO**

**ANEXO IV – CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS VOLANTES**

**ANEXO V – CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO**

**ANEXO VI – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS E COMPÓSITOS**

**ANEXO VII – ENSAIO DE CISALHAMENTO OBLÍQUO**

**ANEXO VIII – ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE PASTILHA**