



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

Dennis Videira Fernandes


**Estudo da aderência de barras de aço coladas ao
concreto com resina Epóxi**

Rio de Janeiro

2011

Dennis Videira Fernandes

Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina Epóxi



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.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Regina Helena Ferreira de Souza

Rio de Janeiro

2011

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

F363 Fernandes, Dennis Videira.
Estudo da aderência de barras de aço coladas ao
concreto com resina Epóxi / Dennis Videira Fernandes. -
2011.
160 f.

Orientadora: Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares.
Coorientadora: Regina Helena Ferreira de Souza
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1.– Estruturas de concreto armado - Teses. 2. Barras
de aço – Teses. 3. Resinas epóxi - Teses. 4. Engenharia
Civil. I. Tavares, Maria Elizabeth da Nóbrega. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 624.012.45

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

Assinatura

Data

Dennis Videira Fernandes

Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina Epóxi

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

Aprovado em: 25 de março de 2011.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof.^a Dr.^a Regina Helena Ferreira de Souza (Coorientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Evandro da Silveira Goulart
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof.^a Dr.^a Lidia da Conceição Domingues Shehata
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Luiz Antônio Vieira Carneiro
Instituto Militar de Engenharia - IME

Rio de Janeiro

2011

DEDICATÓRIA

Aos meus pais pelo suporte e incentivo emocional, paciência, carinho, presença, disponibilidade e atenção. As minhas professoras, orientadoras e amigas pelo incentivo, carinho e atenção. Aos meus amigos pela paciência e incentivo durante estes anos dedicados no estudo.

AGRADECIMENTOS

As professoras orientadoras Maria Elizabeth Tavares da Nóbrega e Regina Helena de Souza, que sem sua ajuda, companheirismo, dedicação e amizade que constaram presentes durante todo o decorrer do curso.

Ao professor Evandro Duarte pela dedicação e ajuda nos momentos fundamentais durante o desenvolvimento do estudo e seu companheirismo e amizade desenvolvida neste tempo.

Aos colegas de aula e de estudo pelas participações grupos e aprendizagem oferecendo ambiente agradável e amigável dentro e fora da sala de aula.

Aos professores do PGECIV por sua disponibilidade e coleguismo para suporte e orientação.

Aos Laboratorista do laboratório de engenharia civil que muito me ajudaram nos procedimentos de ensaios e preparação.

A instituição UERJ que sempre ofereceu recursos e infraestrutura para a estada e convívio em suas instalações.

A coordenação do PGECIV que sempre atendeu as necessidades dos discentes.

A secretaria do PGECIV que sempre disponível atendeu prontamente a necessidade dos discentes.

A FAPERJ pelo apoio financeiro, sem o qual dificilmente aconteceria o desenvolvimento deste trabalho neste intervalo de tempo.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

RESUMO

FERNANDES, Dennis Videira. *Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina Epóxi*. 2011. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Assim como em outras áreas do conhecimento a construção civil vem evoluindo ao longo dos anos. Grandes investimentos e elevadas taxas de demandas por novos projetos requerem uma maior velocidade na consolidação de obras. Neste cenário, ficam precários os estudos e pesquisas que avaliam a capacidade de novas tecnologias. Na área do concreto e estruturas de concreto armado, depara-se a associação de técnicas consolidadas à métodos inovadores. A utilização de polímeros como material de construção, como é o caso dos aditivos para concreto, dos tubos e conexões, das esquadrias e como adesivos, utilizados em ligações de aduelas de pontes, associados a fibras de vidro ou carbono para reforços estruturais e para fixação de armaduras ou conectores no caso de reparação de estruturas, oferecendo uma solidarização eficiente entre elementos estruturais. O presente trabalho visa avaliar uma pequena parcela de aplicação de materiais poliméricos, principalmente quanto a sua característica de aderência e colagem de barras de aço ao concreto. O desenvolvimento do estudo ocorreu sobre uma perspectiva de ensaios laboratoriais de arrancamento de barras coladas com resina epóxi em blocos de concreto, sendo estes resultados comparados com barras de aço concretadas em blocos de concreto. Desse modo o principal fator de comparação seria a tensão de aderência desenvolvida na área de contato da barra com o substrato. Alguns parâmetros foram inseridos para uma abordagem de maior amplitude, tais como variação do diâmetro da barra ($\varphi = 10,0\text{mm}$; $\varphi = 12,5\text{mm}$ e $\varphi = 16,0\text{mm}$), do comprimento de ancoragem (múltiplos do diâmetro, sendo 5φ e $7,5\varphi$) e da espessura da resina (1mm, 2mm e 3mm). De forma complementar procedeu-se ao ensaio de vigas bi-apoiadas submetidas à flexão visando representar o comportamento de uma recuperação/reforço estrutural aplicado em escala. Para avaliar o comportamento destas vigas, foram ensaiados dois espécimes, uma viga padrão concretada de uma única vez e outra submetida a um reparo estrutural, onde possuía a armadura inferior inserida posteriormente à concretagem inicial, colada com resina epóxi nas extremidades da viga.

Palavras-chave: Ensaio de arrancamento; Aderência; Resina Epóxi; Estruturas de concreto; Recuperação estrutural.

ABSTRACT

Just like others fields of knowledge, the civil construction is evolving. Hughes investments and the need for new projects improve the speed and the technology usually applied for basic infrastructure's development. These scenarios achieve issues as the miss understanding of the behavior of this technological advances in long terms, caused by the few studies and researches about these subjects. At the concrete structures field, an extremely self consolidate knowledge whose have been replaced for new methods, as the case of the polymeric materials. This kind of material have large scale of applications at construction and projects of structural elements, used as a bond interface for different elements and offering a significant monolithically performance between structural pieces. The current study pretends analyze the behavior of bonded steel bars at the concrete using epoxy resin. The development of the study occur by lab tests where a steel bar is pulled out of a concrete block, named Pull-out-test. This one was adapted for a bond whit epoxy resin, were the results was compared whit the regular ones (concrete bonded bars), in this method the phenomenon of the stress occurred at the bar surface in contact whit the concrete or the resin evaluate. Some parameters were included for a better understanding of the bond behavior, such as: Steel bar diameter (10mm, 12,5mm and 16mm); Length of anchorage (5ϕ and $7,5\phi$), and Resin thickness (1mm, 2mm and 3mm). For the same purpose, was molded a concrete beam to represent the bonded situation at a real condition, these beam had two different configuration, one of those were a regular reinforcement beam, and the other one were a recuperated reinforcement beam, whit yours inferior steel bar added post concrete solidification, simulatig a intervention at a problematic beam, in this case the steel bars were bonded whit epoxy resin at the edges of the beam.

Keywords: Pull-out-test; Bonded; Epoxy resin; Concrete structures; Structural recuperation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Esforços solicitantes no concreto circundante à barra de aço na proximidade das nervuras Barbosa (2001)	21
Figura 2	- Solicitações na estrutura e a transferência de esforços internos entre materiais	22
Figura 3	- Modelo Teórico da Curva de Aderência proposta por Tassios (1979) apud Reyes (2009), e Barbosa (2001).	23
Figura 4	- Esquema de fissuras de fendilhamento, proposta por TASSIOS (1979), apud OLIVEIRA (2008)	24
Figura 5	- Tipos de ruptura exposto por Oliveira (2008). (a) Ruptura por fendilhamento; (b) Ruptura por falha na aderência quando concreto confinado.....	25
Figura 6	- Relação tensão de aderência x deslizamento, carregamento monotônico CM (2010).....	26
Figura 7	- Esquema do comportamento da tensão desenvolvida no aço e no concreto na proximidade de uma fissura, CEB (1990).....	27
Figura 8	- Interação entre a superfície sólida e o material polimérico para diferentes materiais Aguiar (1990).	31
Figura 9	- Tensão de aderência em função do ângulo de contato Aguiar (1990)	32
Figura 10	- Chumbador típico para ancoragem.....	41
Figura 11	- Dimensões dos corpos de prova ensaiados extraído de Souza (1990).....	44
Figura 12	- Esquema da Instrumentação, extraído de Souza (1990).	45
Figura 13	- Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 8$ mm ($l = 7,5$ cm), Souza (1990).....	46
Figura 14	- Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 8$ mm ($l = 10$ cm), Souza (1990).....	46
Figura 15	- Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 8$ mm ($l = 7,5$ cm), Souza (1990).....	46
Figura 16	- Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 12$ mm ($l = 15$ cm), Souza (1990).....	47
Figura 17	- Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 12$ mm ($l = 10$ cm), Souza (1990).....	47

Figura 18	- Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 12$ mm ($l = 7,5$ cm), Souza (1990).....	47
Figura 19	- Força x deslizamento, $\varnothing = 8$ mm, modelo SR, Souza (1990).....	48
Figura 20	- Força x deslizamento, $\varnothing = 8$ mm, modelo CR, Souza (1990).....	48
Figura 21	- Força x comprimento de ancoragem, barra $\varnothing = 8$ mm, Souza (1990)..	49
Figura 22	- Força x comprimento de ancoragem, barra $\varnothing = 12$ mm, Souza (1990).....	49
Figura 23	- Modelo experimental adotado por Felício (1995).....	51
Figura 24	- Gráfico resultados ensaio barra 10mm tipo sem resina, Felício (1995).....	55
Figura 25	- Gráfico resultado ensaio barra 10mm tipo com resina, Felício (1995) .	55
Figura 26	- Gráfico resultado ensaio barra 12,5mm tipo sem resina, Felício (1995).....	55
Figura 27	- Gráfico resultado barra 12,5mm tipo com resina, Felício (1995).....	55
Figura 28	- Gráfico resultados ensaio barra de 16mm tipo sem resina, Felício (1995).....	55
Figura 29	- Gráfico resultados ensaio barra 16mm tipo com resina, Felício (1995).....	55
Figura 30	- Relação entre a tensão máxima na armadura e l / ϕ , sendo $\phi = 10$ mm, Felício (1995).	56
Figura 31	- Relação entre a tensão máxima na armadura e l / ϕ , sendo $\phi = 12,5$ mm, Felício (1995).	57
Figura 32	- Relação entre a tensão máxima na armadura e l / ϕ , sendo $\phi = 16$ mm, Felício (1995).	57
Figura 33	- Esquemática do modelo de ensaio, Cook et al (2001).	60
Figura 34	- Modelo típico do comportamento controlado por resistência última, Cook et al (2001).....	62
Figura 35	- Modelo típico de ensaio controlado por rigidez, Cook et al (2001).....	63
Figura 36	- Modelo típico controlado por deslocamento, Cook et al (2001)	63
Figura 37	- Modelo experimental, Colak (2001).....	67
Figura 38	- Efeito da variação da espessura de resina na resistência, Colak (2001).....	68
Figura 39	- Modelo de ensaio Colak (2007)	70
Figura 40	- Relação da carga ultima com o comprimento de aderência, Colak (2007).....	71

Figura 41	- Relação da carga ultima com a espessura de adesivo para espécime MMA1, com 50mm de comprimento de aderência, Colak (2007).....	71
Figura 42	- Variação da tensão de aderência contra a concentração de finos para o modelo com MMA2, comprimento de aderência de 100mm e espessura de resina de 4mm, Colak (2007).....	72
Figura 43	- Esquema de ensaio utilizado por Bouazaoui (2008).	74
Figura 44	- Relação força última x comprimento de aderência, Bouazaoui (2008) ..	75
Figura 45	- Relação força última x diâmetro da barra para um mesmo comprimento de ancoragem, Bouazaoui (2008)	76
Figura 46	- Relação força última x superfície aderente, Bouazaoui (2008)	76
Figura 47	- Comparação de carga ultima de resistência entre o modelo com e sem resina, Bouazaoui (2008).	77
Figura 48	- Tipos de ancoragem de barras de aço em concreto remanescente de estruturas recuperadas Gomes (1997).....	80
Figura 49	- Ancoragem de barra longitudinal	81
Figura 50	- Conectores colados/chumbados na laje existente para compor armadura de recuperação/reforço.....	81
Figura 51	- Armadura de recuperação/reforço estrutural em laje	81
Figura 52	- Armadura transversal chumbada ao concreto existente para recuperação de viga de concreto armado.	81
Figura 53	- Modelo de Ensaio Pull-Out Rilem (1973).	84
Figura 54	- Croqui da viga de ensaio do tipo 1	89
Figura 55	- Viga 1 posicionada para ensaio.	90
Figura 56	- Croqui da viga de ensaio do tipo 2.....	91
Figura 57	- Moldagem parcial da viga 2 com as esperas dos estribos para fixação da armadura positiva.	91
Figura 58	- Direção da concretagem dos Corpos de Prova.....	97
Figura 59	- Injeção da resina por pistola injetora do sistema RE-500 da Hilti®	98
Figura 60	- Barra passante colada no furo previamente preenchido com resina. ..	99
Figura 61	- CP 1 resina Hilti® RE 500.....	100
Figura 62	- CP 2 Resina Hilti® RE 500	101
Figura 63	- CP 4 Sistema Hilti® RE 500.....	101
Figura 64	- Aplicação da resina no furo com auxílio de varinha.	102
Figura 65	- CP 1 Resina Sikadur 32®	103

Figura 66	- CP 2 Resina Sikadur 32 [®]	104
Figura 67	- CP 3 Resina Sikadur 32 [®]	104
Figura 68	- Esquema da preparação barra de aço para a colagem	106
Figura 69	- Suporte de aço para colagem e fixação das barras aos blocos de concreto	106
Figura 70	- Corpos de prova colados e apoiados	107
Figura 71	- Viga 2 após a 2 ^a fase de concretagem.....	108
Figura 72	- Exemplos de logomarca nas barras de aço	109
Figura 73	- Fissura de acomodação do concreto na forma, superficial	109
Figura 74	- Esquema do ensaio dos corpos de prova	111
Figura 75	- Transdutor de Deslocamentos Linear PY2.....	111
Figura 76	- Detalhe do Transdutor de deslocamentos acoplado e do deflectômetro analógico	112
Figura 77	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-5-0	117
Figura 78	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-5-1	118
Figura 79	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-5-2	118
Figura 80	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-7,5-0	119
Figura 81	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-7,5-1	119
Figura 82	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-7,5-2	120
Figura 83	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-5-0. Neste grupo foram considerados para análise apenas os CP-5 e CP-6, pois o CP-4 comportou-se de maneira bastante divergente dos demais.....	120
Figura 84	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-5-1	121
Figura 85	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-5-2	121
Figura 86	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-7,5-0. Neste grupo foram considerados para análise apenas os CP-16 e CP-17-A, pois os outros apresentaram falhas na aderência	122
Figura 87	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-7,5-1. Este grupo foi totalmente desconsiderado das análises devido à presença de bolhas na resina.....	122
Figura 88	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-7,5-2	123
Figura 89	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-5-0	123
Figura 90	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-5-1. Neste grupo apenas o CP-29 foi considerado, pois os outros apresentaram bolhas na resina	124

Figura 91	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-5-2. Neste grupo apenas o CP-47 foi considerado para análise pois os demais apresentaram bolhas na resina.....	124
Figura 92	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-5-3.....	125
Figura 93	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-7,5-0.....	125
Figura 94	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-7,5-1. Neste grupo apenas o CP-38 foi considerado para análise, pois os demais apresentaram bolhas na resina.....	126
Figura 95	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-7,5-2. Este grupo foi totalmente desconsiderado das análises devido a presença de bolhas na resina.....	126
Figura 96	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-7,5-3.....	127
Figura 97	- Formas de ruptura ocorridas durante o ensaio.....	128
Figura 98	- Esquema de carga viga 1.....	129
Figura 99	- Curva carga x deslocamento viga 1.....	130
Figura 100	- Esquema de carga Viga 2.....	130
Figura 101	- Curva carga x deslocamento viga 2.....	131
Figura 102	- Rompimento e fissuração da viga 1.....	132
Figura 103	- Rompimento e fissuração viga 2.....	132
Figura 104	- Curva carga x deslocamento no meio do vão das vigas ensaiadas...	133
Figura 105	- Adaptação do Esquema de fissuras de fendilhamento, proposta por Tassios (1979), apud Oliveira (2008).....	135
Figura 106	- Detalhe da ocorrência do fendilhamento.....	135
Figura 107	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10mm SR.....	136
Figura 108	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5mm SR.....	137
Figura 109	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16mm SR.....	137
Figura 110	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo SR e Comprimento de Aderência de 5ϕ	138
Figura 111	- Gráfico Força x Deslizamento Modelo SR e Comprimento de Aderência de $7,5\phi$	138
Figura 112	- Ruptura do CP-2 com detalhes do deslizamento entre o aço e o concreto.....	139
Figura 113	- Detalhe do cisalhamento do concreto entre as nervuras da barra no CP-2.....	139

Figura 114 - Ruptura do CP-5 e detalhe do cisalhamento do concreto entre as nervuras que configura o deslizamento da barra	139
Figura 115 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10mm CR1	140
Figura 116 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10mm CR2	141
Figura 117 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5mm CR2	141
Figura 118 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16mm CR1	142
Figura 119 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo CR e Comprimento de Aderência de 5ϕ	142
Figura 120 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo CR e Comprimento de Aderência de $7,5\phi$	143
Figura 121 - Fendilhamento durante o ensaio de arrancamento do CP-38.....	144
Figura 122 - Vista interna do comportamento e do trabalho realizado pela nervura da barra na resina	144
Figura 123 - Exemplo de bolhas ocasionando o escorregamento do aço mesmo nos modelos com resina	145
Figura 124 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10mm - 5ϕ	145
Figura 125 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10mm - $7,5\phi$	146
Figura 126 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5mm - 5ϕ	146
Figura 127 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5mm - $7,5\phi$	147
Figura 128 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16mm - 5ϕ	147
Figura 129 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16mm - $7,5\phi$	148
Figura 130 - Representação da camada de resina após colagem e rompimento ..	149
Figura 131 - Gráfico que relaciona força com superfície de aderência	151
Figura 132 - Tensão de aderência relacionada com a superfície de aderência para os modelos com e sem resina	152
Figura 133 - Gráfico que relaciona carga com parâmetro de comprimento de ancoragem em função do diâmetro.....	153
Figura 134 - Relação do comportamento do comprimento de ancoragem com a superfície de aderência e a bitola do aço.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Tipos e aplicações dos polímeros termorrígidos SOUZA (2009)	33
Tabela 2	- Tipos e aplicações dos polímeros termoplásticos SOUZA (2009)	34
Tabela 3	- Tipos e aplicações dos Elastômeros SOUZA (2009)	35
Tabela 4	- Comparação entre sistemas de reparação ALLEN <i>et al</i> (1987)	38
Tabela 5	- Diâmetros de barras e embutimento de instalação recomendada AC308	40
Tabela 6	- Resultados dos ensaios de arrancamento, extraído de SOUZA (1990).....	46
Tabela 7	- Características dos modelos experimentais, FELICIO (1995).....	52
Tabela 8	- Relação entre os diâmetros dos furos e os diâmetros das armaduras, FELICIO (1995).....	53
Tabela 9	- Resumo dos resultados de Felício (1995), modelos sem resina.....	54
Tabela 10	- Resumo dos resultados de Felício (1995), modelos com resina.....	54
Tabela 11	- Tipo de Resina epóxi, COLAK (2001)	66
Tabela 12	- Tipos de resina testados, COLAK (2007).....	70
Tabela 13	- Características dos modelos experimentais com barras aderidas ao concreto	86
Tabela 14	- Características dos modelos experimentais com barras coladas ao concreto com resina epóxi com 1mm de espessura	87
Tabela 15	- Características dos modelos experimentais com barras coladas ao concreto com resina epóxi com 2mm de espessura	88
Tabela 16	- Características dos modelos experimentais com barras coladas ao concreto com resina epóxi com 3mm de espessura	88
Tabela 17	- Granulometria do agregado miúdo (areia)	92
Tabela 18	- Granulometria do agregado graúdo	93
Tabela 19	- Resultados dos ensaios de Caracterização do concreto.....	95
Tabela 20	- Resultados dos ensaios de Caracterização do aço CA 50.....	96
Tabela 21	- Distribuição das concretagens nos modelos	96
Tabela 22	- Tabela Resumo dos Resultados dos Ensaios sem resina	114
Tabela 23	- Tabela Resumo dos Resultados dos Ensaios para Resina 1mm.....	115
Tabela 24	- Tabela Resumo dos Resultados dos Ensaios para Resina 2 e 3mm.	116
Tabela 25	- Resumo dos Resultados	150

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.1	Características gerais	19
1.1.1	Adesão.....	19
1.1.2	Atrito.....	19
1.1.3	Aderência mecânica	20
1.2	Aderência Aço-Concreto	21
1.3	Aderência Resina-Concreto-Aço	30
1.4	Polímeros	32
1.4.1	Propriedades dos Polímeros.....	33
1.4.2	Polímeros como cola	36
1.5	Resina Epóxi	37
1.6	Normalização e uso de ancoragens com chumbadores adesivos	39
1.7	Estudos anteriores sobre ligação com resina	43
1.7.1	Estudo realizado por SOUZA (1990).	43
1.7.2	Estudo realizado por FELÍCIO (1995).....	50
1.7.3	Estudo Realizado por COOK <i>et al</i> (2001)	59
1.7.4	Estudo realizado por COLAK (2001).....	65
1.7.5	Estudo realizado por COLAK (2007).....	69
1.7.6	Estudo realizado por BOUAZAOUUI (2008).....	73
1.8	Reforço e recuperação de estruturas	78
2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	83
2.1	Descrição do Modelo Experimental	83
2.1.1	Características dos modelos experimentais.....	84
2.1.2	Modelos de Viga	89
2.2	Caracterização dos Materiais	91
2.2.1	Concreto	91
2.2.2	Agregados.....	92
2.2.3	Cimento.....	93
2.2.4	Aço.....	93
2.2.5	Resinas epóxi.	93

2.2.6	Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais.....	94
2.3	Concretagem dos Corpos de Prova	96
2.4	Fixação das Armaduras nos Corpos de Prova	97
2.4.1	Ensaio preliminares.....	98
2.4.2	Descrição do procedimento de colagem das barras	105
2.4.3	Outras considerações	108
2.5	Sistema de Ensaio e Instrumentação	110
2.5.1	Ensaio de Arrancamento.....	110
3	RESULTADO DOS ENSAIOS	113
3.1	Resultado dos ensaios de arrancamento	113
3.2	Tipos de ruptura	127
3.3	Resultado dos ensaios das vigas	128
4	INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	134
4.1	Interpretação e análise dos resultados	134
4.2	Resultados modelos sem resina (SR)	136
4.2.1	Influência do comprimento de aderência	136
4.2.2	Influência do diâmetro da barra	137
4.2.3	Modo de ruptura dos modelos SR	139
4.3	Modelos com resina (CR)	140
4.3.1	Influência do comprimento de aderência	140
4.3.2	Influência do diâmetro da barra.	142
4.3.3	Influência da espessura de resina	143
4.3.4	Modo de ruptura.....	143
4.4	Comparação entre os modelos SR e CR	145
4.5	Aspectos relacionados com a técnica de colagem	148
4.6	Avaliação da colagem com resina epóxi	150
4.7	Avaliação da espessura da resina	153
4.8	Considerações sobre o modelo de ensaio	154
5	CONCLUSÕES	155
6	ESTUDOS FUTUROS	157
	REFERÊNCIAS	158

INTRODUÇÃO

Visando um processo de reparo eficiente, rápido e confiável deu-se início a este estudo tendo em vista a necessidade do desenvolvimento de pesquisas no que diz respeito à ancoragem de barras de aço em estruturas existentes de concreto, por intermédio de resina epóxi.

O método da colagem de armaduras com resina epóxi está sendo cada vez mais requerido, principalmente com a constante necessidade de readequar as estruturas antigas a novos usos e à recuperação e o reforço das estruturas novas, tendo em vista o aumento da agressividade do meio, à deficiência nos processos executivos, especialmente em virtude da velocidade com que os empreendimentos construtivos vêm sendo desenvolvidos e, sobretudo, devido à falta de manutenção. Tais necessidades acabam por gerar ou incorporar outras tecnologias no âmbito da engenharia civil, que, apesar de serem criadas por causas desfavoráveis, são sempre bem vindas para ao avanço tecnológico do setor.

A pesquisa engloba o desenvolvimento de um programa experimental, para o qual foram moldados 61 corpos de prova à semelhança dos ensaios de arrancamento normalizados pela Rilem (1973) e normalmente empregados para a avaliação da aderência do aço ao concreto. Os modelos testados fixaram alguns parâmetros para avaliação: armaduras moldadas no concreto dos corpos de prova, armaduras coladas em furos previamente deixados nos corpos de prova, diferentes comprimentos de aderência, diferentes diâmetros de barras de armaduras, diferentes espessuras de resina epóxi.

Motivação

Contribuir para o avanço do conhecimento na área da recuperação e reforço estrutural, através do estudo e avaliação de um tema da construção civil que ainda encontra-se carente. Poucos estudos científicos foram encontrados na literatura técnica e métodos empíricos têm sido usados para a solução dos problemas na prática da engenharia civil

Objetivo

O principal objetivo do estudo refere-se à contribuição para o aumento do conhecimento científico de determinada prática empírica da construção civil, usada sobretudo na área do reforço e da recuperação estrutural.

O foco deste trabalho está na avaliação da capacidade de aderência de barras de armaduras coladas às estruturas de concreto, tendo por base ensaios laboratoriais.

Apresentação da Dissertação

Inicialmente procedeu-se a uma revisão bibliográfica sobre o tema da aderência aço-concreto, cujo conhecimento já está consolidado, bem como ao tema da fixação de armaduras novas ao concreto existente e aos procedimentos utilizados hoje, na prática da recuperação estrutural.

No **Capítulo 2** estão apresentados resumos da conceituação teórica à respeito do comportamento da aderência entre concreto e aço, bem como do comportamento da resina epóxi como material de colagem entre os dois compostos. Para tal, foram avaliadas publicações encontradas na literatura técnica sobre o tema.

A segunda etapa do estudo, onde se concentra a parte fundamental de todo o programa experimental, encontra-se descrita no **Capítulo 3** e refere-se aos ensaios laboratoriais realizados, à definição dos modelos experimentais, da composição do concreto e dos materiais, bem como da aplicabilidade do produto testado e sua eficiência, principalmente quanto à melhor forma de proceder à colagem, em ensaios preliminares.

Após a realização desses estudos e ensaios, os resultados foram interpretados e avaliados, conforme descrito no **Capítulo 4**. Foram realizadas comparações entre os espécimes que consistiram, basicamente, na avaliação da eficiência da cola em relação à capacidade de aderência do concreto armado original; na avaliação da eficiência da cola quanto à espessura da camada adesiva, tendo em vista o diâmetro do furo no corpo de prova de concreto; e na avaliação da

eficiência do comprimento de ancoragem, relacionando-o com a dificuldade de execução desse tipo de procedimento em obras de recuperação.

Por fim, no **Capítulo 5** estão apresentadas as conclusões obtidas com o programa experimental, relacionadas à conceituação teórica e à prática da engenharia.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Características gerais

O estudo da aderência envolve diversos parâmetros e tem a finalidade de determinar o comportamento dos materiais envolvidos na transmissão de esforços que se desenvolvem nas ligações. Esta ligação entre diferentes materiais é de grande importância para o concreto armado, visto que o seu funcionamento depende do trabalho em conjunto de materiais com características bastante diferentes, como o aço, material com alta ductilidade e elevada resistência mecânica e o concreto, material extremamente frágil e com baixa resistência à tração.

O comportamento de uma ligação depende principalmente das condições da interface dos materiais envolvidos, bem como do tipo de interação que ocorre nestas interfaces. No caso da ligação entre o aço e o concreto, pode-se identificar alguns mecanismos:

1.1.1 Adesão

Esta é compreendida pela resistência direta entre dois materiais que se combinam quimicamente; trata-se da ligação intermolecular dos compostos envolvidos, seja por ações químicas, como reação de solidarização entre compostos ativos, ou físicas, mais comumente termo-fusão.

A característica de maior importância desta parcela da ligação é a capacidade adesiva entre os agentes solidarizantes. A superfície de contato entre eles influencia de maneira secundária na capacidade de aderência, como é o caso da rugosidade que melhora a interação química dos compostos ativos que agem na adesão.

1.1.2 Atrito

A parcela do atrito reflete a relação do coeficiente de atrito entre as superfícies de contato dos materiais envolvidos na resistência da aderência global do sistema. No concreto armado esta característica é percebida principalmente pelo envolvimento completo da barra de aço pela pasta de cimento, favorecendo seu

enclausuramento e o aumento da força de atrito resistente que ocorre quando existe a tendência de movimento após o rompimento da adesão.

Quando considera-se a retração da pasta cimentícia circundante à barra de aço, ocorre aumento de pressão superficial do concreto na barra de aço, contribuindo para o aumento da força de atrito.

A rugosidade da barra e os componentes do concreto, tais como agregados miúdos e graúdos, ajudam no desenvolvimento de parcelas resistentes de atrito mais elevadas.

1.1.3 Aderência mecânica

Verificada na mecânica do engate que ocorre na ligação entre o aço e o concreto, esta parcela está compreendida na força de resistência desse engate. A mecânica da ligação pode ser considerada microscópica, como as ranhuras superficiais dos materiais que tendem a se encaixar (conceito semelhante ao da aderência por atrito) ou macroscópicas, como nervuras e saliências das barras de aço que funcionam como batentes ou anteparos aos deslocamentos relativos, no caso do concreto armado.

Esta parcela está relacionada principalmente com o efeito de cunha entre as irregularidades da superfície, e majoradas pela presença de nervuras nas barras de aço. O efeito de cunha provoca tensões de cisalhamento no concreto circundante, modificando a forma de ruptura e a conformação do estado de tensões presente na ligação.

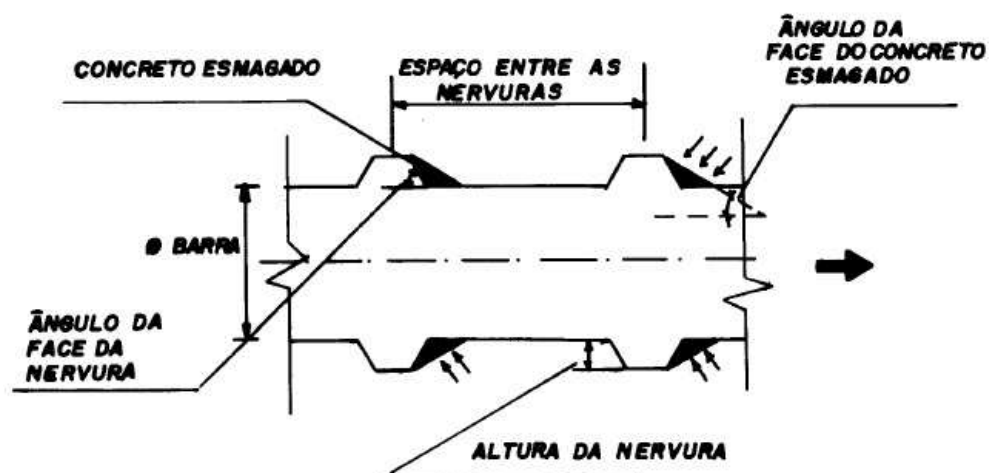


Figura 1 - Esforços solicitantes no concreto circundante à barra de aço na proximidade das nervuras Barbosa (2001).

1.2 Aderência Aço-Concreto

O comportamento da aderência entre a barra e o concreto circunvizinho tem importância decisiva quanto à capacidade de carga das estruturas de concreto armado, pois é com o estudo desse fenômeno de aderência é possível determinar-se os comprimentos de ancoragens e emendas de barras de aço. Além deste fenômeno, ocorre ainda o enrijecimento na peça de concreto armado devido à transferência de tensões do concreto para a armadura, definindo o controle da fissuração quando as tensões passam para o estágio 2, de acordo com (FERGUSON (1966), DUCATTI (1993), BARBOSA e MARTINS (1999)) apud BARBOSA (2001).

Conforme descrito pelo ACI Committe 408 (2005) apud Reyes (2009), a tensão de aderência é função da transferência de esforços ao longo da interface barra-concreto, que se modificam de acordo com as solicitações impostas na peça de concreto armado.

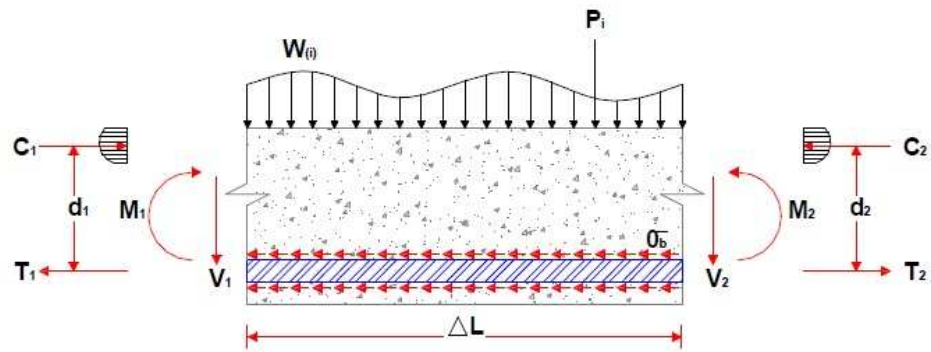


Figura 2 - Solicitações na estrutura e a transferência de esforços internos entre materiais.

De fato, num elemento de concreto armado, exemplificado na Figura 2, as solicitações de momento fletor e esforço cortante, geram tensões que são transmitidas do concreto para a barra de aço pela aderência. Através da equação de equilíbrio, a variação da força longitudinal ao longo da peça é dada pela seguinte equação:

$$\Delta F = T_1 - T_2 = \frac{M_1}{d_1} - \frac{M_2}{d_2} \quad (1)$$

A tensão desenvolvida na superfície aderente da barra devido à variação dos esforços é:

$$\tau_b = \frac{\Delta F}{Area} = \frac{\Delta F}{\phi \cdot \pi \cdot \Delta L} \quad (2)$$

Particularmente, a adesão entre o aço e o concreto é de baixa capacidade resistente, pois esta parcela rompe-se mesmo quando submetida a baixas tensões. Esta situação se verifica com o escorregamento ou deslizamento do aço (deslocamento da barra em relação ao concreto) logo no início do carregamento após rompimento da adesão química, conforme Figura 3.

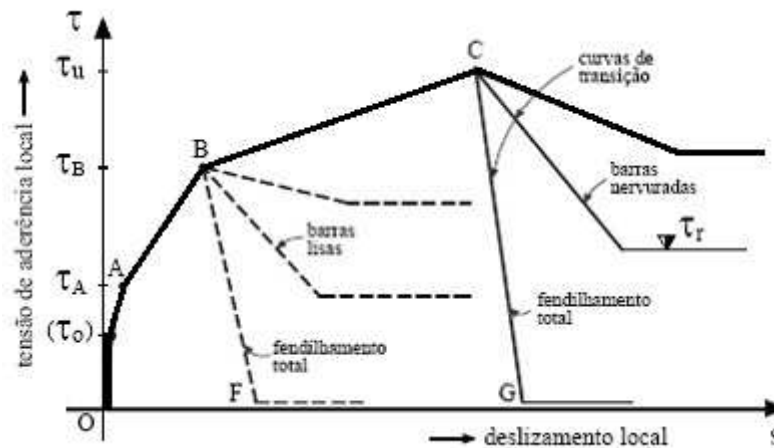


Figura 3 - Modelo Teórico da Curva de Aderência proposta por Tassios (1979) apud Reyes (2009), e Barbosa (2001).

Para melhor compreender o comportamento da ligação, segue análise do gráfico da Figura 3:

- Até a tensão \mathbf{T}_0 não ocorrem deslizamentos e diz-se que a união entre o concreto e a armadura se dá por adesão química. Posteriormente a este ponto, ao se romper esta adesão química, um deslocamento relativo ocorre provocando o surgimento de forças de atrito e engates mecânicos proporcionais com a rugosidade das superfícies. Quando a sollicitação ultrapassa a resistência do material mais frágil, no caso o concreto, ocorrem falhas, percebidas por microfissuras transversais internas, e na curva da Figura 3, pela inclinação em \mathbf{T}_A , ocasionando os primeiros deslizamentos entre o aço e o concreto. Neste estágio ocorre a perda do comportamento elástico e o aumento da carga ocasiona deslizamentos maiores, aumentando os valores das tensões no trecho $\mathbf{T}_A - \mathbf{T}_B$ e a perda de rigidez da peça.
- Com a continuidade do carregamento, para o caso de barras nervuradas, mantêm-se a engrenagem e o atrito (dessa vez, causado pela tendência da nervura de continuar se deslocando) aumentando a fissuração e a expectativa de fendilhamento, quando as características de confinamento não são suficientes. No caso de barras lisas, estas, nesse momento escorregam completamente perdendo sua capacidade de aderência.
- O colapso da ligação resulta por um fendilhamento total da peça de concreto, ou, quando existe confinamento suficiente resulta no deslizamento da barra de aço

nervurada, demonstrada pela curva decrescente após T_u no ponto C. Este estágio geralmente ocorre após um deslizamento da ordem do comprimento equivalente à distância entre nervuras.

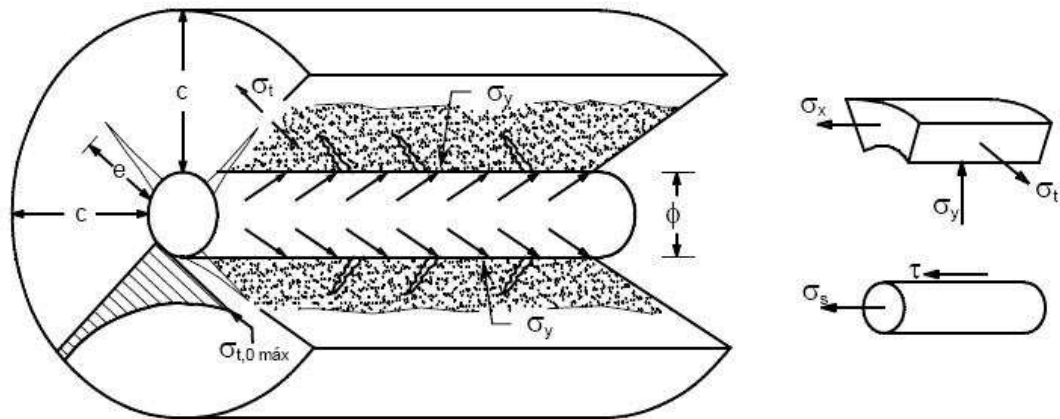


Figura 4 - Esquema de fissuras de fendilhamento, proposta por TASSIOS (1979), *apud* OLIVEIRA (2008).

Conforme o descrito por Goto (1971) *apud* Oliveira (2008), as características das fissuras formadas no concreto que envolve uma barra colocada no eixo de prismas de concreto armado são influenciadas pelo tipo da barra utilizada, lisa ou nervurada. Para as barras nervuradas, as fissuras influenciam ou determinam o mecanismo de aderência entre a barra e o concreto, produzindo fissuração radial, e longitudinal. No desenvolvimento deste fenômeno, primeiramente ocorrem microfissuras transversais na extremidade das nervuras, conforme apresentado pela Figura 4.

A pressão exercida pelas nervuras no concreto circundante é resistida pelas tensões de cintamento. A falha do sistema ocorre como demonstrado pela Figura 5, onde a característica de confinamento direciona o tipo de ruptura, ou seja, quando o concreto não resiste às tensões radiais impostas pelas nervuras da barra, ocorre ruptura por fendilhamento longitudinal, quando existe um confinamento adequado, por presença de armadura ou elevado cobrimento, a ruptura ocorre por cisalhamento longitudinal da superfície de concreto adjacente à barra de aço, caracterizando o arrancamento.

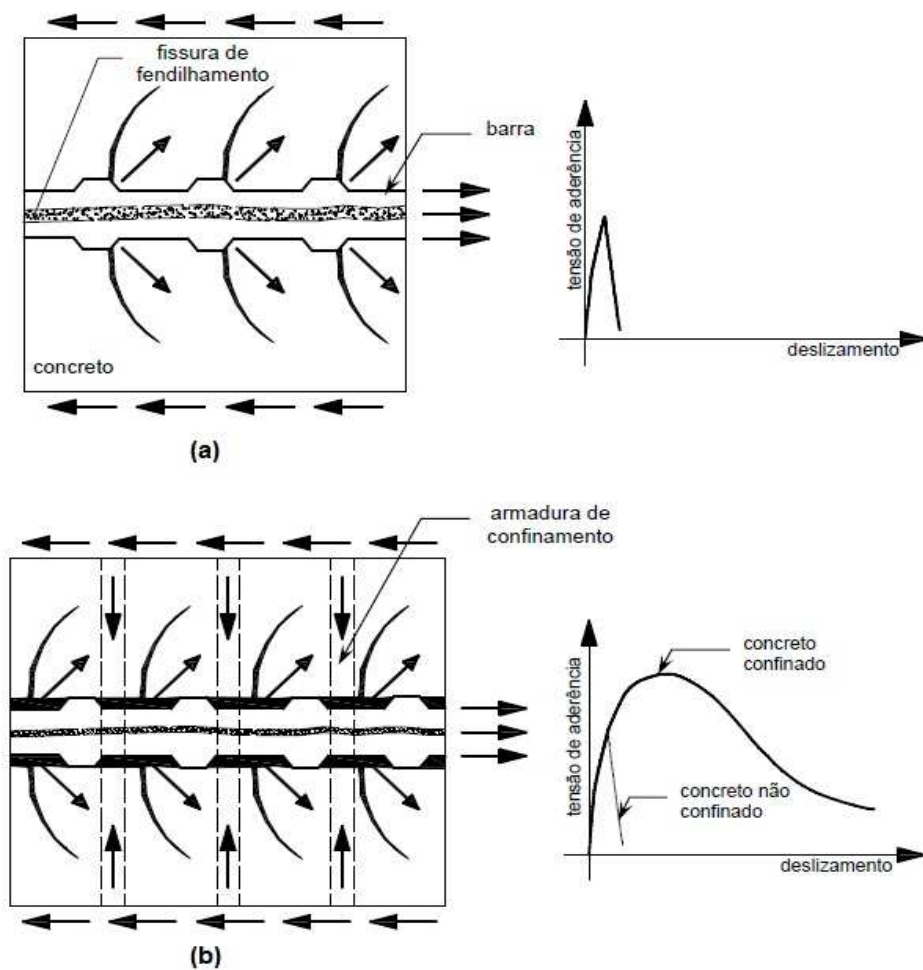


Figura 5 - Tipos de ruptura exposto por Oliveira (2008). (a) Ruptura por fendilhamento; (b) Ruptura por falha na aderência quando concreto confinado.

De acordo com a idéia exposta pela Figura 5, a ruptura por fendilhamento limita a eficiência da aderência, pois ocorre falha no concreto antes de comprometer inteiramente a ligação como ocorre na curva em (b).

Segundo CEB (1990), a relação entre a tensão de aderência e o deslizamento depende de alguns fatores principais, tais como a rugosidade da barra, a resistência do concreto, a posição e orientação da barra durante a concretagem, o estado de tensão, as situações de confinamento e o cobrimento apresentado pela peça em questão. Esta norma fornece uma curva estatística, que pode ser utilizada para avaliar o comportamento da aderência aço-concreto.

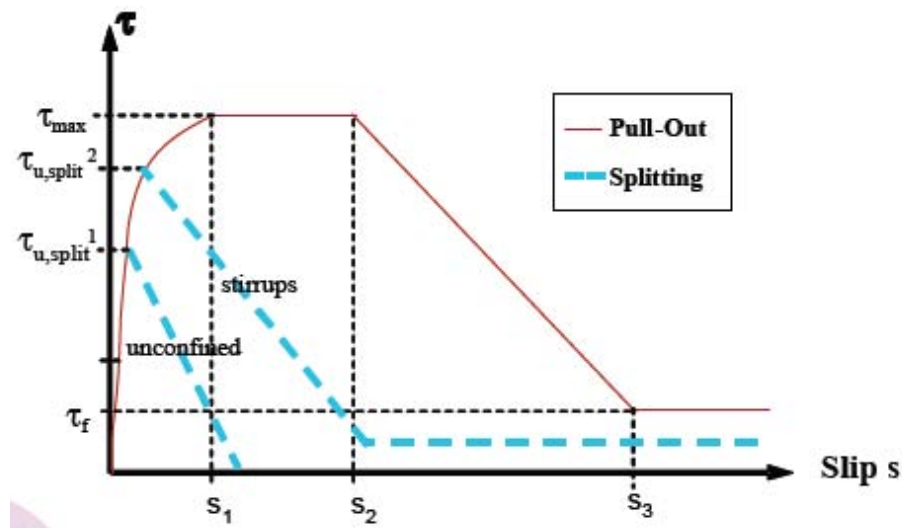


Figura 6 - Relação tensão de aderência x deslizamento, carregamento monotônico CM (2010).

A curva da Figura 6 refere-se ao comportamento da aderência entre a barra e o concreto e possui características semelhantes a curva apresentada na Figura 3, que representa o modelo proposto por Tassios (1979) apud Barbosa (2001). A curva, juntamente com as equações (3) à (6), descreve o modelo de cálculo de tensão de aderência entre o concreto e a barra de aço para o arrancamento e para o fendilhamento no modelo de ensaio adotado pelo FIB/CEB para carregamentos monotônicos.

$$T_0 = T_{\max} (s/s_1)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq s \leq s_1 \quad (3)$$

$$T_0 = T_{\max} \quad \text{para } s_1 \leq s \leq s_2 \quad (4)$$

$$T_0 = T_{\max} (T_{\max} - T_f) (s-s_2)/(s_3-s_2) \quad \text{para } s_2 \leq s \leq s_3 \quad (5)$$

$$T_0 = T_f \quad \text{para } s_3 < s \quad (6)$$

A aderência entre o concreto e o aço é de primordial importância para o funcionamento conjunto dos dois materiais e tem particular relevância em diversos fenômenos de resistência e de rigidez dos elementos de concreto armado e protendido. Estes fenômenos influenciam:

- o controle da abertura das fissuras em peças tracionadas e a limitação da deformação dos elementos sujeitos a flexão e/ou a tração, por mobilização do concreto entre fissuras - “tension stiffening effect”;
- a transferência progressiva das forças ao longo das barras para o concreto quando os esforços de flexão variam ao longo do elemento de concreto armado, contribuindo assim para o mecanismo de resistência ao esforço cortante;
- os mecanismos de transferência das forças das extremidades das barras, tracionadas ou comprimidas, para o concreto, fenômeno que se designa por ancoragem, e a transferência dessas forças entre barras por simples sobreposição dos mesmos no seio do concreto, proporcionando a emenda das barras.

O aço e o concreto possuem a mesma deformação ($\delta_s = \delta_c$) enquanto a estrutura encontra-se comprimida ou não fissurada. Na região fissurada, a tensão é transmitida pelo aço, e o deslocamento do aço (ϵ_s) e do concreto (ϵ_c) são diferentes entre fissuras. Este caso é demonstrado pela Figura 7.

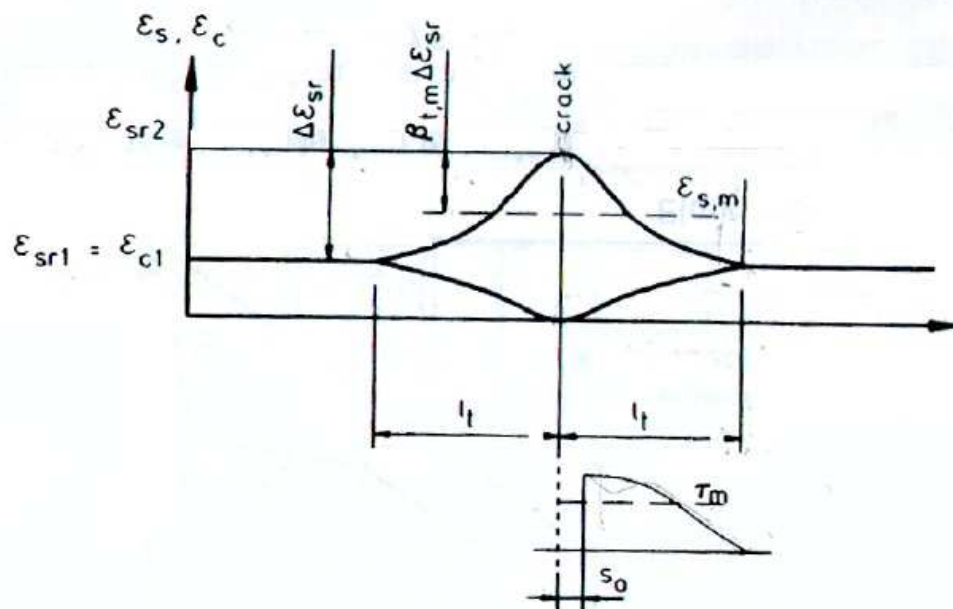


Figura 7 - Esquema do comportamento da tensão desenvolvida no aço e no concreto na proximidade de uma fissura, CEB (1990).

A Figura 7 mostra a variação da deformação do aço em relação à do concreto quando ocorre a fissura. Considerando a deformação do aço igual à do concreto na região não fissurada, e variável nas proximidades da fissura (comprimento l_f), a tensão no concreto tende a cair até chegar a zero no ponto da fissura e a do aço tende a aumentar de forma a compensar a falta do concreto e dar continuidade à transmissão da tensão ao longo da peça fissurada.

No que diz respeito às diretrizes de cálculo, a norma brasileira, NBR6118 (2007), recomenda o uso da equação (3) para a determinação da resistência de aderência das barras, visando a verificação de segurança.

$$f_{bd} = n_1 \times n_2 \times n_3 \times f_{ctd} \quad (7)$$

Onde:

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c = 0,21 f_{ck}^{2/3}$$

$n_1 = 1,0$ para barras lisas

$n_1 = 1,4$ para barras entalhadas

$n_1 = 2,25$ para barras nervuradas

$n_2 = 1,0$ para situações de boa aderência

$n_2 = 0,7$ para situações de ma aderência

$n_3 = 1,0$ para $\Phi < 32$ mm

$n_3 = (132 - \Phi) / 100$, para $\Phi > 32$ mm

A partir destas equações, a NBR 6118 (2007) define o comprimento de ancoragem básico, dado por:

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad (8)$$

Onde:

f_{yd} = Resistência de escoamento de cálculo do aço

ϕ = Diâmetro da barra

A literatura técnica identifica fatores que e influenciam na capacidade de aderência entre o aço e o concreto. Dentre elas:

- A rugosidade da barra, é uma das características mais relevantes, visto que esta oferece o engate entre o concreto endurecido e a barra de aço, que ao ser solicitada produz esforços nos concreto, mesmo após a adesão ser comprometida;
- A resistência do concreto influencia diretamente na capacidade de transmissão de esforços, visto que quanto mais resistente for o concreto, maior será a resistência de aderência do engate entre a barra e o concreto, ainda como expõem Ribeiro (1985), que quanto mais resistente o concreto, menores as possibilidades de fendilhamento, fenômeno ligado à resistência de tração.
- Outro fator de considerável importância é o teor de agregado presente na mistura, quanto maior a quantidade deste, melhor a resistência de aderência, assim argumentam Leonhardt (1983) e Ribeiro (1985). Isto se deve ao comportamento de encaixe que o agregado provoca na massa de concreto. Logo, quando temos uma massa com alto teor de finos, esse encaixe fica reduzido, diminuindo o atrito entre a matriz de cimento e o agregado, de modo a afetar tanto a aderência concreto-concreto quanto a aderência aço-concreto;
- O posicionamento da armadura dentro do concreto oferece condições distintas para o comportamento da aderência. O sentido de concretagem que apresenta melhor comportamento é da barra na vertical ou com distâncias superiores a 60cm da borda superior das peças, (armaduras no fundo das formas possuem melhores condições de aderência que as superiores), assim como a espessura de cobertura que, se elevada, propicia ganho de resistência ao fendilhamento, segundo Ribeiro (1985). As armaduras transversais, também contribuem significativamente contra o fendilhamento e a favor do ganho de resistência por atrito e ao engate mecânico; funcionam como uma fretagem do concreto adjacente à barra de aço;

- O comprimento de ancoragem da barra no interior do concreto favorece uma melhor distribuição de tensões ao longo da interface aço-concreto, resultando em menores concentrações de tensões e elevando a resistência da aderência do conjunto;
- A NRB 6118 (2007) refere ainda a influência do diâmetro da armadura, afetando a resistência de aderência quando a bitola da barra ultrapassa 32mm. Alguns autores, Leonhardt (1977) e Ribeiro (1985) apud Felício (1995) indicam uma influência pouco relevante para tal condição, e que apenas deve ser alertado o fato da peça possuir comprimento de ancoragem e cobrimento proporcional ao diâmetro da armadura, bem como à distancia entre barras e feixes de barras de maneira a evitar acúmulo de tensões.

1.3 Aderência Resina-Concreto-Aço

Neste caso, tem-se um conjunto de três materiais diferentes que devem atender a uma interação monolítica; assim como acontece no concreto armado, é necessário que o aço esteja aderido ao concreto. Devido à alta capacidade adesiva da resina epóxi, a ligação aço-resina-concreto tende a se comportar de maneira eficiente e com alto grau de resistência, quando comparada com a aderência aço-concreto.

Para tanto, é necessário que a resina possua capacidades elevadas de adesão tanto ao concreto quanto ao aço, bem como características de resistência à compressão e à tração compatíveis com os esforços inerentes à ligação.

O comportamento da ligação com resina ocorre de maneira um pouco diferente da verificada com o concreto, uma vez que a resina é um composto químico que apresenta uma alta capacidade de adesão tanto ao concreto quanto ao aço, além de elevada aquisição de resistência em curto espaço de tempo.

O mecanismo de adesão química que ocorre durante a colagem da resina com outros materiais pode ser entendido pela teoria de *Shape-Shanhorme*, descrita por Aguiar (1990), tida como a mais completa, pois além do fenômeno de molhagem das superfícies sólidas, consideram também as aderências mecânica, química, eletrostática, de difusão e de absorção. Esta teoria identifica a aderência pela ótica

do espalhamento da cola sobre a superfície sólida, caracterizado pelo ângulo de contato entre a superfície sólida e a tangente à gota de líquido no ponto de interseção das fases solido-líquido, esta teoria relaciona a tensão superficial da cola com seu espalhamento sobre o sólido.

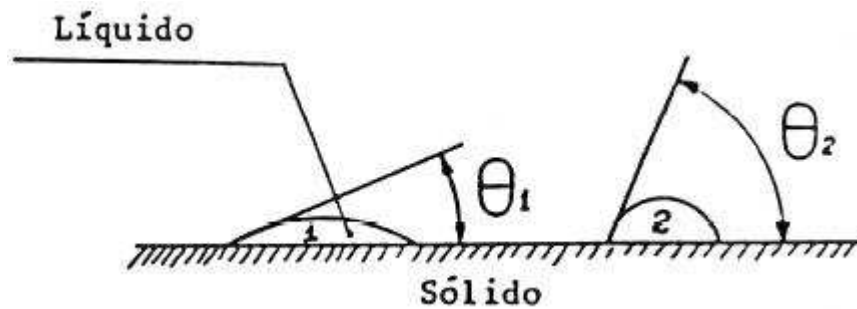


Figura 8 - Interação entre a superfície sólida e o material polimérico para diferentes materiais Aguiar (1990).

Se $\theta_1 < \theta_2$, o líquido 1 se espalha melhor sobre o sólido do que o líquido 2. Portanto, quanto menor for o ângulo de contato, maior é o espalhamento. A tensão superficial σ relaciona-se com o ângulo de contato, através da expressão:

$$\cos \theta = - a\sigma + b$$

onde a e b são coeficientes que dependem da natureza do líquido e do estado das superfícies.

Por outro lado, no gráfico da Figura 9, verifica-se que quanto menor for a tensão superficial maior é o espalhamento. Assim, para superfícies horizontais ou injeção de fissuras a escolha de uma cola com ângulo de contato e tensão superficial baixos é a mais indicada; no caso de superfícies inclinadas ou verticais tal escolha acarretaria no risco de perder demasiada cola e surgirem muitos vazios na interface cola/substrato.

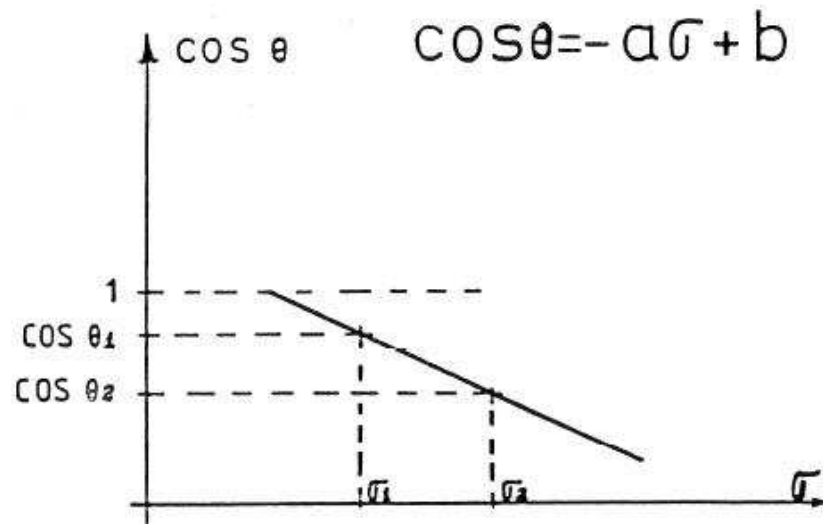


Figura 9 - Tensão de aderência em função do ângulo de contato Aguiar (1990).

A aderência mecânica entre uma cola e uma superfície rugosa é mais resistente do que em uma superfície lisa, devido não só a maior penetração da cola por entre as rugosidades, mas também por ter maior área de contato.

1.4 Polímeros

Os polímeros influenciam significativamente a indústria da construção civil, suas diferentes propriedades permitem uma aplicabilidade em vários segmentos; suas principais aplicações, segundo AGUIAR (1990), são:

- Revestimento de pavimentos – pois apresentam elevada resistência ao desgaste, baixa condutividade térmica contribuindo para isolamento térmico; não sofrem variação volumétrica por umidade e ainda podem assumir diversas formas de acordo com a necessidade, mantendo sua integridade e capacidade de resistência;
- Acabamentos de Interiores – apresentam elevada resistência quando comparados a outros materiais, estes possuem diversidade quanto a textura, moldes, cores, brilho, decoração, dentre outras, e ainda são fáceis de manipular;
- Canalizações – nesse âmbito, pode-se dizer que os polímeros criaram uma revolução tecnológica quanto às instalações hidráulicas, praticamente todos os

sistemas hidráulicos foram substituídos por materiais poliméricos, principalmente devido ao custo ser inferior, a praticidade de instalação e manutenção, resistência quanto à corrosão, flexibilidade e leveza, implicando em reduções de manutenção;

- Colas e vedações – quanto a característica adesiva, os polímeros ofereceram pela primeira vez uma capacidade confiável de aderência por adesão química, e ainda uma gama de aplicações, válida para diferentes tipos de materiais. Além das características de boa aderência e sua flexibilidade estrutural em forma de borracha, agregou-se ainda sua capacidade de vedação, principalmente aplicada na construção civil para juntas, quando se faz necessário um grau de impermeabilidade. As colas são polímeros termorrígidos, enquanto que os mastiques se enquadram em termoplásticos.

1.4.1 Propriedades dos Polímeros

Por se tratar de um componente obtido quimicamente através de uniões de hidrocarbonetos, pode-se esperar uma larga variedade de tipos de estruturas moleculares, as quais derivam diferentes propriedades e características físico-químicas, que podem ser divididas da seguinte maneira:

- Termorrígidos – São aqueles que quando submetidos a uma dada temperatura e pressão amolecem e fluem, podendo ser moldados. Ao reagirem quimicamente, formam ligações cruzadas entre as cadeias, e se solidificam. Novas aplicações de temperatura e pressão não exercem influência no material, tornando-os infusíveis, insolúveis e não recicláveis.

Tabela 1 – Tipos e aplicações dos polímeros termorrígidos Souza (2009)

Termorrígidos	Aplicações
epóxi	Adesivos para concreto e metais, injeção de fissuras, compósitos de fibras de vidro e carbono

poliéster	fabricação de tanques e piscinas de fibras de vidro, tubulações de esgoto, aditivos para concretos, vernizes, tintas eletrostáticas para proteção de estruturas metálicas
poliuretano	acessórios elétricos, vedação, isoladores, vernizes para madeira
resinas fenólicas (polidimetil-siloxano) ou silicones	Tintas com hidrofugantes

- Termoplásticos – São aqueles que quando submetidos a uma dada temperatura e pressão amolecem e fluem, podendo ser moldados. Podem ser remodelados quando novas temperaturas e pressões são aplicadas, o que permite que sejam reciclados.

Tabela 2 – Tipos e aplicações dos polímeros termoplásticos Souza (2009).

Termoplásticos	Aplicações
Polietileno	embalagens, brinquedos, revestimentos de pistas esportivas, vasilhames, lona plástica
Polipropileno	Carcaças de eletrodomésticos, seringas e injeção, peças estruturais, tubos e conexões, fibras para controle de retração e aumento de resistência à tração de concretos.
Poliestireno expandido (EPS) ou isopor	empregado em isolamento térmico de coberturas, preenchimento de juntas de dilatação, em lajes nervuradas, fabricação de concreto leve.
Policloreto de vinila (PVC)	tubulações hidrosanitárias, esquadrias de portas e janelas, revestimentos de cabos e fios elétricos, tintas para estruturas metálicas
Poliacetato de vinila (PVA), látex	tintas para concretos e adesivos do tipo cola branca

Polimetilmetacrilato ou acrílico	Tintas para concreto, placas de sinalização de tráfego, calotas e janelas e avião, lanternas de carro, lentes para projetores, luminárias, painéis
Policarbonato	na substituição do vidro em coberturas e fechamentos translúcidos, chapas compactas e alveolares, telhas
Politetrafluoretileno (PTFE) ou teflon	mantas de tensoestruturas (entra como matriz de fibras de vidro), aparelhos de apoio de pontes

- Elastômeros – também chamados de borrachas, são materiais que na temperatura ambiente podem apresentar deformações muitas vezes superiores ao seu comprimento original, com uma recuperação elástica total quando a tensão é retirada.

Tabela 3 – Tipos e aplicações dos Elastômeros Souza (2009).

Elastômeros	Aplicações
Estireno-butadieno (SBR)	fabricação de concreto polímero
Policloropreno ou neoprene	aparelhos de apoio de pontes, viadutos e outros
Isobutileno-isopropeno ou borracha butílica	mantas poliméricas para impermeabilização e estruturas
Borracha de nitrila	vedações

Em geral, os polímeros apresentam elevadas resistências mecânicas, massa volumétrica, ductilidade, tenacidade, dureza, resistência ao choque, resistência ao desgaste, resistência ao atrito e durabilidade elevada. Quanto às características visuais óticas, podem ser muito transparentes ou opacos e permitem colorir-se facilmente. Podem apresentar baixas permeabilidades ao vapor d'água.

Entretanto, apesar de possuir baixa condutividade térmica, seu elevado coeficiente de dilatação térmica, aproximadamente de 1,5 a 20 vezes a do aço e do

concreto, pode causar incompatibilidade quando utilizado juntamente com outros materiais na construção civil.

Quanto à resistência mecânica, este material pode sofrer grandes deformações por fluência, característica que preocupa quando se procede na utilização de adesivos poliméricos com elevada resistência para transferência de esforços, como indica RIBEIRO (1985).

Alguns polímeros são resistentes a sais, ácidos e álcalis, tendo grande uso em indústrias e estações de tratamento de esgotos, que caracterizam ambientes altamente agressivos. Entretanto, quanto a raios ultravioleta, estes aceleram o processo de envelhecimento dos polímeros e sua decomposição através de reações de oxidação.

Estes adesivos químicos apresentam grande versatilidade para aplicação na construção civil, sendo algumas delas listadas abaixo.

- Capacidade de adesão em larga variedade de materiais, permitindo compatibilidade entre diferentes tipos de materiais;
- Elevada capacidade resistente, contribuindo para o uso em diversas situações de carga e diversos estados de tensões;
- Esse tipo de adesivo não gera expansões volumétricas no processo de cura, evitando fissuração do material de base;
- São materiais no estado de gel ou fluido, que podem assumir formas geométricas variadas e solidificam de maneira eficiente em diversos ambientes;
- Alguns possuem ainda capacidade tixotrópica, e permitem a utilização em diferentes situações, evitando a formação de bolhas de ar ou problemas com perda de material de preenchimento quando instalados em tetos.

1.4.2 Polímeros como cola

Os tipos mais utilizados de polímeros são os fenólicos, o epóxi, os poliuretanos e os poliésteres. Seu uso varia de acordo com os materiais a serem colados e o ambiente que irá atuar.

Polímeros bi-componentes são diferentes de polímeros catalisados. Nos bi-componentes, os Poliuretanos e Epoxidicos, a proporção da mistura oferece resultados muito diferentes, estes constituintes devem ser cuidadosamente misturados com a proporção ideal e homogeneizados completamente durante a mistura para obtenção das características desejadas após o seu endurecimento. Quanto aos catalisados, neste caso os poliésteres, a adição do catalisador tem baixa influencia na propriedade deste após endurecido, controlando apenas a velocidade de reação.

De acordo com Aguiar (1990), para o caso de recuperação estrutural e reparos com colas poliméricas, os do tipo epóxi apresentam-se mais vantajosos, tanto para ambientes internos quanto externos.

1.5 Resina Epóxi

A resina epóxi é um polímero do tipo termorrígido cuja polimerização dá-se pela reação de dois componentes, a resina ou base e um endurecedor. Esta reação dá-se com aumento de viscosidade e é exotérmica. As características principais da resina epóxi, são:

- excelentes qualidades adesivas. Aderem a quase todos os materiais de construção;
- altamente resistentes ao ataque dos ácidos, óleos, álcalis e solventes;
- em geral, apresentam baixa retração, rápido endurecimento e alto grau de impermeabilização.

Suas propriedades podem ser modificadas por uma infinidade de agentes, a fim de melhorar o sistema, como: diluentes, aceleradores ou retardadores do endurecimento, cargas para redução da retração e da fluência, pigmentos, etc.

Portanto o material epóxi utilizado no âmbito da construção civil não está em sua condição físico-química natural, esse material possui aditivos e adições que o modificam para tornar mais eficiente seu uso e aumentar sua trabalhabilidade.

Segundo Aguiar (1990), as resinas epóxi possuem, em sua grande maioria, as seguintes características:

- Aditivos – São considerados produtos que influenciam quimicamente nas características do material base, ou seja, ingredientes reativos.
 - o Solventes – Melhoram a trabalhabilidade, geralmente reativos (preferíveis), entretanto podem ser inertes. Atuam também na fluidez da mistura final do epóxi;
 - o Plastificantes – Influem na diminuição da fragilidade da resina depois de endurecida, influenciando no módulo de elasticidade;
 - o Aceleradores – Interferem na velocidade de polimerização, que se traduz na velocidade de pega da resina e do pot life (tempo de trabalhabilidade). Os aceleradores também se relacionam com os catalisadores, responsáveis pelo início do processo de endurecimento da resina, ou seja, início da reação de pega. É comum que estas resinas sejam do tipo bi-componentes, facilitando sua utilização.

- Adições – São os materiais inertes que afetam a resina. Geralmente constituídos por fibras minerais, de origem calcária ou silicosa, incluídas na mistura para provocar diminuição da retração, da dilatação térmica, ganho de elasticidade, aumento no tempo de polimerização e ainda redução de custo, visto que diminui a necessidade de polímeros para um determinado volume de resina.

Para as fibras de origem silicosa, o índice de finura é muito relevante, já nas cargas calcárias, tanto a quantidade quanto à finura oferecem menos influência na resistência à compressão da resina endurecida. A quantidade máxima de carga mineral adicionável varia com o tipo de epóxi e o mineral em questão. A quantidade de carga adicionável decresce na medida que a finura aumenta. As adições não influenciam na resistência à tração.

Tabela 4 - Comparação entre sistemas de reparação Allen et al (1987).

	Sistemas cimentícios	Sistemas de resina epóxi
Resistência à compressão (MPa)	20 - 70	55 - 110

ódulo de Elasticidade à compressão (GPa)	20 - 35	0,5 - 20
Resistência à tração (MPa)	1,5 – 3,5	9 - 20
Deformação de ruptura ($\times 10^{-3}$)	2 – 3,5	0 - 15
Coefficiente de dilatação $^{\circ}\text{C}$ ($\times 10^{-6}$)	7 - 12	10 - 30
Absorção de água (% peso)	5 - 15	0 - 2
Temperatura máxima em serviço ($^{\circ}\text{C}$)	300	40 - 80
Tempo de desenvolvimento da resistência, a 20°C	1 – 4 semanas	6 – 48 horas

1.6 Normalização e uso de ancoragens com chumbadores adesivos

Chumbadores são elementos de aço usados para transferir ao concreto forças de tração, de compressão, de corte ou corte associado com tração ou com compressão e, atualmente, são cada vez mais utilizados em ligações de peças pré-moldadas de concreto, em ligações entre peças de aço e de concreto, em reforços de estruturas e de fundações, na implantação de arranques de pilares, em acréscimos em estruturas já prontas, etc.

Os chumbadores podem ser basicamente de dois tipos: moldados in-loco, ou seja, instalados na peça antes da concretagem, e pós-instalados, isto é, aqueles que são assentados em furos feitos no concreto. Quanto ao seu sistema de fixação, distinguem-se os pós-instalados fixados por dispositivos mecânicos do próprio chumbador, por adesivos sintéticos ou grautes, que estabelecem a aderência entre o chumbador e o concreto.

No que diz respeito aos chumbadores adesivos, verifica-se até hoje, carência de normalização e de informação técnica para os projetistas. Segundo o artigo de Wollmershauser et al, até 1995 não existiam critérios de qualificação e teste para ancoragem por adesivos. O primeiro modelo, AC01, "Critério de Aceitação para Ancoragens Expansivas em Elementos de Concreto e Madeira" (Acceptance Criteria for Expansion Anchors in Concrete and Masonry Elements) foi reconhecido pela Conferencia Internacional de Validação Oficial de Serviços Construtivos (ICBO ES - International Conference of Building Officials Evaluation Service), que em 1995 foi

substituído pelo AC58, “Critério de Aceitação para Ancoragens Adesivas em Concreto e Madeira” (Acceptance Criteria for Adhesive-Bonded anchors in Concrete and Masonry). Este documento continha os primeiros métodos para realização de testes baseados na ASTM E 1512 (“Métodos para Teste de Desempenho em Aderência de Ancoragens Adesivas”) e no critério para aceitação e qualificação de ancoragem por adesivos para uso estrutural de acordo com os parâmetros do Código de Uniformização de Construção (UBC - Uniform Building Code).

Em 2006, o “Critério para Aceitação de Ancoragens Adesivas Instaladas em Elementos de Concreto Endurecido”, AC308 (Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements) passou a incluir o Anexo D do ACI 318-05 e ACI 355.2-04, que finalmente fornecia parâmetros completos para o dimensionamento de ancoragens adesivas pós-instaladas, assim como para os de fixação mecânica.

Em Novembro de 2009 entrou em vigor uma versão atualizada da AC308 que define, além dos procedimentos de projeto dos chumbadores adesivos, procedimentos de ensaio para avaliação de sua capacidade de carga e controle de qualidade.

O procedimento de projeto do AC308 tem as limitações seguintes:

- - o diâmetro do chumbador (d) não deve ser menor do que 6mm;
- - o diâmetro do furo (d_o) deve ser inferior a $1,5.d$;
- - o comprimento mínimo de embutimento do chumbador (h_{ef}), em mm, deve respeitar a tabela abaixo:

Tabela 5 - Diâmetros de barras e embutimento de instalação recomendada AC308.

d , mm	≤ 10	12,5	16	20	25	32
$h_{ef, min}$	60	70	80	90	100	130

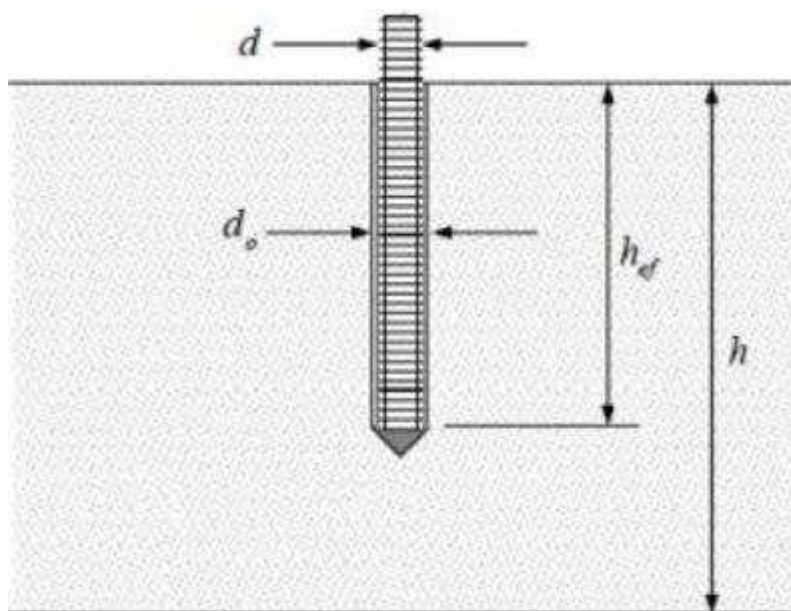


Figura 10 - Chumbador típico para ancoragem.

- - o comprimento máximo do embutimento h_{ef} não deve exceder $20.d$;
- - os concretos deverão estar entre as classes de resistência C20 a C50;

As barras de aço que constituem os chumbadores podem ser lisas, nervuradas ou rosqueadas. Essas barras, nos chumbadores grauteados, podem ter, opcionalmente, um elemento auxiliar de ancoragem na extremidade (headed anchors), assim como uma rosca na extremidade da barra rosqueada.

No Brasil, a norma NBR 14827 (2002), prescreve os métodos para a determinação da resistência à tração e ao cisalhamento de chumbadores de pré-concretagem ou de pós-concretagem, instalados em membros estruturais de concreto ou alvenaria. Esta norma não abrange ensaios combinados ou simultâneos de tração e cisalhamento, nem como ensaios de torção.

A norma brasileira não aborda problemas de segurança associados a seu uso, e transfere para o usuário a responsabilidade de estabelecer práticas apropriadas de segurança e de aplicabilidade de regulamentos e limitações antes do uso.

Conforme esclarece Laranjeiras (2008), os furos no concreto dos chumbadores adesivos são sempre menores do que 1,5 vezes o diâmetro da barra, geralmente 1,2 vezes, de acordo com as especificações dos fornecedores dos

adesivos, enquanto que os furos dos chumbadores grauteados são sempre iguais ou maiores do que 1,5 vezes o diâmetro da barra. A presença de agregados finos, inertes, nos grautes associada às demais diferenças físicas entre os adesivos estruturais e os grautes, exige diâmetros maiores nos chumbadores grauteados.

Os chumbadores adesivos utilizam resinas epóxis ou poliésteres ou sistemas híbridos, associados a agentes catalisadores. No Brasil, dispõe-se de resinas adesivas para esse fim, fornecidas isoladas, sem o chumbador – como, por ex., os “Compound Adesivo” da VEDACIT; os “Sikadur” da SIKA; os “Lokfix” da ANCHORTEC; os “Concresive” da DEGUSSA – e de resinas fornecidas com o chumbador, identificados no mercado por “chumbadores químicos” – como, por ex., os da FISCHER, da ÂNCORA, da HILTII – caso este em que o fornecedor especifica diâmetro dos furos e capacidade de carga prevista para o chumbador.

Os furos dos chumbadores adesivos devem estar limpos e secos, antes da aplicação da resina, pois a presença de água na interface da resina com o concreto prejudica as reações químicas entre o adesivo e o concreto. Após injetado o adesivo, o chumbador é introduzido no furo e a cura se completará em horas, a depender do produto.

Os chumbadores grauteados utilizam dois tipos diferentes de graute: (a) à base de polímeros, nos quais o aglomerante é uma resina epóxi, ou (b) à base de cimento, aglomerante hidráulico. A diferença do graute sintético para os adesivos sintéticos é que o graute tem a adição de agregados inertes, finos. São exemplos os grautes poliméricos, base epóxi: o “Conbextra EPR” da ANCHORTEC; “Sikadur 42” da SIKA; “Masterflow 211” da DEGUSSA, entre outros. Entre os grautes cimentícios, são exemplos: o “Fosgrout Plus” da ANCHORTEC; os “Sikagrout” da SIKA; O “Masterflow 320 Grout” da DEGUSSA.

Os chumbadores adesivos e os grauteados estão sendo questionados no meio técnico internacional, porque, como refere Wollmershauser et al, em seu artigo, apenas recentemente com a ocorrência de um acidente em um túnel de uma rodovia em Boston/EUA, onde o revestimento do teto do túnel entrou em que se percebeu a falta de estudos específicos e direcionados para o comportamento desses adesivos, principalmente quanto ao estudo de longo prazo, visto que o fato gerador do acidente mencionado acima foi identificado como falha por deformação lenta em chumbadores submetidos à carga contínua de tração. Essa avaliação gerou na

comunidade de construtores e projetistas a necessidade de reconsiderar a qualificação, dimensionamento e utilização desses chumbadores em uso que afetem a segurança de utilização do produto final.

Como a maioria das aplicações de chumbadores a tração incluem carregamentos permanentes, essa questão de ruptura por fluência dos adesivos sintéticos merece atenção especial em novos estudos.

1.7 Estudos anteriores sobre ligação com resina

Embora o emprego de chumbadores colados ao concreto seja prática corrente na construção civil, poucos trabalhos científicos foram encontrados na literatura técnica pesquisada. Dentre estes destacam-se os estudos abaixo descritos.

1.7.1 Estudo realizado por SOUZA (1990).

Com o objetivo de comparar o comprimento de ancoragem de barras normalmente embutidas no concreto com barras coladas com resina epóxi, Souza (1990), realizou uma série de ensaios de arrancamento em corpos de prova em forma de H, de modo a facilitar a execução do furo e a colagem da barra de armadura. Os tamanhos foram variados consoante o comprimento de ancoragem testado: 7,5 cm; 10 cm e 15 cm e as dimensões da seção transversal da parte central do H procuraram reproduzir a área de concreto normalmente regulamentada para o envolvimento das armaduras nos elementos estruturais. Foram testados dois diâmetros de barras de alta aderência: 8 e 12 mm. A Figura 11 apresenta as dimensões dos 3 tipos de corpos-de-prova ensaiados.

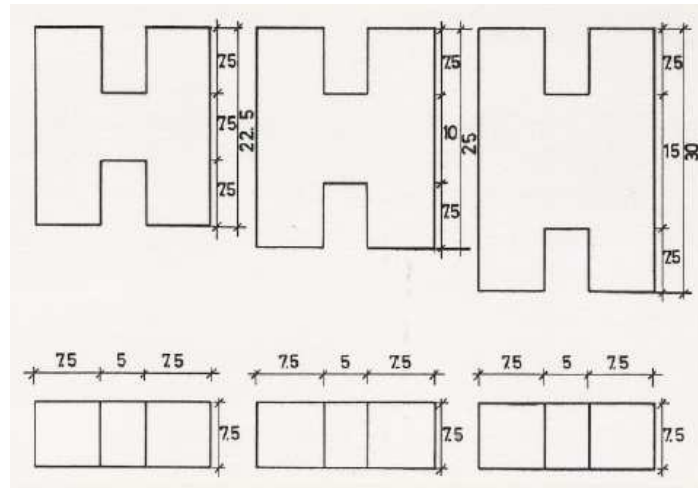


Figura 11 - Dimensões dos corpos de prova ensaiados extraído de Souza (1990).

Foram executadas duas séries de ensaios. Na primeira série, os corpos de prova foram concretados juntamente com as barras – modelos SR (sem resina). Na segunda série, os corpos de prova foram moldados sem as barras e, após completarem 28 dias, foram furados com furadeira de impacto na parte central do corpo de prova. O diâmetro do furo correspondeu ao diâmetro da barra, mais 6 mm. Assim, para os corpos de prova com barras $\varnothing = 8$ mm foram executados furos de 14 mm de diâmetro e para os corpos de prova com barras $\varnothing = 12$ mm, foram executados furos de 18 mm de diâmetro. Após a limpeza dos furos para retirar o pó, e das barras com acetona para retirar resíduos de gordura, procedeu-se à colagem das barras com resina epóxi. A Figura 12 mostra o esquema de ensaio e instrumentação. Na época do ensaio o concreto apresentava resistência média de 40MPa.

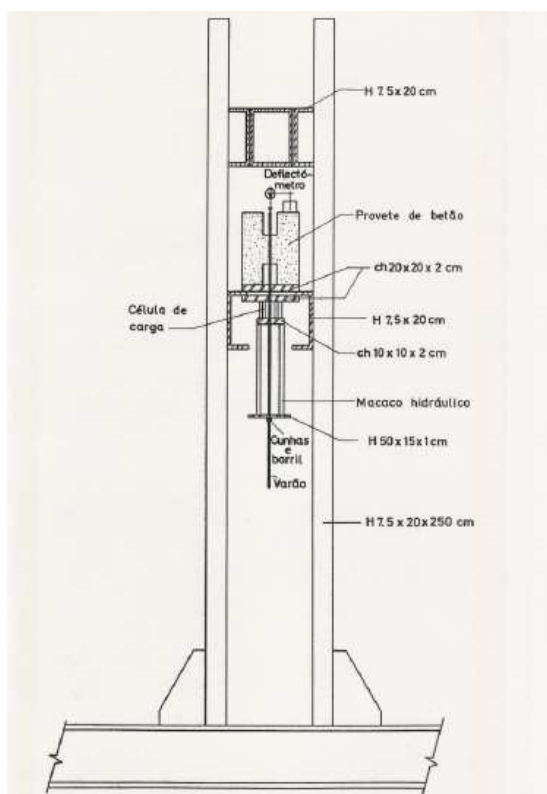


Figura 12 - Esquema da Instrumentação, extraído de Souza (1990).

1.7.1.1 Resultados obtidos

Em ambos os modelos, SR e CR, Souza (1990) verificou que os corpos de prova com barras de 8 mm de diâmetro suportaram praticamente as mesmas cargas que aqueles com barras de 12 mm de diâmetro, porém com maiores tensões de aderência e maiores deslocamentos, conforme mostra a Tabela 6. Na ruptura por arrancamento as marcas das nervuras são “alisadas”; na ruptura por fendilhamento as marcas das nervuras são mais nítidas e o rompimento é brusco.

Nos modelos SR, o tipo de ruptura dos corpos de prova com barras $\varnothing = 8$ mm foi basicamente por arrancamento, enquanto que nos corpos de prova com barras $\varnothing = 12$ mm a ruptura ocorreu, em geral, por fendilhamento. As barras de 12mm promoveram, portanto, uma aderência melhor do que as de 8 mm, sendo nesse caso a resistência à tração do concreto, o fator condicionante da ruptura, de acordo com a autora.

Nos modelos CR os deslocamentos foram muito pequenos e o tipo de ruptura foi caracterizado por fendilhamento do concreto, muitas vezes pelo concreto envolvente na forma de bulbo, com deslocamentos muito pequenos.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de arrancamento, extraído de Souza (1990).

	$\varnothing = 8\text{mm}$						$\varnothing = 12\text{mm}$					
	Sem Resina			Com Resina			Sem Resina			Com Resina		
l (cm)	7,5	10	15	7,5	10	15	7,5	10	15	7,5	10	15
$F_{\text{máx}}$ (kN)	9,7	13,6	25,5	18,3	28,7	38,8	8,7	12,9	20	22,2	21,9	40,4
$T_{\text{ad,máx}}$ (MPa)	5,1	5,4	6,7	9,8	11,5	10,1	3	3,5	3,6	8,05	7,4	7,2
$S_{\text{máx}}$ (mm)	0,8	0,9	1,5	0,04	0,03	0,04	0,3	0,4	0,2	0,01	0,01	0,02



Figura 13 - Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 8\text{ mm}$ ($l = 7,5\text{cm}$), Souza (1990);



Figura 14 - Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 8\text{ mm}$ ($l = 10\text{cm}$), Souza (1990);



Figura 15 - Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 8\text{ mm}$ ($l = 7,5\text{ cm}$), Souza (1990);



Figura 16 - Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 12 \text{ mm}$ ($l = 15 \text{ cm}$), Souza (1990);



Figura 17 - Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 12 \text{ mm}$ ($l = 10 \text{ cm}$), Souza (1990);



Figura 18 - Aspecto da ruptura do modelo CR - $\varnothing = 12 \text{ mm}$ ($l = 7,5 \text{ cm}$), Souza (1990);

A resistência da ligação promovida pela resina epóxi foi tão grande que permitiu a ruptura da barra no modelo $\varnothing = 8 \text{ mm}$, $l = 15 \text{ cm}$.

Nos gráficos força x deslizamento, da Figura 19 e Figura 20 verifica-se que a aderência global, mas sobretudo a parcela referente à adesão (τ_0), aumenta com o aumento do comprimento de ancoragem e com o tipo de ligação. Nos modelos SR a aderência caracteriza-se, portanto, pelo efeito mecânico, enquanto que nos modelos CR a adesão é o aspecto preponderante.

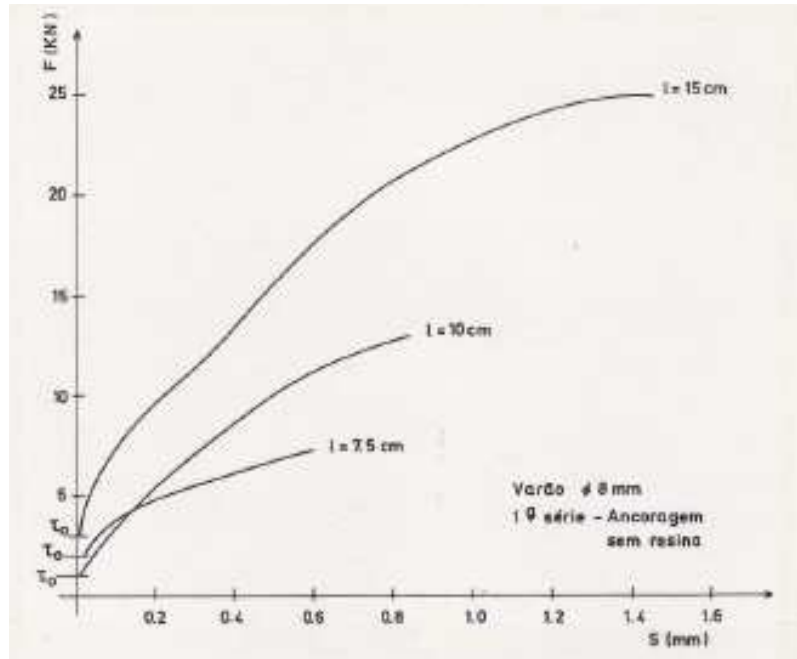


Figura 19 - Força x deslizamento, $\varnothing = 8$ mm, modelo SR, Souza (1990).

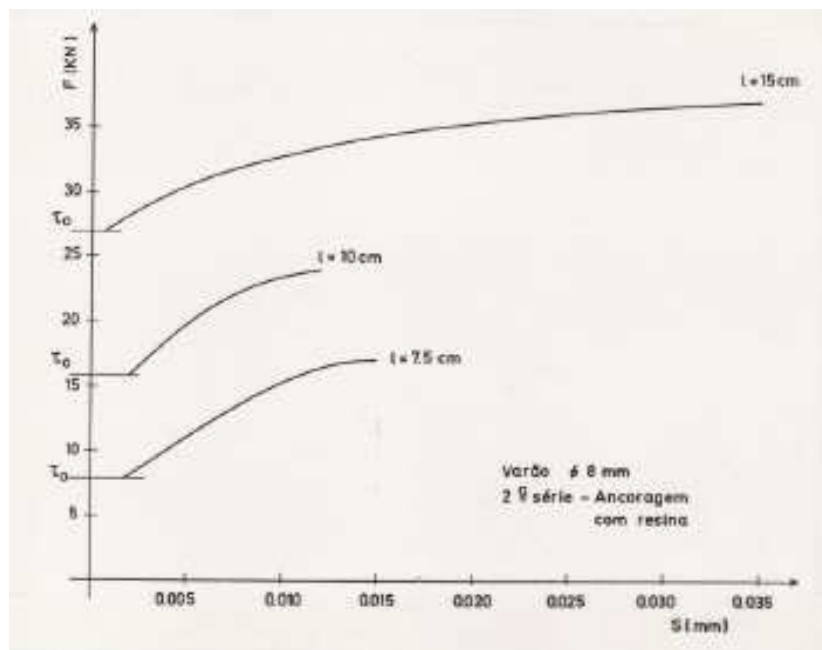


Figura 20 - Força x deslizamento, $\varnothing = 8$ mm, modelo CR, Souza (1990).

Os gráficos da Figura 21 e da Figura 22 relacionam os valores máximos das forças alcançadas para cada comprimento de ancoragem testado e, a partir das retas que melhor se ajustam aos pontos, determinou-se um coeficiente δ que relaciona as resistências das ancoragens com e sem resina epóxi. Conhecendo-se o valor da força atuante na barra e com a equação destas retas é possível estimar-se

os comprimentos mínimos de ancoragem a serem usados para as barras de 8 mm e 10 mm de diâmetro, quando coladas com resina epóxi.

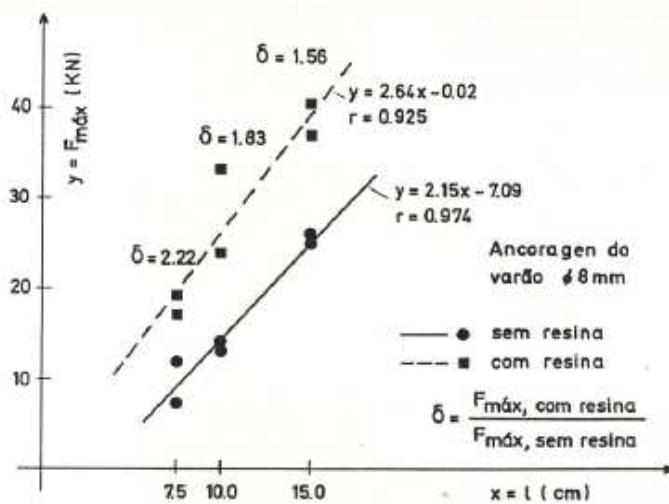


Figura 21 - Força x comprimento de ancoragem, barra $\phi = 8$ mm, Souza (1990).

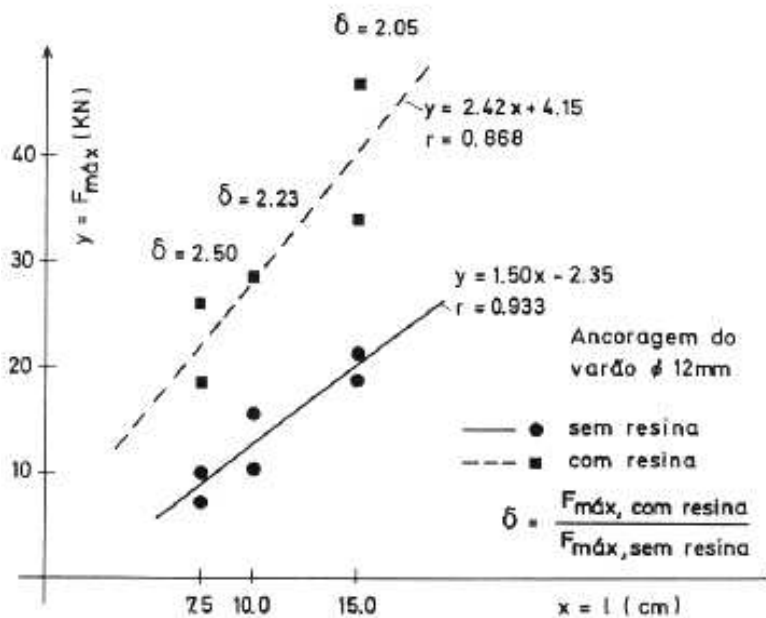


Figura 22 - Força x comprimento de ancoragem, barra $\phi = 12$ mm, Souza (1990).

1.7.1.2 Conclusões do autor

- Os resultados desses ensaios mostraram que a resistência da aderência da ligação com resina epóxi deve-se principalmente à sua capacidade de adesão.
- Com os resultados desse estudo, verificou-se ser possível uma redução considerável dos comprimentos de ancoragem das barras de reforço coladas com resina epóxi quando comparadas às sem resina. As ancoragens com resina epóxi em barras $\varnothing = 8$ mm permitiram uma redução do seu comprimento até 33% e em barras $\varnothing = 12$ mm até 50%, em relação aos comprimentos de ancoragem sem resina epóxi.
- Em relação à técnica utilizada, verificou-se após a ruptura que a presença de pequenas bolhas de ar entre o concreto e o aço não acarretou perdas significativas da resistência da ligação.

1.7.2 Estudo realizado por FELÍCIO (1995)

O estudo teve por objetivo comparar os comprimentos de aderência de armaduras envolvidas por concreto com os comprimentos de aderência de armaduras coladas com resina epóxi. Para tal, foram realizados ensaios de arrancamento em modelos cuja configuração geométrica, apresentada na Figura 1, teve por objetivo minimizar a influência da reação da mesa de apoio da máquina de ensaio e viabilizar a colagem das armaduras com resina epóxi.

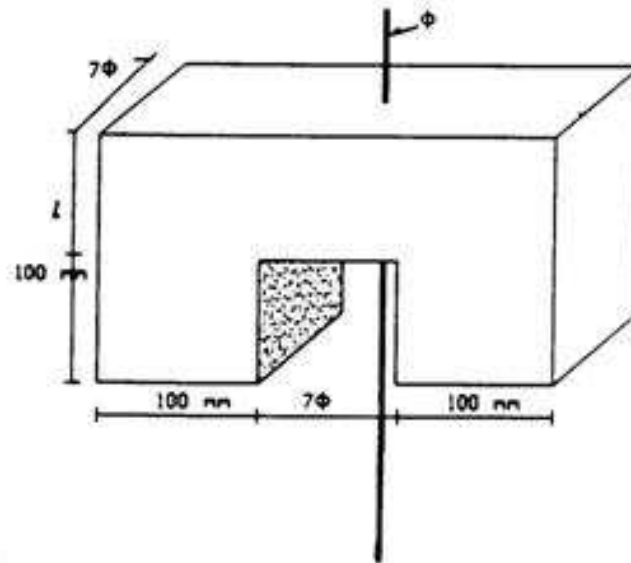


Figura 23 - Modelo experimental adotado por Felício (1995).

Nos modelos estudados foram utilizadas barras de aço do tipo CA 50A com diâmetros de 10; 12,5 e 16 mm, com os respectivos valores de tensão de escoamento (f_{sy}): 620 MPa; 600 MPa e 660 MPa. O valor médio verificado para a resistência à compressão e à tração na época dos ensaios dos modelos foi de $f_{cm,150} = 32$ MPa e $f_{ctm,150} = 2,6$ MPa. Foi utilizada a resina epóxi Sikadur 32, de uso corrente na construção civil.

Para comparação de modelos com diferentes armaduras, as dimensões do modelo foram ajustadas proporcionalmente aos seus diâmetros. Pela mesma razão, manteve-se o comprimento de aderência ℓ proporcional ao diâmetro da armadura. Foram estudados quatro comprimentos para cada diâmetro: 5ϕ ; $7,5\phi$; 10ϕ e $12,5\phi$, onde ϕ é o diâmetro nominal da barra, assumindo valores iguais a 10; 12,5 e 16 mm. Adotou-se um cobrimento de armadura igual a três vezes o diâmetro da barra de aço ($c/\phi = 3$). Para cada modelo foram executados seis corpos de prova, sendo três do tipo SR (Sem Resina) e três do tipo CR (Com Resina). Os modelos do tipo SR tinham a armadura posicionada no momento da concretagem; os do tipo CR foram concretados sem a armadura, sendo esta colada posteriormente com a resina.

Tabela 7 Características dos modelos experimentais, Felicio (1995).

Modelo	Comprimento de Aderência (ℓ)	Diâmetro da barra ϕ (mm)
1	5 ϕ (5cm)	10
2	7,5 ϕ (7,5cm)	10
3	10 ϕ (10cm)	10
4	12,5 ϕ (12,5cm)	10
5	5 ϕ (6,25cm)	12,5
6	7,5 ϕ (9,375cm)	12,5
7	10 ϕ (12,5cm)	12,5
8	12,5 ϕ (15,625cm)	12,5
9	5 ϕ (8cm)	16
10	7,5 ϕ (12cm)	16
11	10 ϕ (16cm)	16
12	12,5 ϕ (20cm)	16

Para a fixação das armaduras dos modelos tipo CR foram executados furos nos corpos de prova com furadeira elétrica de impacto e brocas de vídea, cujos diâmetros variavam entre 1/2" e 7/8". Devido à padronização dos diâmetros das brocas, esta proporcionalidade não foi tão absoluta, chegando-se a uma relação ϕ furo / ϕ barra entre 1,3 e 1,4 especificada, na Tabela 8. Os furos atravessavam toda a extensão do comprimento de aderência; a limpeza dos furos e das barras de aço era feita por um pano umedecido com acetona, a fim de remover todo o pó e gordura existentes em seu interior que pudesse prejudicar a sua aderência.

Tabela 8 - Relação entre os diâmetros dos furos e os diâmetros das armaduras, Felício (1995).

Diâmetro da barra ϕ_b (mm)	Diâmetro do furo ϕ_f (mm)	$\phi_f - \phi_b$	Relação ϕ_f / ϕ_b
10	13,0	3,0	1,3
12,5	16,2	3,7	1,3
16	22,2	6,2	1,4

Após o preparo da resina, os corpos de prova foram posicionados de forma a terem seus furos preenchidos por gravidade e a extremidade inferior do orifício era vedada com isopor, a fim de se evitar a saída do material. Em seguida, introduzia-se a armadura lentamente até sua posição final, com movimentos giratórios para garantir um melhor preenchimento e o mínimo possível de vazios. Posteriormente, completava-se o furo com a resina e vedava-se esta extremidade. Após a colagem, aguardou-se a cura total da resina.

1.7.2.1 Resultados Obtidos

Os resultados dos ensaios mostraram a grande eficiência da resina epóxi como adesivo estrutural e permitiram verificar reduções significativas nos comprimentos de ancoragem das armaduras coladas.

Tabela 9 - Resumo dos resultados de Felício (1995), modelos sem resina.

$\phi = 10 \text{ mm}$				
Comprimento (ℓ)	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F_{ades} (kN)	$S_{\text{máx}}$ (mm)
5 ϕ	2,0	1,3	0,5	0,03
7,5 ϕ	11,8	5,0	5,5	0,20
10 ϕ	15,0	4,8	7,0	0,54
12,5 ϕ	18,5	4,7	10,5	0,46
$\phi = 12,5 \text{ mm}$				
Comprimento (ℓ)	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F_{ades} (kN)	$S_{\text{máx}}$ (mm)
5 ϕ	14,0	5,7	6,0	0,56
7,5 ϕ	11,0	3,0	7,0	0,19
10 ϕ	14,3	2,9	9,0	0,51
12,5 ϕ	31,5	5,1	18,5	0,60
$\phi = 16 \text{ mm}$				
Comprimento (ℓ)	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F_{ades} (kN)	$S_{\text{máx}}$ (mm)
5 ϕ	10,0	2,5	6,0	0,09
7,5 ϕ	22,5	3,7	15,6	0,43
10 ϕ	31,0	3,9	16,0	0,82
12,5 ϕ	36,5	3,6	25,0	0,57

Tabela 10 - Resumo dos resultados de Felício (1995), modelos com resina.

$\phi = 10 \text{ mm}$				
Comprimento (ℓ)	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F_{ades} (kN)	$S_{\text{máx}}$ (mm)
5 ϕ	7,0	4,5	2,0	0,09
7,5 ϕ	28,0	11,9	4,0	0,22
10 ϕ	44,0	14,0	11,0	0,33
12,5 ϕ	41,0	10,4	12,0	0,18
$\phi = 12,5 \text{ mm}$				
Comprimento (ℓ)	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F_{ades} (kN)	$S_{\text{máx}}$ (mm)
5 ϕ	9,2	3,7	2,0	0,07
7,5 ϕ	45,0	12,2	10,0	0,36
10 ϕ	48,0	9,8	17,0	0,15
12,5 ϕ	73,0	11,9	32,5	0,32
$\phi = 16 \text{ mm}$				
Comprimento (ℓ)	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F_{ades} (kN)	$S_{\text{máx}}$ (mm)
5 ϕ	18,0	4,5	4,0	0,07
7,5 ϕ	53,4	8,8	16,0	0,24
10 ϕ	64,0	8,0	27,0	0,27
12,5 ϕ	90,0	8,9	21,0	0,40

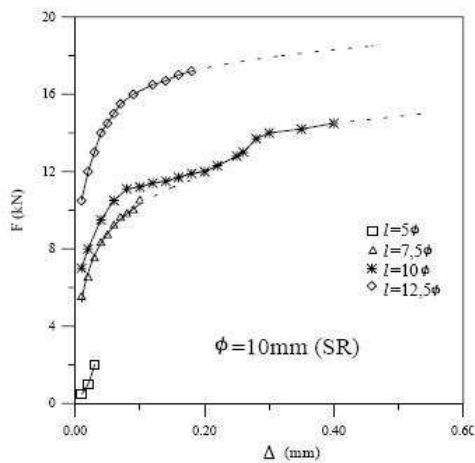


Figura 24 - Gráfico resultados ensaio barra 10mm tipo sem resina, Felício (1995).

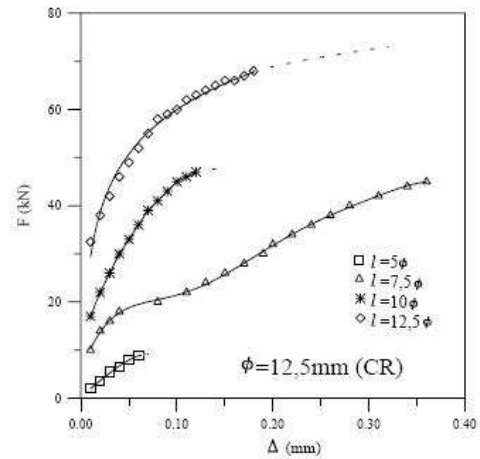


Figura 27 - Gráfico resultado barra 12,5mm tipo com resina, Felício (1995).

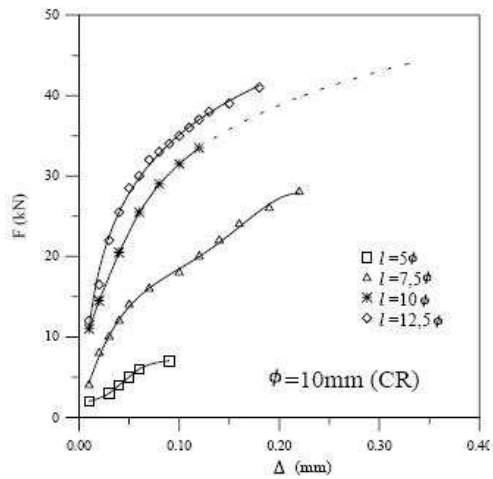


Figura 25 - Gráfico resultado ensaio barra 10mm tipo com resina, Felício (1995).

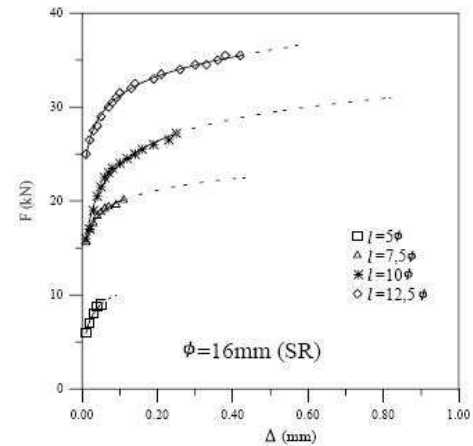


Figura 28 - Gráfico resultados ensaio barra de 16mm tipo sem resina, Felício (1995).

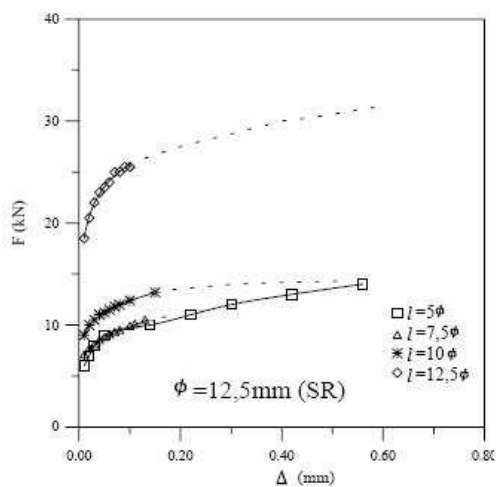


Figura 26 - Gráfico resultado ensaio barra 12,5mm tipo sem resina, Felício (1995).

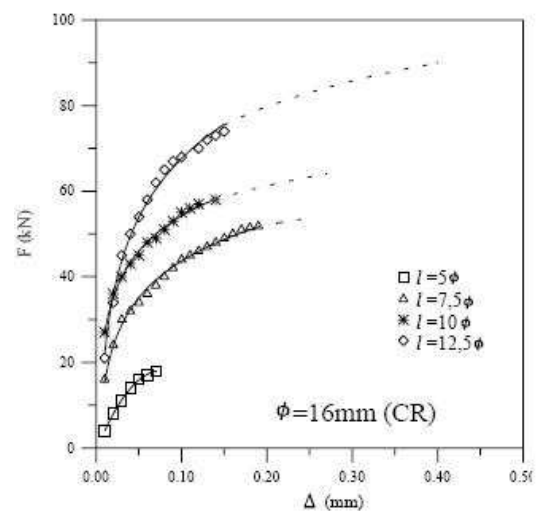


Figura 29 - Gráfico resultados ensaio barra 16mm tipo com resina, Felício (1995).

Com o objetivo de verificar a eficiência da colagem, a autora construiu os gráficos apresentados na Figura 30, na Figura 31 e na Figura 32, que relacionam os valores das tensões normais máximas $\sigma_{smáx}$ nas armaduras com o valor de l/ϕ . Essas tensões normais nas armaduras referem-se à $F_{máx} / \phi_{barra}$ no caso dos modelos sem resina e $F_{máx} / \phi_{furo}$, no caso dos modelos com resina. A análise desses gráficos indica que a colagem com resina epóxi permite uma redução no comprimento de ancoragem de 24% para as barras $\phi = 10\text{mm}$; 42% para as barras $\phi=12,5\text{ mm}$ e 29% para as barras $\phi=16\text{mm}$.

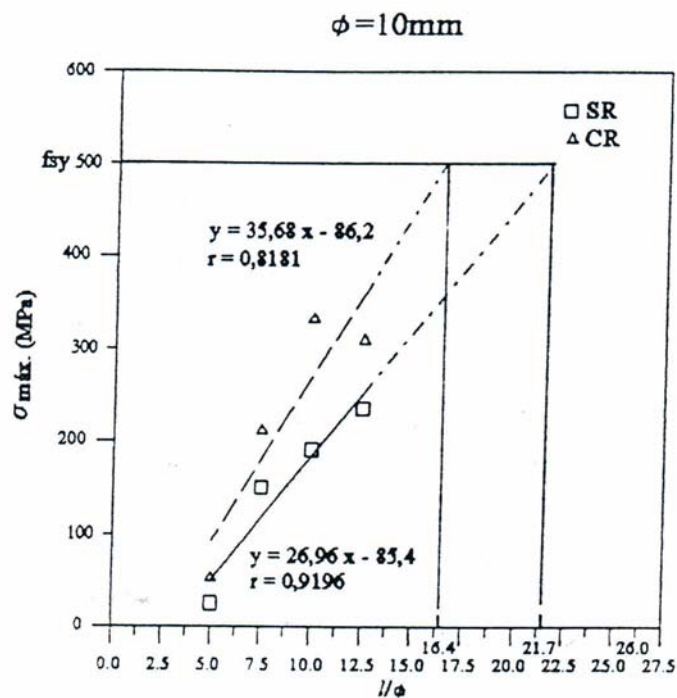


Figura 30- Relação entre a tensão máxima na armadura e l / ϕ sendo $\phi = 10\text{mm}$, Felício (1995).

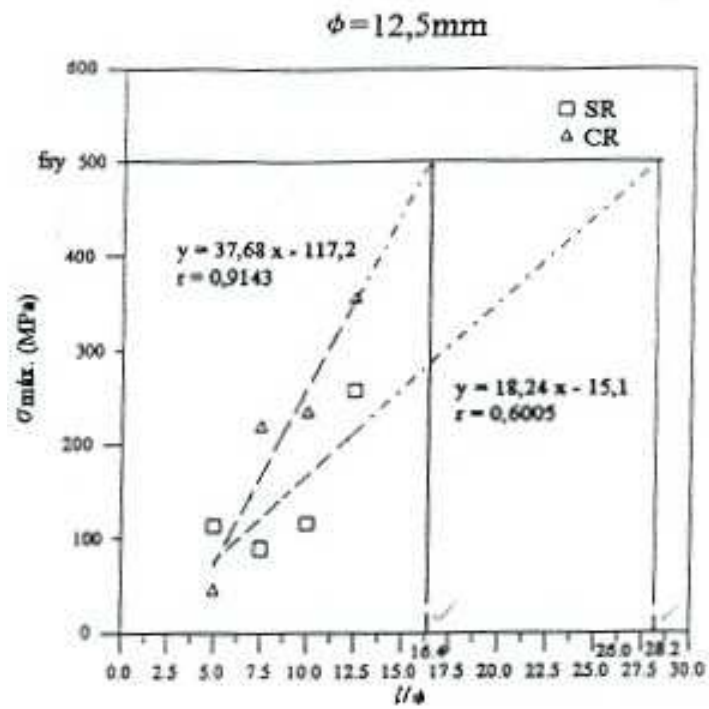


Figura 31 - Relação entre a tensão máxima na armadura e l/ϕ , sendo $\phi = 12,5\text{mm}$, Felício (1995).

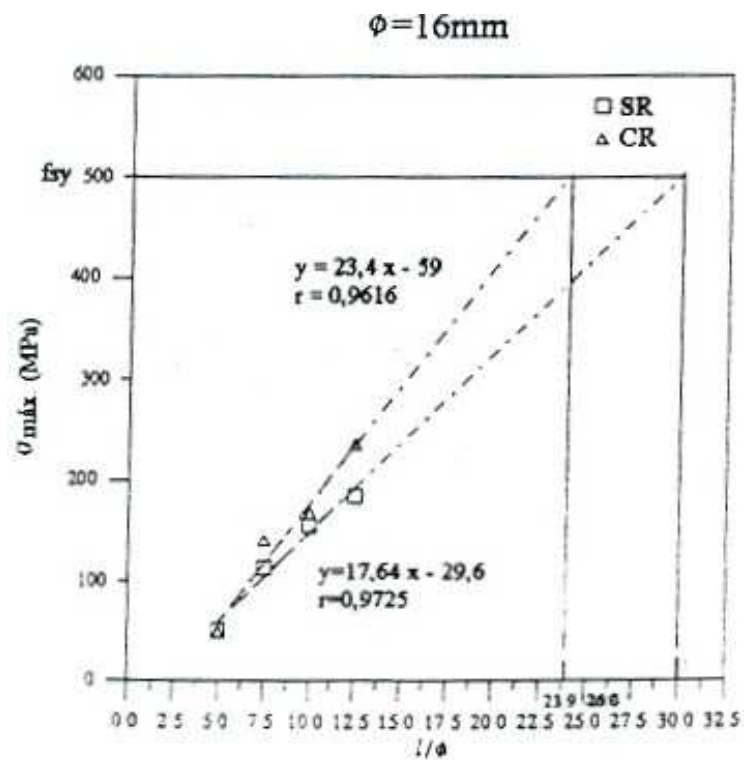


Figura 32 - Relação entre a tensão máxima na armadura e l/ϕ sendo $\phi = 16\text{mm}$, Felício (1995).

1.7.2.2 Conclusões do autor

Todos os corpos-de-prova dos modelos do tipo SR romperam por fendilhamento; a forma de ruptura não variou entre os modelos ensaiados, tendo em vista a proporcionalidade imposta às grandezas do modelo experimental em relação ao diâmetro da armadura.

Nos modelos do tipo CR a ruptura foi brusca, com fendilhamento longitudinal ou cônico do concreto envolvente à barra (cone com a base maior na parte inferior do corpo-de-prova), indicando que a colagem com resina epóxi aumenta a rigidez da ligação aço-concreto. A fissuração de ruptura apresentava-se ora paralela à armadura, ora inclinada, acompanhando o modelo de bielas e tirantes (de baixo para cima, de fora para dentro).

A espessura da camada de resina epóxi na ligação parece ter influenciado nos resultados. Embora a relação $\phi_{\text{furo}} / \phi_{\text{barra}}$ seja aproximadamente igual para os três diâmetros estudados, o valor absoluto da diferença ($\phi_f - \phi_b$) pode ter sido mais significativo para o efeito.

Nos modelos do tipo sem resina, observa-se que, de modo geral e, para um dado diâmetro, maiores comprimentos de aderência acarretam maiores valores das cargas máximas, maiores deslocamentos e tensões de aderência bem próximas.

O mesmo ocorre com os modelos do tipo com resina, com exceção dos deslocamentos, para os quais este comportamento não foi bem nítido.

Os resultados mostraram que o aumento da resistência da aderência promovido pela utilização da resina epóxi na ligação, deve-se à sua grande capacidade de adesão. Tal fato já havia sido observado por Souza (1990), e também por Aggour, Arnaud e Lorrain (1983) apud Felício (1995), em estudos desenvolvidos a respeito da utilização da resina epóxi na ligação aço - concreto.

Observou-se que enquanto a aderência mecânica é grande contribuinte no mecanismo de aderência aço - concreto devido ao trabalho das nervuras, no caso de aço - resina - concreto a adesão da resina epóxi e o atrito desenvolvido entre as superfícies de corte são os grandes responsáveis pela eficácia desta técnica.

Percebe-se também que para os modelos do tipo SR, o início do deslizamento da barra corresponde à perda de adesão, ou seja, à ruptura da

aderência química entre o aço e o concreto, enquanto que nos modelos do tipo CR a ligação é fortalecida pela resina epóxi.

1.7.3 Estudo Realizado por COOK et al (2001)

As ancoragens com adesivos são cada vez mais usadas para efetuar ligações no concreto endurecido. Estas ancoragens, por dependerem de aderência química e mecânica, são suscetíveis a vários fatores adversos que podem ocorrer durante a instalação e a vida útil.

Na ausência de normalização americana sobre esses produtos, os projetistas devem confiar apenas nas informações fornecidas pelos fabricantes. Esta pesquisa teve por objetivo prover base para testes de aprovação de produtos que municiem procedimentos de projeto e que possam ser incorporados ao ACI 318.

O trabalho apresenta resultados de pesquisa para investigar quais fatores tem potencial para influenciar a resistência de aderência de ancoragens com adesivos poliméricos. Tratam-se de chumbadores químicos comerciais. Foram avaliados 20 produtos de 12 fabricantes.

1.7.3.1 Fatores considerados na pesquisa

- Fatores que interferem na instalação:
 - Condições do furo quanto a limpeza e umidade;
 - Resistência do concreto;
 - Tipo de agregado.
- Fatores que interferem após a cura:
 - Período de cura;
 - Temperatura.

Os adesivos poliméricos constituíam-se de resinas epóxi, poliéster e viniléster e possuíam agentes orgânicos e inorgânicos, a saber:

- 14 produtos com resina epóxi: 11 com endurecedores a base de aminoácidos e 3 com endurecedores com base alcalina;
- 6 produtos com resinas ésteres: 3 poliéster e 3 viniléster.

O programa experimental baseou-se na normalização americana e o esquema de ensaios está descrito na Figura 33. Foi construído um maciço de concreto sem armadura na região de ruptura das ancoragens, onde foram fixados os chumbadores com espaçamento mínimo e distanciados das faces do maciço de duas vezes o comprimento de aderência. Foram testados 5 exemplares de cada tipo, sendo que todas as barras eram do tipo roscadas possuíam e 16 mm de diâmetro.

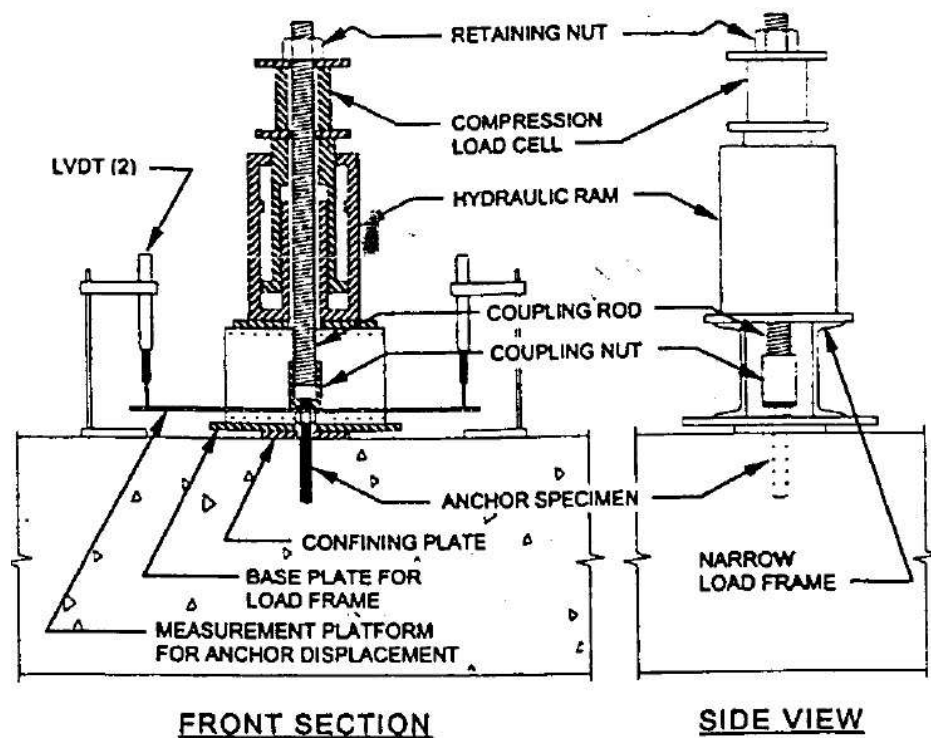


Figura 33 - Esquemática do modelo de ensaio, Cook et al (2001).

A furação foi feita com furadeira, após 28 dias da concretagem, com comprimento de ancoragem de 102 mm. Nas barras roscadas eram introduzidas porcas para acoplamento do sistema de arrancamento, conforme modelo apresentado.

Foram ensaiados exemplares de referência e outros, onde variava-se apenas um dos parâmetros, conforme descrição abaixo:

- Parâmetros que influenciam na instalação:

- Referência: resistência a compressão de 45,7 MPa; cura total do adesivo, ou seja, de 7 dias; os chumbadores eram instalados em furos secos e limpos (pano seco e pincel); o carregamento era aplicado à temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$; o agregado graúdo calcáreo .
 - Condição de furo úmido: após a furação, os furos eram preenchidos com 25 mm de água por 7 dias, e, imediatamente antes da instalação dos chumbadores os furos eram secos com ar comprimido, afim de remover a água do furo e do seu entorno, mantendo apenas a umidade no momento da aplicação do adesivo.
 - Condição de furo molhado: foi feito o mesmo procedimento de preencher o furo com 25 mm de água por 7 dias, entretanto a instalação foi executada sem a remoção da água.
 - Condição de furos não limpo: os furos foram perfurados com comprimento um pouco maior do que os demais, de modo que o pó pudesse acumular-se no fundo. Nada foi feito para limpar os furos, e as barras, quando fixadas, foram suspensas externamente, durante a cura, de maneira a manter o comprimento de ancoragem proposto inicialmente;
 - Variação da resistência do concreto: foram testadas duas classes de resistência – baixa com $f_{c,28\text{dias}} = 29,1$ MPa e alta com $f_{c,28\text{ dias}} = 61,9$ MPa;
 - Tipo de agregado graúdo: substitui-se o agregado calcário pelo seixo de rio.
- Parâmetros em serviço:
 - Tempo de cura: além do tempo de cura total do adesivo de 7 dias, foram ensaiados modelos com tempo de cura de 24 horas.
 - Temperatura: a instalação do chumbador e a cura foram feitas à temperatura ambiente do laboratório, como os demais; depois disso, os exemplares eram transferidos para uma câmara condicionada até alcançarem a temperatura de 43°C , quando então eram ensaiados.

1.7.3.2 Resultado dos ensaios

O autor observou 3 tipos principais de comportamento para os testes efetuados, alguns casos exibiram um comportamento bem definido, com picos de resistência seguido por rápida queda de resistência. Os picos de resistência ocorreram geralmente com deslocamentos da ordem de 1,0 mm ou menos.

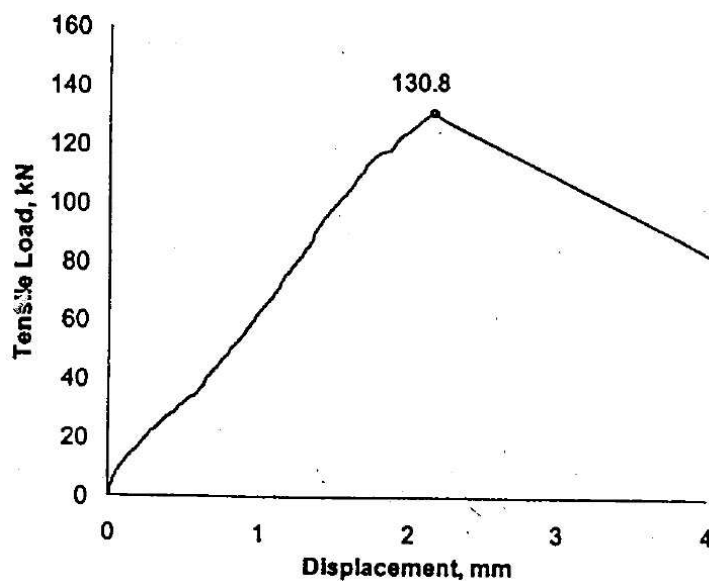


Figura 34 - Modelo típico do comportamento controlado por resistência última, Cook et al (2001).

Outras condições de ensaio não demonstraram picos de resistência, entretanto não perderam rigidez com o incremento de carga após um determinado limite de resistência. .Nestes casos, a ruptura ocorria com deslocamentos da ordem 2,0 mm.

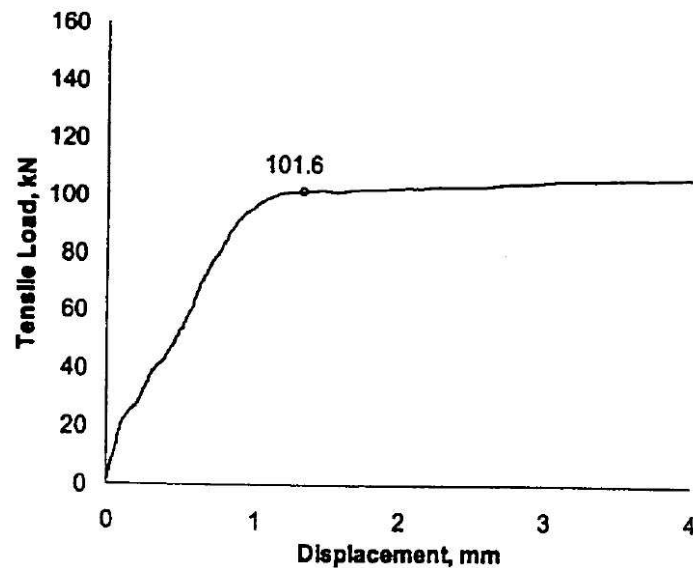


Figura 35 - Modelo típico de ensaio controlado por rigidez, Cook et al (2001).

Um terceiro tipo de comportamento foi observado com deslocamentos elevados e baixas tensões, caracterizado por uma rigidez constante. Não foi observado uma resistência máxima, devido a isto, o autor arbitrou um deslocamento máximo de 2,5 mm para efeitos de comparação de resistência com os outros ensaios realizados.

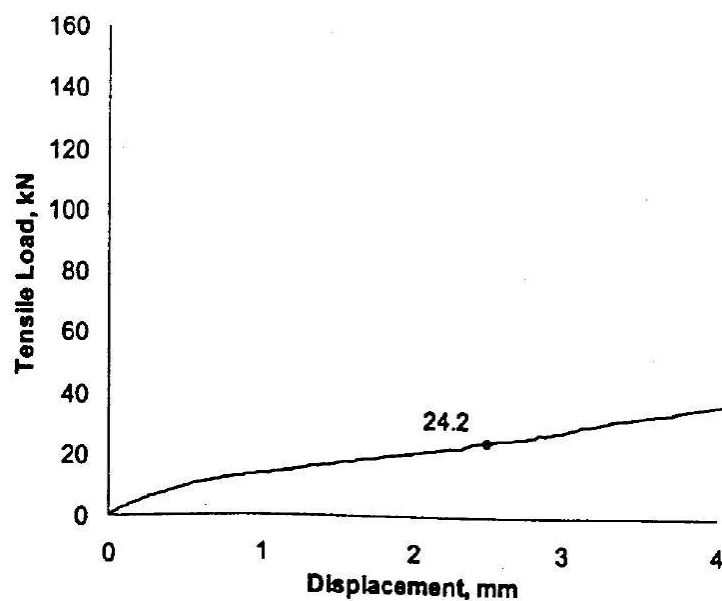


Figura 36 - Modelo típico controlado por deslocamento, Cook et al (2001).

Todos os testes foram conduzidos até a ruptura, entretanto a resistência de aderência foi considerada em relação à carga máxima atingida no ensaio, levando em conta um dos parâmetros citados acima. Foi considerada ainda uma resistência de aderência média entre os espécimes testados de mesmas características. Desta resistência média foi calculada uma tensão de aderência média, baseada em uma distribuição uniforme de tensões na superfície de ancoragem, proporcional a área de interface da barra com o adesivo.

A resistência média de aderência dos chumbadores com epóxi ficou entre 10 e 15 MPa, com um coeficiente de variação de aproximadamente 10%.

Os furos molhados apresentaram resistência de aderência em torno de 43% da resistência de furos secos. Os furos úmidos apresentaram resistência de aderência em torno de 77% da resistência verificada nos furos secos.

Apenas quatro produtos indicaram melhor desempenho em furos úmidos ou molhados que nos furos secos, entretanto, um destes espécimes apresentou resistência de aderência, mesmo nos exemplares padrão, muito inferior a média obtida entre os 20 resultados, logo a margem comparativa é afetada.

Em outros dois casos, o tipo de sistema utilizado para a ancoragem foi o de cápsulas indicadas para furos com presença de água, que, durante sua inserção no furo, expulsa grande parte da água presente. No procedimento de fixação, a cápsula é quebrada pela barra inserida por furadeira, o que promove um aumento de pressão dentro do furo e permite maior contato do material com a superfície do concreto.

Os furos sujos apresentaram resistência de aderência equivalente a 71% da resistência de aderência dos furos limpos.

Não foi verificada nenhuma relação consistente na resistência de aderência dos chumbadores químicos para a variação da resistência do concreto.

A resistência de aderência do seixo foi 39% maior que a resistência apresentada nos exemplares com calcário.

A resistência de aderência dos exemplares com cura de 24 horas foi equivalente a 88% da resistência daqueles com cura de 7 dias.

Os produtos a base de éster apresentaram aumento de 5% na resistência de aderência com a elevação da temperatura.

1.7.3.3 Conclusões do autor

A maioria dos produtos testados, todos comerciais, foram capazes de alcançar uma resistência média uniforme de aderência maior que 12 MPa, não sendo submetidos a fatores adversos. Produtos a base de resina epóxi apresentaram as maiores resistências de aderência, com variações menores que os produtos a base de ésteres.

As condições do furo têm a influencia substancial na resistência de aderência. Furos sujos, molhados ou úmidos apresentaram redução na resistência de aderência.

A resistência à compressão do concreto tem pouca influencia na resistência de aderência de chumbadores químicos.

O tipo de agregado graúdo pode afetar significativamente a resistência de aderência, sendo esta aparentemente inversamente proporcional à porosidade do agregado.

A substituição do chumbador químico à elevação da temperatura de 43°C pode influenciar significativamente a resistência de aderência.

1.7.4 Estudo realizado por COLAK (2001)

Neste estudo, foram utilizados sistemas com resinas epóxi para promover ligações entre o aço e o concreto com alta resistência de aderência. Barras de aço foram coladas em furos perpendiculares pré-executados no concreto, tendo sua resistência de aderência determinada por ensaios do tipo pull-out. Foram avaliados diferentes tipos de adesivos, comprimento de aderência (contemplando 50, 75 e 100mm) e espessura de adesivo entre a barra de aço e o concreto (variando de 1 a 4mm). Foi estudada ainda uma comparação entre a resistência ao cisalhamento de ancoragens com adesivo epóxi determinada por modelos elásticos com os resultados experimentais.

O programa experimental consistiu em análise de quatro tipos de resina epóxi, sendo todos eles com sistemas bi-componentes.

Tabela 11 - Tipo de Resina epóxi, Colak (2001).

Tipo de Resina epóxi	Resina	Agente reativo	Agente de Cura	Finos
EP1	DGEBA	Éter-diglicidílico	Tri-metil metileno hexa- diamina	-
EP2	DGEBA	Éter-diglicidílico	Tri-metil metileno hexa- diamina	Areia
EP3	DGEBA	Éter-diglicidílico	Tri-etileno tetra- amina	-
EP4	DGEBA	Éter-diglicidílico	Tri-etileno tetra- amina	Areia

O modelo do corpo de prova consiste em um cubo de concreto com dimensão de 20cm³, produzido com cimento portland e fator água cimento de 0,55, gerando um abatimento de cone de 11±1 cm. Após cura submersa por 27 dias, estes foram secos em estufa e apresentaram resistência à compressão após 28 dias entre 35 e 45 MPa. Os blocos foram furados com broca de vídia e para remover o material pulverulento foi utilizada bomba de vácuo.

As barras de aço utilizadas foram todas de 10 mm de diâmetro com tensão ultima de 460,91 MPa, e tinham o comprimento adequado, de acordo com o modelo do corpo de prova quanto ao comprimento de aderência. As barras foram limpas com acetona afim de remover resíduos.

A montagem do corpo de prova procedeu-se com o preenchimento do furo com resina epóxi e posterior inserção da barra. Para o sistema epóxi com finos, o diâmetro do furo foi 8mm maior que o diâmetro da barra, oferecendo uma espessura de resina de 4mm. Os espécimes foram curados a 20°C e umidade relativa de 65% por 7 dias, após esse período foram realizados os ensaios de arrancamento conforme ilustrado na Figura 37.

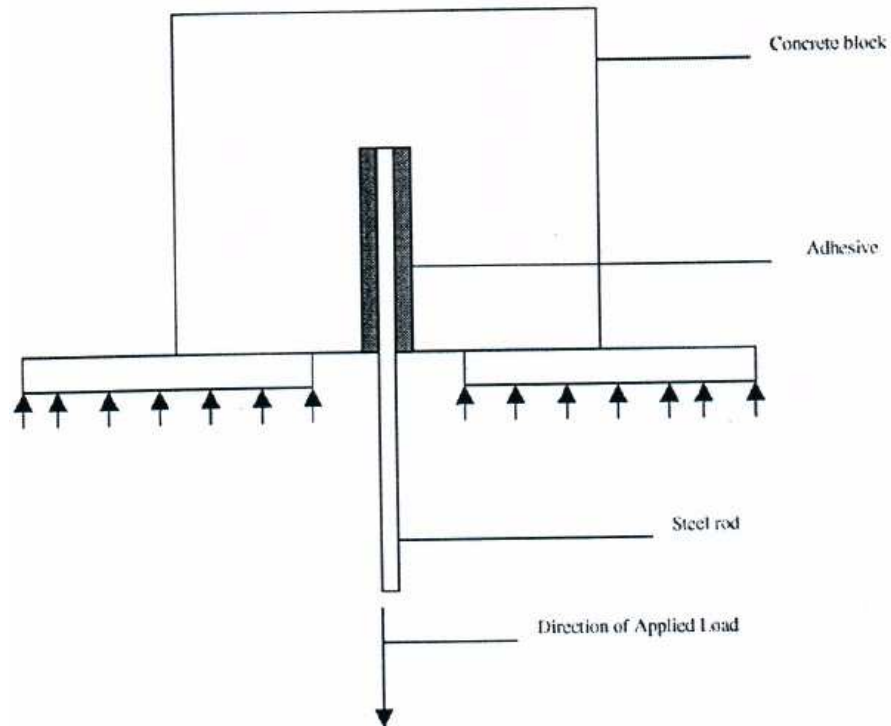


Figura 37 - Modelo experimental, Colak (2001).

1.7.4.1 Resultados dos ensaios

Quanto à variação do comprimento de aderência, estes mostraram curvas com formas similares para as diferentes resinas empregadas. Foi verificado também que o aumento do comprimento de aderência provocou um aumento da resistência da ligação, entretanto este aumento mostrou-se não linear, o ponto de deflexão da curva fica próximo do comprimento de 75 mm, indicando que uma distribuição linear da tensão de aderência não está inteiramente correta para comprimentos de aderência elevados.

O efeito da adição de finos causa, em sua maioria, ruptura na interface entre o aço e a resina. Foi observado também que a resistência da ligação é mantida para concentrações de finos entre 0 e 46% em volume, e que para concentrações superiores a esta a adição de finos demonstrou quedas na resistência mecânica da ligação.

O tipo de resina também influencia significativamente no efeito da adição de finos, diferentes formulações de resinas geram diferentes respostas quanto a resistência a esforços cortantes com a adição de finos.

A espessura de resina, que nos modelos ensaiados variou de 1 a 4mm, mostrou pequenas variações quanto ao aumento de resistência. Os resultados podem ser verificados na Figura 38.

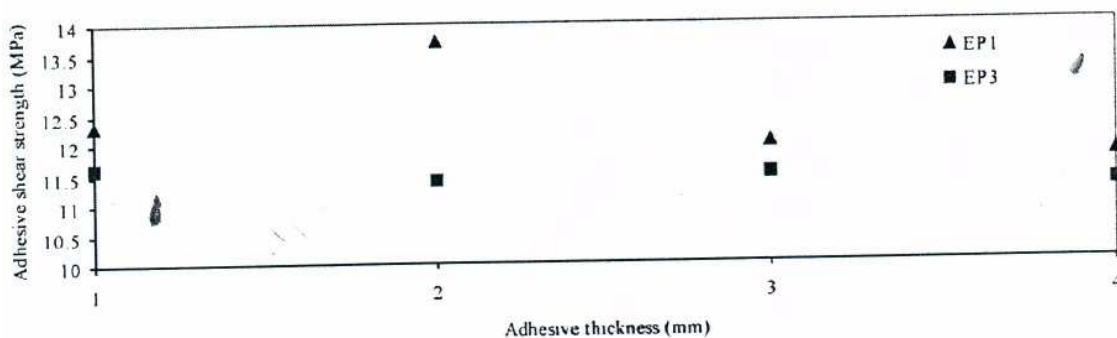


Figura 38 – Efeito da variação da espessura de resina na resistência, Colak (2001).

Pode-se observar ainda o efeito da variação da formulação da resina com a resposta na resistência para diferentes espessuras de colagem. Estes exemplares foram ensaiados sem adição de finos. Para a resina do tipo EP1, a forma de ruptura para espessura de 1 e 2mm ocorreu entre o aço e a resina, semelhante aos modelos com finos, entretanto este modelo se modifica com o aumento da espessura de resina, para 3 e 4mm quando ocorreram rupturas tanto entre aço e a resina quanto no concreto, ou seja após a camada de cola.

Contudo, conforme demonstra a Figura 38, os resultados indicam uma redução na resistência de aderência para espessuras maiores que 2 mm, o que o autor considera ser devido à baixa resistência à tração do concreto. Para a formulação da resina do tipo EP3, a espessura de resina não é de grande importância para seu comportamento.

1.7.4.2 Conclusões do autor.

A capacidade de resistência de barras coladas com resina não aumenta linearmente com o comprimento de aderência, conseqüentemente a utilização de comprimentos elevados torna-se desnecessária.

A presença de finos nas formulações contempla um parâmetro de elevada sensibilidade quanto a sua influência na resistência de aderência da resina, principalmente para as concentrações acima de 46%.

O tipo de resina EP1 demonstrou-se bastante sensível com a variação da espessura de resina utilizada, e apresentou melhor comportamento para espessura de 2mm. A resistência da resina do tipo EP3 se mostrou pouco sensível ao mesmo parâmetro.

Os ensaios de pull-out demonstraram basicamente duas formas de rupturas, em geral apresentando resíduo de cola na superfície do concreto, logo uma falha na interface aço-resina. Entretanto, para aumento de espessura de resina (acima de 2mm) ocorreram rupturas no concreto.

1.7.5 Estudo realizado por COLAK (2007)

Este autor desenvolveu um segundo estudo que visou estudar o comportamento de outro material para a colagem de barras ao concreto, o Metilmetacrilato, (MMA).

Este segundo estudo consistiu em um programa experimental para determinar os efeitos da colagem segundo os seguintes parâmetros:

- formulação de adesivo para a colagem de barras de aço ao concreto, sendo MMA1 resina sem adição de finos de origem mineral e MMA2 resina com adição de finos de origem mineral.
- comprimento de aderência, foram ensaiados espécimes com 50, 75 e 100mm de comprimento de aderência;
- espessura de adesivo, foram consideradas espessuras de 1 a 4mm para os espécimes colados por resina sem adição de finos e de 4mm para os colados por resina com adição de finos;

Tabela 12 - Tipos de resina testados, Colak (2007).

Tipo de Resina epóxi	Resina	Agente de Cura	Finos
MMA1	MMA	Peróxido de Benzoíla	-
MMA2	MMA	Peróxido de Benzoíla	Areia

O modelo do corpo de prova consiste em um cubo de concreto com dimensão de 20cm^3 , produzido com cimento portland e fator água cimento de 0,55, gerando um abatimento de cone de 11 ± 1 cm. Após cura submersa por 27 dias, estes foram secos em estufa, apresentaram resistência a compressão após 28 dia entre 35 e 45 MPa. Os blocos foram furados com broca de vídia e para remover o material pulverulento foi utilizada bomba de vácuo.

As barras de aço utilizadas foram todas de 10mm de diâmetro com tensão ultima de 460,91 MPa, e tinha o comprimento adequado de acordo com o modelo do corpo de prova quanto a comprimento de aderência. As barras foram limpas com acetona afim de remover resíduos.

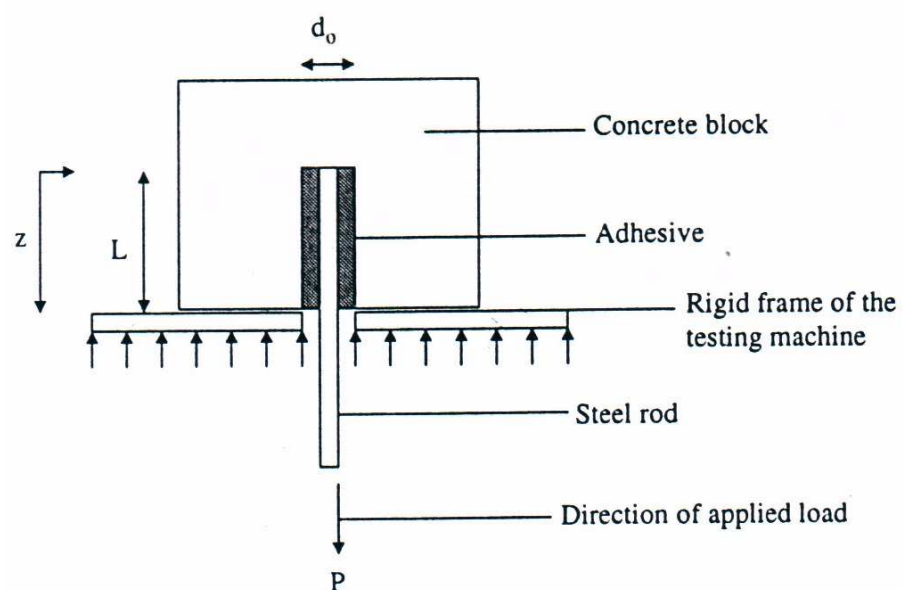


Figura 39 - Modelo de ensaio Colak (2007)

1.7.5.1 Resultados dos ensaios

Quanto a relação entre comprimento de aderência e carga de ruptura, a Figura 40, ilustra esquematicamente o comportamento das ligações com adesivos de baixa viscosidade, como o MMA1. A capacidade da ligação de absorver e transmitir os esforços geralmente tendem a crescer com o aumento do comprimento de ancoragem, entretanto, este incremento linear está limitado para comprimentos abaixo de 75mm, indicando que a distribuição de tensão linear não é a melhor aproximação para os casos de elevados comprimentos de aderência.

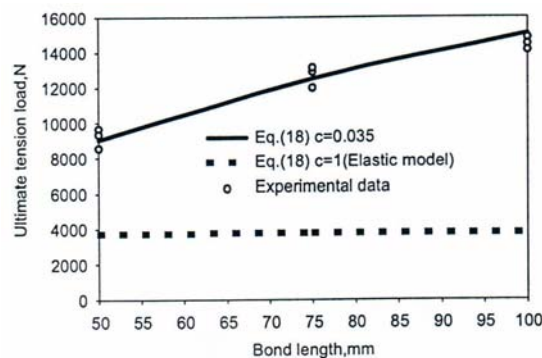


Figura 40 - Relação da carga última com o comprimento de aderência, Colak (2007).

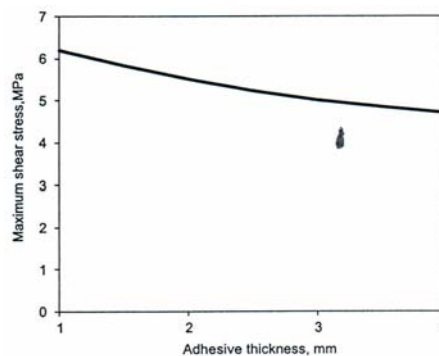


Figura 41 - Relação da carga última com a espessura de adesivo para espécime MMA1, com 50mm de comprimento de aderência, Colak (2007).

Quanto à espessura de resina, os ensaios demonstraram um comportamento que com o aumento da espessura de resina ocorre uma diminuição da tensão última de aderência; este comportamento pode ser observado na Figura 41.

Quanto à formulação do adesivo, não foram observadas modificações significativas quanto a tensão de aderência para as diferentes concentrações de finos adicionados ao adesivo, entretanto, como já foi abordado por COLAK (2002), para concentrações de finos maiores que 70%, ocorre queda significativa da resistência de aderência, conforme Figura 42.

Na maioria dos casos, a ruptura ocorreu na interface entre a resina e o aço.

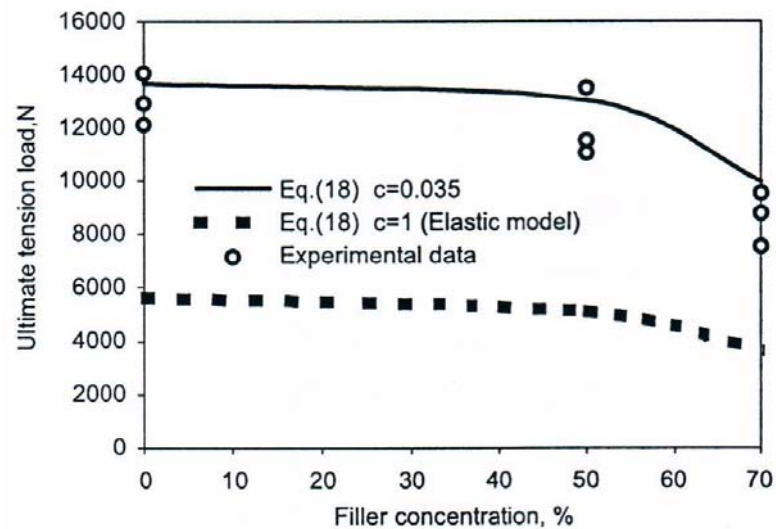


Figura 42 - Variação da tensão de aderência contra a concentração de finos para o modelo com MMA2, comprimento de aderência de 100mm e espessura de resina de 4mm, Colak (2007).

1.7.5.2 Conclusão do autor

O autor verificou que a distribuição linear de tensões só é válida para pequenos comprimentos de aderência (50mm) e que para comprimentos maiores deve ser usado um modelo elástico particular, conforme apresentado na Figura 40 e na Figura 42.

O autor verificou ainda que a tensão de aderência máxima depende da espessura do adesivo e da formulação da resina.

1.7.6 Estudo realizado por BOUZAOU (2008).

Recentemente, outro estudo relacionado à aderência de barras de aço ao concreto por colagem com epóxi foi desenvolvido, estudado por BOUZAOU (2008).

Com objetivo de elevar a capacidade de resistência de aderência na ligação aço-concreto foi inserido um adesivo que funciona como ligante na interação superficial da barra com a superfície do concreto. Um programa experimental foi adotado utilizando ensaios do tipo pull-out com o objetivo de investigar a qualidade da adesão na interface dos materiais, bem como o comportamento do concreto e da barra de aço e o desenvolvimento da tensão de aderência ao longo do comprimento de ancoragem. Este trabalho apresenta também uma revisão bibliográfica de modelos teóricos aplicados ao estudo da aderência do concreto à materiais compósitos com fibras poliméricas e apresenta o seu próprio modelo teórico.

Segundo o autor, o fenômeno da aderência de barras de aço em matriz de concreto já foi exaustivamente estudado quanto à capacidade de aderência e das propriedades relacionadas às suas interfaces, entretanto, estes estudos foram pouco aplicados à situações de colagem de barras de aço no concreto por meio de adesivos. Por esse motivo, seu estudo pretende analisar o comportamento da mecânica da ligação entre o sistema aço-concreto interligados por meio da resina epóxi.

O programa experimental desenvolvido consistiu em determinar a influência de parâmetros tais como o diâmetro da barra, o comprimento de aderência e a superfície de contato na resistência ao cisalhamento e na distribuição das tensões ao longo do comprimento da barra, utilizando o sistema do ensaio pull-out. Como variáveis foram estudados: o diâmetro da barra e o comprimento de ancoragem, distribuídos da seguinte forma:

- Barra de 12mm: Comprimentos de 100, 150, 200, 250 e 300mm;
- Barra de 16mm: Comprimentos de 140, 210 e 280mm;
- Barra de 20mm: Comprimentos de 140, 210 e 280mm.

Em todos os modelos, as barras de aço foram coladas com resina epóxi, com espessura constante de 1mm. As características dos materiais utilizados estão descritos a seguir:

- - Aço S275 ; $f_{sy}=340\text{MPa}$; $E_s = 198\text{ Gpa}$
- - Concreto com $f_{c,28} = 40\text{MPa}$; $f_{ct,28} = 3,3\text{ MPa}$; $E_c = 37,8\text{ GPa}$
- - Resina epóxi à tração: $E_a = 3,6\text{ GPa}$; $\sigma_a = 22\text{MPa}$

O modelo físico adotado segue detalhado na Figura 43; trata-se de um cilindro de 320mm de comprimento e 160mm de diâmetro.

A instrumentação consistiu na aplicação de um LVDT para leitura dos deslizamentos e de dois extensômetros posicionados na barra de aço à distância de 15mm e 85mm do topo do corpo de prova, com o objetivo de avaliar as deformações da barra durante o carregamento. O carregamento foi aplicado de forma crescente e contínua até a ruptura do corpo de prova.

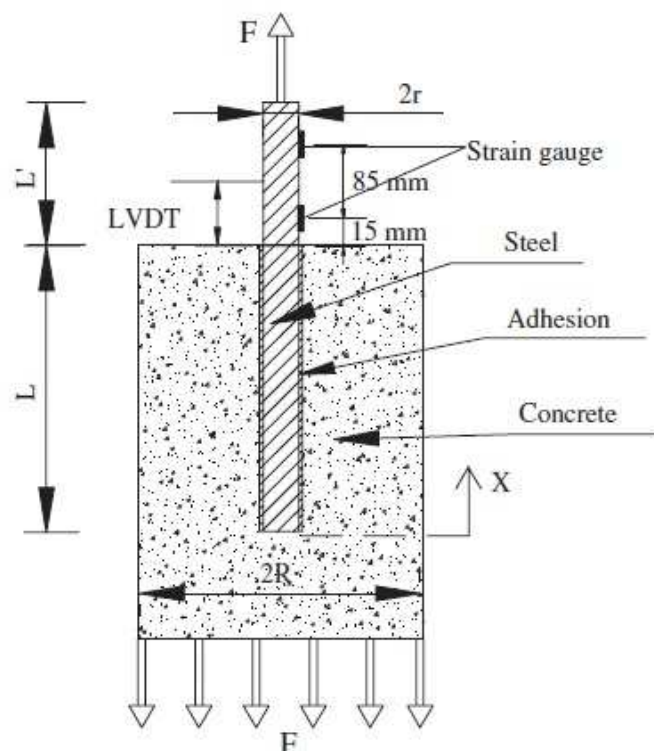


Figura 43 - Esquema de ensaio utilizado por Bouazaoui (2008).

1.7.6.1 Resultados obtidos

Dentre os resultados obtidos para os modelos sem colagem com apóxi, destacam-se:

Quanto ao comprimento de aderência, foram comparadas as cargas últimas atingidas pelos ensaios. A Figura 44 mostra que houve um incremento linear entre a força máxima atingida e o comprimento de ancoragem, conforme equação da reta indicada na Figura 44. O aumento do comprimento de aderência leva a maiores cargas últimas;

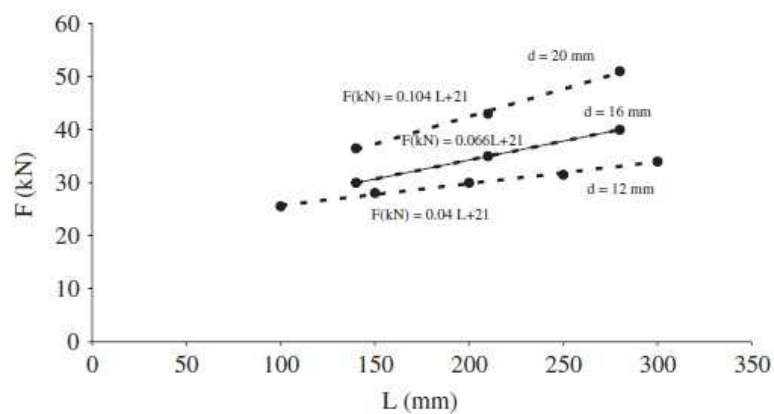


Figura 44 - Relação força última x comprimento de aderência, Bouazaoui (2008).

Quanto ao diâmetro da barra, foram comparados diferentes diâmetros para um mesmo comprimento de aderência, desses resultados foi observado um incremento linear para a resistência última de acordo com o aumento do diâmetro, mostrado na Figura 45;

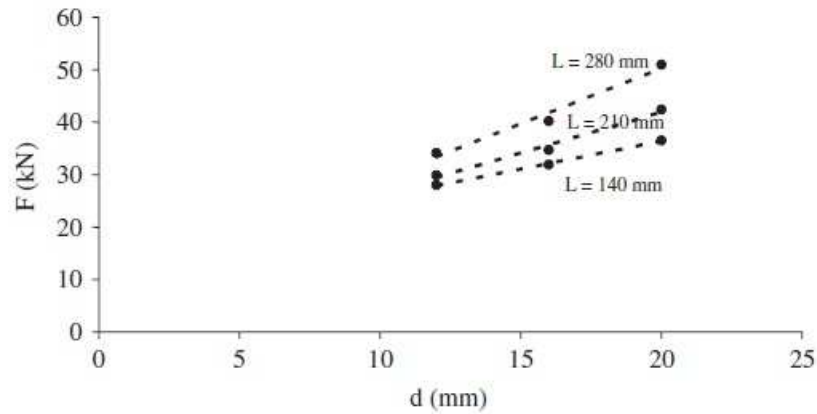


Figura 45 - Relação força última x diâmetro da barra para um mesmo comprimento de ancoragem, Bouazaoui (2008).

Foram comparados todos os espécimes, independente do comprimento de ancoragem e do diâmetro da barra, levando em conta apenas a superfície de aderência, que consiste na área superficial da barra em contato com o concreto, capaz de transmitir esforços, definida pelo perímetro da barra vezes o comprimento de aderência. Desse comparativo obteve-se o resultado demonstrado na Figura 46, onde vê-se que a força resistente máxima aumenta com o aumento da superfície de aderência.

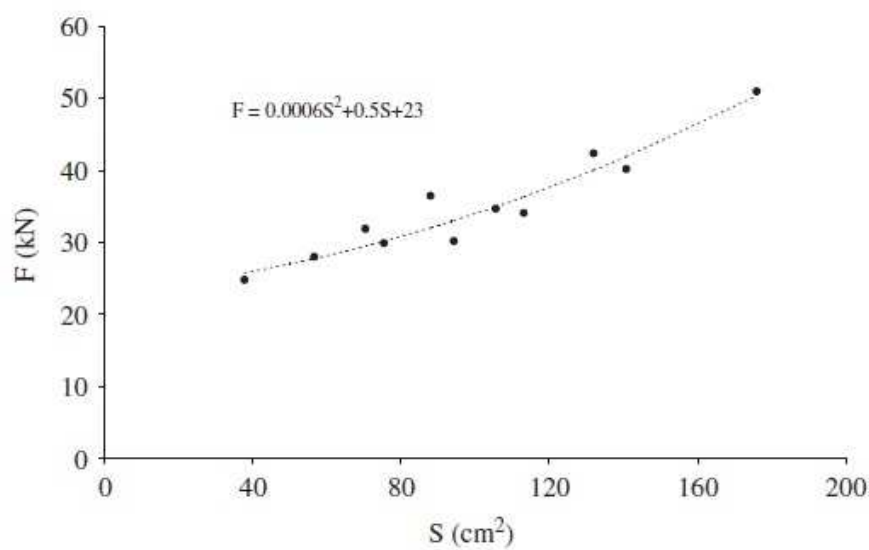


Figura 46 - Relação força última x superfície aderente, Bouazaoui (2008).

A comparação entre os modelos com e sem resina está apresentada na Figura 47, onde vê-se que a força máxima resistente aumenta significativamente para o caso das ligações com resina.

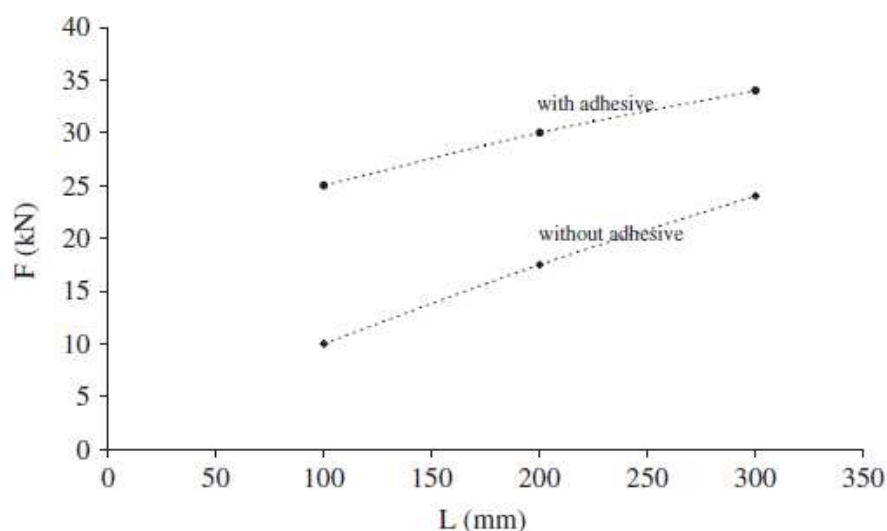


Figura 47 - Comparação de carga última de resistência entre o modelo com e sem resina, Bouazaoui (2008).

Quanto ao modo de ruptura, foram observados: o fendilhamento do concreto, o deslizamento da barra de aço e a ruptura da barra de aço.

1.7.6.2 Conclusões do autor

O uso de adesivos na ligação de barras de aço ao concreto incrementa significativamente a resistência da ligação, assim como a distribuição de tensões cisalhantes e de tração ao longo da superfície de aderência.

A força última aumenta linearmente com o diâmetro da barra e com o comprimento de ancoragem; entretanto, esta força aumenta parabolicamente com o aumento da superfície aderente.

As fissuras iniciam-se no interior do concreto na interface dos materiais e posteriormente se propagam longitudinalmente e transversalmente.

1.8 Reforço e recuperação de estruturas

No momento em que ocorre a execução de uma peça de concreto e inicia sua pega, esta já se encontra submetida às condições de temperatura, umidade e desgaste do meio ambiente. Com isso, suas características passam a depender desses fatores e sua vida útil estará limitada de acordo com a severidade desses agentes e dos cuidados previstos em projeto para esta peça.

Quando a capacidade da estrutura atinge um nível crítico de deterioração, deve-se proceder a uma intervenção de recuperação ou reforço, dependendo das necessidades, ou seja, do estado de deterioração ou de alteração de utilização que podem interferir nas condições portantes das peças.

São inúmeros os métodos de intervenção que podem ser aplicados em recuperação e reforço estrutural. Geralmente a escolha da solução deve considerar além de aspectos técnicos, a viabilidade de execução, os materiais disponíveis, o custo e o cronograma da obra.

Outro aspecto importante a considerar é a influência do reforço de um determinado elemento nos demais componentes da estrutura. Ao se enrijecer uma viga, por exemplo, pode-se mudar significativamente suas reações, vindo a comprometer os pilares nos quais se apóia. Deve-se ainda, utilizar materiais com boa durabilidade, baixa permeabilidade, boa resistência, boa aderência ao concreto e ao aço, baixa retração, boa trabalhabilidade e propriedades compatíveis com o concreto e o aço, visando garantir a eficiência do processo de reforço.

Segundo TEATINI (1990), a recuperação e reforço visando aumento ou manutenção de resistência estrutural, o método de adição de barras e concretagem in loco das superfícies estruturais danificadas ainda é preferível quando comparadas com outros métodos, principalmente sob efeito das condições abaixo indicadas:

- Quando o volume de recuperação exigido é inadequado para concretos jateados;
- Para reparação de concreto danificado pela corrosão de armadura, particularmente se a extensão da superfície de reparo e sua natureza não se aplicarem a concretos jateados;
- Visando a proteção de barras de aço contra corrosão pela recuperação do ambiente alcalino, similar ao concreto original;

- Em áreas onde o reparo deve contribuir para suporte estrutural em altas temperaturas;
- Quando o produto final deve acompanhar a arquitetura de concreto aparente;
- Principalmente, quando existe a carência de profissionais qualificados, pois este método se assemelha ao tradicional concreto in loco, facilitando o entendimento da tecnologia aplicada pelos trabalhadores de modo a evitar materiais e técnicas especiais que requeiram maiores cuidados.

Dessas observações deve-se avaliar ainda a boa aplicabilidade da técnica, pois ela também possui suas limitações, como é o caso de superfícies com pequenos volumes de concreto, comprometendo a aderência do concreto antigo com o concreto fresco.

Um dos casos de maior ocorrência é de barras de aço corroídas por processo de oxidação. Quando as peças apresentam estas características em estado elevado, é necessário proceder a substituição da barra danificada por uma barra íntegra. Para este tipo de intervenção são apresentadas diversas soluções, dentre as quais destaca-se a colagem de barras com resina epóxi no concreto remanescente, afim de obter-se ancoragem necessária para a nova armadura, geralmente limitada pelas dimensões do reparo.

As ancoragens químicas mais comuns são baseadas em polímeros que fixam uma barra de aço ou pino de ancoragem ao concreto. A fixação ocorre em geral por um furo executado no concreto com diâmetro superior a do pino ou da barra em questão, que segundo Aguiar (1990) deve ser 3 mm superior ao diâmetro da barra.

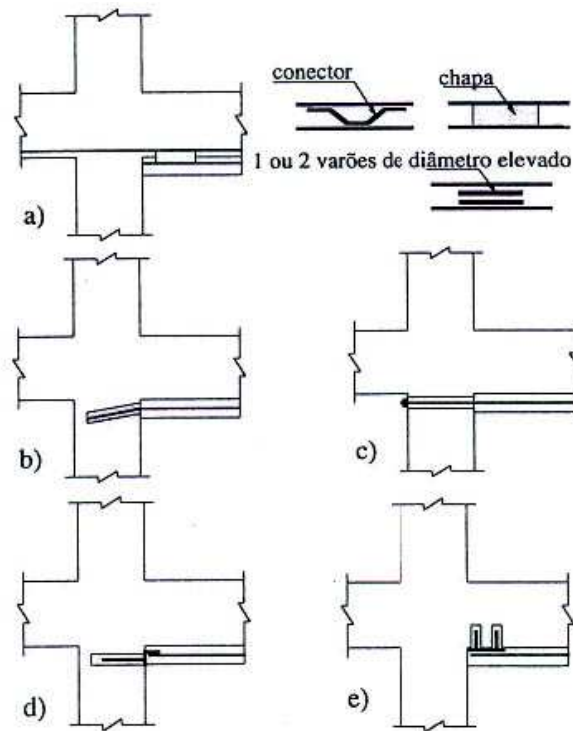


Figura 48 - Tipos de ancoragem de barras de aço em concreto remanescente de estruturas recuperadas Gomes (1997).

A Figura 48 identifica os tipos mais comuns de fixação das barras em peças recuperadas de concreto armado. De maneira a garantir a ligação, a prática adotada consiste na:

- ligação das novas barras às já existentes por soldagem à chapas metálicas ou conectores, identificado no desenho a) da Figura 48;
- por meio de colagem da barra com resina epóxi ou grautes cimentícios num furo previamente realizado na região de ancoragem (região íntegra da peça), conforme desenho b) da Figura 48;
- na fixação da barra por um sistema com porcas, desenho c) da Figura 48;
- fixação de chumbadores/conectores metálicos posteriormente soldados à barra nova, desenho d) e e) da Figura 48.

A Figura 49 até a Figura 52, apresentam exemplos de colagem de barras em elementos de concreto, por meio de adesivos químicos.

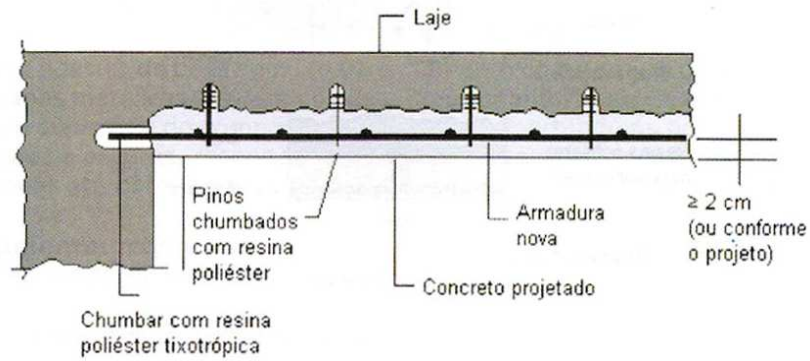


Figura 49 - Ancoragem de barra longitudinal.



Figura 50 - Conectores colados/chumbados na laje existente para compor armadura de recuperação/reforço.



Figura 51 - Armadura de recuperação/reforço estrutural em laje.



Figura 52 - Armadura transversal chumbada ao concreto existente para recuperação de viga de concreto armado.

As resinas epóxi utilizadas nos trabalhos de reforço e/ou reparação devem exibir as seguintes propriedades, segundo SOUZA (1990):

- adequado pot-life, ou seja, baixo tempo de polimerização e boa trabalhabilidade. (Pot-life é o período de tempo no qual a mistura deve ser aplicada a uma determinada temperatura. Em geral, para a construção, esse período varia entre 45 e 120 minutos, a 20 °C, podendo ser de 15 a 20 minutos nas resinas de cura rápida, utilizadas em injeções);
- cura independente de umidade e temperatura ambiente;
- boa tolerância a misturas incorretas;
- boas características de aderência ao concreto e ao aço;
- nenhuma ou pouca deformação por retração e fluência;
- boa resistência, tanto quanto possível, a temperaturas elevadas. (em geral, as resinas epóxi são sensíveis ao calor, tendo a sua resistência diminuída a partir dos 50°C e chegando a zero aos 100°C);
- baixa viscosidade quando usadas em injeções e impregnações e alta viscosidade, quando usadas em colagens;
- módulo de elasticidade não muito baixo, de preferência próximo ao do concreto, para evitar reduções locais de rigidez dos elementos estruturais.

Deve ser alertado que o procedimento de mistura pode influenciar significativamente no pot life, pois quando a massa de resina já misturada é mantida em um recipiente, torna a reação auto-acelerada. Como se trata de uma reação exotérmica, provoca aumento da temperatura no recipiente e conseqüentemente aumento da velocidade de reação.

Os reparos e recuperações estruturais com uso de resina epóxi devem contar com certos cuidados quando submetidas à elevada temperatura, visto que estas possuem perda de resistência mecânica com aumento de temperatura; por isso, estas estruturas devem ser protegidas das variações de temperatura, especialmente do fogo.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram efetuados ensaios de arrancamento em barras de aço embutidas em blocos de concreto durante sua concretagem ou embutidas posteriormente, por meio de colagem com resina epóxi.

Para uma melhor avaliação dos resultados, foram ensaiados três espécimes para cada variável estudada. As dimensões dos blocos variaram de acordo com o diâmetro da barra tanto para os pré aderidos quanto para os pós aderidos, na proporção de 10ϕ .

Foram efetuados ainda ensaios em duas vigas, sendo uma delas concretada integralmente de maneira convencional – viga padrão - e a outra armada e concretada em duas etapas. Nesta última, a armadura longitudinal de tração foi fixada em furos por meio da colagem com resina epóxi.

2.1 Descrição do Modelo Experimental

O tipo de ensaio adotado no trabalho baseou-se na versão de 1973 do modelo de ensaio POT (Pull Out Test – Teste de Arrancamento Direto), normalizado pela Rilem (1973), largamente conhecido pela comunidade de pesquisadores sobre o tema de aderência. Este tipo de ensaio possui características simples de execução, e foi adaptado ao estudo de modo a permitir a colagem com resina epóxi. A versão atual desta norma Rilem (1983) fixa características geométricas no corpo de prova que acarretariam complicações de execução do modelo deste estudo.

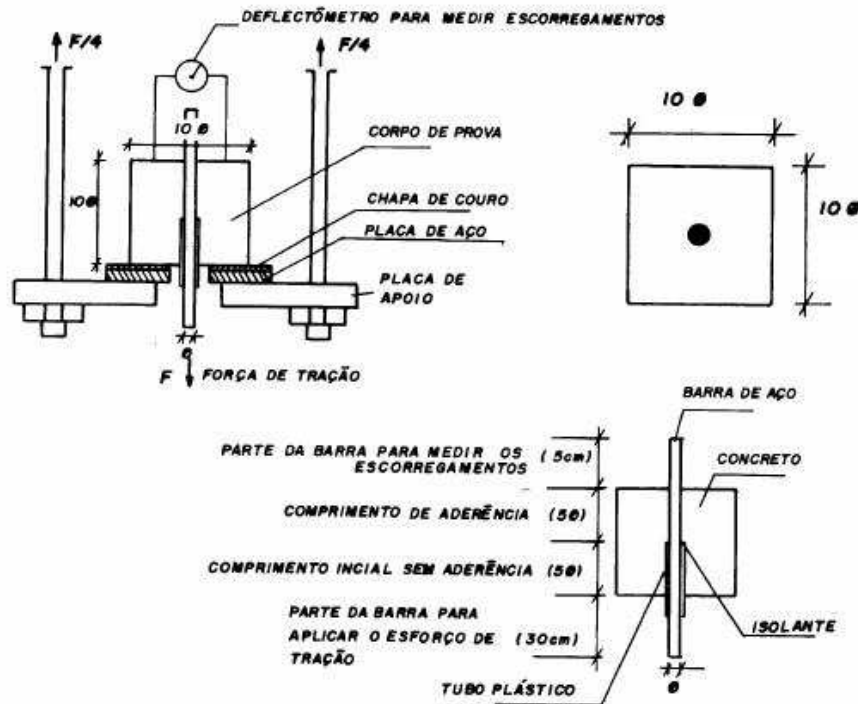


Figura 53 - Modelo de Ensaio Pull-Out Rilem (1973).

Os trabalhos realizados por Felício (1995) e Souza (1990) possuem modelos alternativos de ensaio, como observado na Figura 23. O modelo físico testado por Bouazaoui (2008), apresentado na Figura 43, representa com mais fidelidade o modelo encontrado em campo, pois a barra é colada em um furo não passante, ou seja, com apenas uma abertura. Dessa maneira, este modelo possui uma representatividade significativamente superior em relação aos demais ensaios adaptados, mas, por outro lado, não possui características comparativas a estudos anteriores nem à normalização de referência.

2.1.1 Características dos modelos experimentais

As características dos modelos experimentais levaram em conta a necessidade de padronização dos ensaios e sua adequação ao ensaio de pull-out. A Tabela 13 a Tabela 16 resumem os tipos de corpos de prova testados.

Com o objetivo de poder comparar modelos com diferentes armaduras, as dimensões dos corpos de prova e o comprimento de aderência ℓ foram ajustados

proporcionalmente aos diâmetros das armaduras. Foram testados três diâmetros de barras: 10mm; 12,5mm e 16mm e dois comprimentos de aderência para cada diâmetro: 5ϕ e $7,5\phi$, onde ϕ é o diâmetro nominal da barra. Para cada tipo de corpo de prova foram moldados e ensaiados pelo menos três exemplares.

Para uma melhor compreensão dos mecanismos de aderência decidiu-se testar três espessuras de resina epóxi. A relação entre o diâmetro do furo e o diâmetro da barra foi fixada em 2mm, 4mm e 6mm, que representam as espessuras de 1mm, 2mm e 3mm de resina utilizadas.

Os corpos de prova foram identificados da seguinte maneira:

- Diâmetro da barra em mm;
- Comprimento de ancoragem em função do diâmetro;
- Tipo de ligação: pós ou pré aderidos e a respectiva espessura da resina, 0, 1, 2 ou 3mm.
- Dessa forma, o código para cada corpo de prova tem a seguinte forma:
- 10,0-5-0 Corpo de prova com barra pré-aderida de 10mm e comprimento de ancoragem de 5ϕ ;
- 12,5-7,5-2 Corpo de prova com barra de 12,5mm e comprimento de ancoragem de $7,5\phi$.pós aderida com resina de 2mm de espessura.

Tabela 13 - Características dos modelos experimentais com barras aderidas ao concreto.

CP	Diâmetro da Barra	Comprimento de Aderência	Tipo
1	10	5cm	10-5-0
2	10	5cm	10-5-0
3	10	5cm	10-5-0
4	12,5	6,25cm	12,5-5-0
5	12,5	6,25cm	12,5-5-0
6	12,5	6,25cm	12,5-5-0
7	16	12cm	16-7,5-0
8	16	12cm	16-7,5-0
9	16	12cm	16-7,5-0
10	10	7,5cm	10-7,5-0
11	10	7,5cm	10-7,5-0
12	10	7,5cm	10-7,5-0
13	10	7,5cm	10-7,5-0
14	10	7,5cm	10-7,5-0
15	12,5	9,38cm	12,5-7,5-0
16	12,5	9,38cm	12,5-7,5-0
17	12,5	9,38cm	12,5-7,5-0
17A	12,5	9,38cm	12,5-7,5-0
18	16	8cm	16-5-0
19	16	8cm	16-5-0
20	16	8cm	16-5-0

Tabela 14 - Características dos modelos experimentais com barras coladas ao concreto com resina epóxi com 1mm de espessura.

CP	Diâmetro da Barra	Comprimento de Aderência	Tipo
21	10	5cm	10-5-1
22	10	5cm	10-5-1
23	10	5cm	10-5-1
24	12,5	6,25cm	12,5-5-1
25	12,5	6,25cm	12,5-5-1
26	12,5	6,25cm	12,5-5-1
27	16	8cm	16-5-1
28	16	8cm	16-5-1
29	16	8cm	16-5-1
30	10	7,5cm	10-7,5-1
31	10	7,5cm	10-7,5-1
32	10	7,5cm	10-7,5-1
33	12,5	9,38cm	12,5-7,5-1
34	12,5	9,38cm	12,5-7,5-1
35	12,5	9,38cm	12,5-7,5-1
36	16	12cm	16-7,5-1
37	16	12cm	16-7,5-1
38	16	12cm	16-7,5-1

Tabela 15 - Características dos modelos experimentais com barras coladas ao concreto com resina epóxi com 2mm de espessura.

CP	Diâmetro da Barra	Comprimento de Aderência	Tipo
39	10	5cm	10-5-2
40	10	5cm	10-5-2
41	10	5cm	10-5-2
42	12,5	6,25cm	12,5-5-2
43	12,5	6,25cm	12,5-5-2
44	12,5	6,25cm	12,5-5-2
45	16	8cm	16-5-2
46	16	8cm	16-5-2
47	16	8cm	16-5-2
48	10	7,5cm	10-7,5-2
49	10	7,5cm	10-7,5-2
50	10	7,5cm	10-7,5-2
51	12,5	9,38cm	12,5-7,5-2
52	12,5	9,38cm	12,5-7,5-2
53	12,5	9,38cm	12,5-7,5-2
54	16	12cm	16-7,5-2
55	16	12cm	16-7,5-2
56	16	12cm	16-7,5-2

Tabela 16 - Características dos modelos experimentais com barras coladas ao concreto com resina epóxi com 3mm de espessura.

CP	Diâmetro da Barra	Comprimento de Aderência	Tipo
57	16	8cm	16-5-3
58	16	8cm	16-5-3
59	16	12cm	16-5-3
60	16	12cm	16-5-3
61	16	12cm	16-7,5-3

2.1.2 Modelos de Viga

O ensaio das vigas pretende verificar o comportamento da aderência de barras de aço coladas ao concreto, semelhante ao que ocorre nos trabalhos de reforço ou recuperação estrutural em vigas já existentes. Para tal, foram moldadas duas vigas caracterizadas a seguir. As dimensões das vigas, foram escolhidas de acordo com a capacidade do laboratório, e possuem dimensões conforme a Figura 54 e a Figura 56.

- Características da Viga 1:

Esta viga possui 20 cm de altura e 20 cm de largura. Os apoios têm dimensões de 20x20cm e vão de 1,80m, conforme apresentado na Figura 54.

O carregamento consistiu de duas cargas concentradas aplicadas nos terços do vão, conforme mostra a Figura 55.

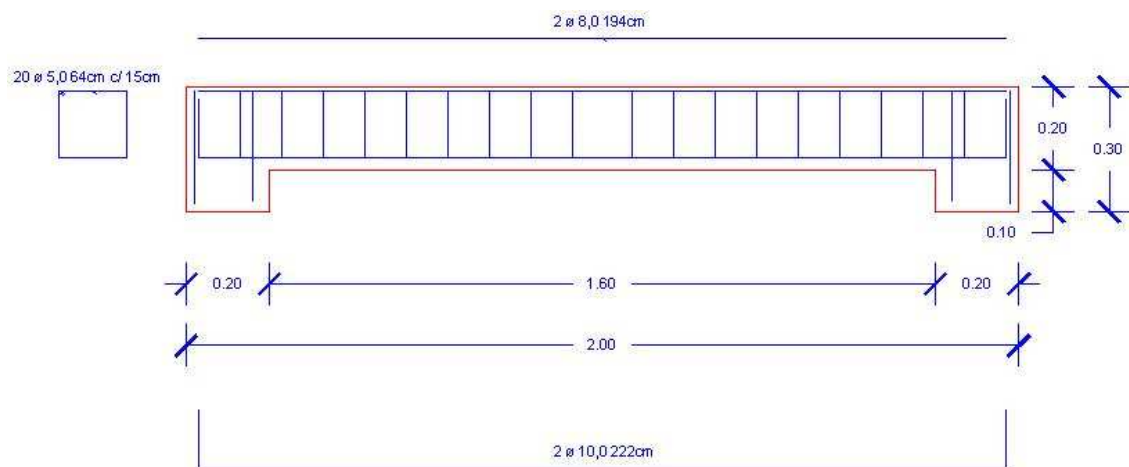


Figura 54 - Croqui da viga de ensaio do tipo 1.



Figura 55 - Viga 1 posicionada para ensaio.

- Características da Viga 2:

Esta viga possui as mesmas dimensões que a Viga 1, tendo sido moldada com apenas 14 cm de altura. O complemento de concreto, correspondente a 6cm, foi moldado após a fixação das armaduras longitudinais, conforme apresentado na Figura 56.

Na 1ª fase de concretagem da viga V2 foram colocados tubos de borracha na região dos apoios, de modo a garantir-se os furos para a posterior colagem das barras longitudinais. O comprimento de ancoragem dessas barras correspondeu a toda a extensão do apoio, ou seja, as barras foram coladas em um comprimento de 20cm. Além disso, as armaduras dos estribos ficaram expostas para futura dobragem e amarração. A Figura 57 apresenta a viga 2 após a moldagem da 1ª fase.

O esquema de carregamento adotado foi idêntico ao aplicado na Viga 1.

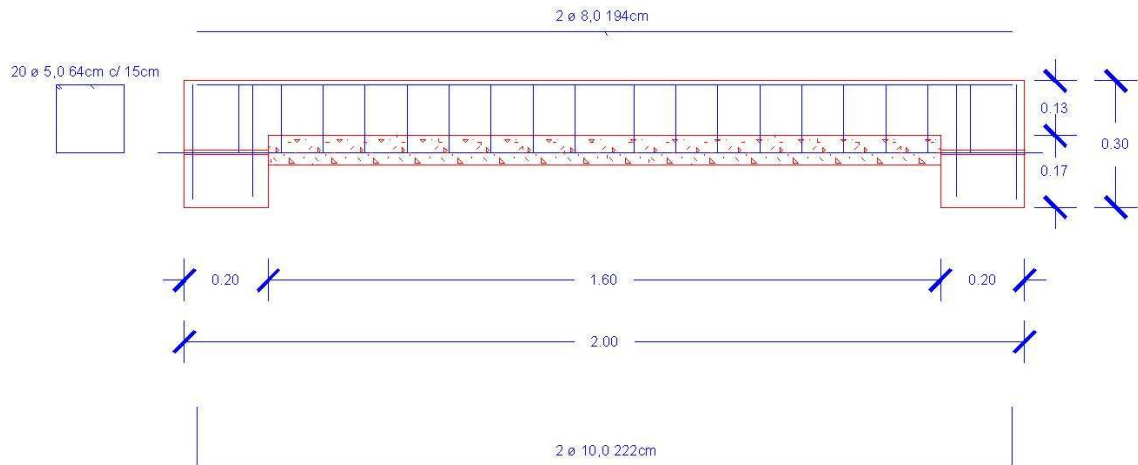


Figura 56 - Croqui da viga de ensaio do tipo 2.



Figura 57 - Moldagem parcial da viga 2 com as esperas dos estribos para fixação da armadura positiva.

2.2 Caracterização dos Materiais

2.2.1 Concreto

O traço de concreto adotado neste trabalho foi semelhante ao utilizado por Felício (1995), calculado com o objetivo de alcançar uma resistência à compressão da ordem de 20 MPa, pois representa as características das construções de concreto armado em idade passível de recuperação e intervenção estrutural.

O traço unitário em massa adotado foi: 1 : 2,50 : 2,30 : 0,7 (cimento; areia; brita zero; água).

Para que a qualidade do concreto não fosse mais uma variável a ser levada em conta, optou-se por adotar apenas um tipo de concreto para a confecção de todos os modelos.

2.2.2 Agregados

A procedência dos agregados não foi conhecida, porém provenientes de um mesmo lote.

Agregados miúdos:

Para agregados miúdos foi utilizada areia lavada vendida a granel ensacada, com diâmetro máximo de 4,8 mm e módulo de finura de 3,53 o que caracteriza a areia grossa, possuindo uma umidade de aproximadamente 5%, determinada por secagem em estufa.

A composição granulométrica da areia, obtida através de ensaio normalizado pela NBR 248 (2003) está indicada na Tabela 17.

Tabela 17 - Granulometria do agregado miúdo (areia).

Peneira (mm)	Peso retido (g)	Acumulado (g)	Acumulado (%)
4,8	24,2	24,2	2,42
2,4	75,3	99,5	9,95
1,2	536	635,5	63,55
0,6	245	880,5	88,05
0,3	9,2	889,7	88,97
0,15	90,3	980	98
Fundo	20	1000	100

Para agregados graúdos foi utilizada brita comercialmente conhecida como brita zero, vendida a granel e ensacada. Diâmetro máximo de 9,5mm e módulo de finura de 2,21, possuindo uma umidade de aproximadamente 0,5%, determinada por secagem em estufa.

O ensaio granulométrico da brita utilizada, obtido através de ensaio normalizado pela NBR 248 (2003), está indicado na Tabela 18.

Tabela 18 - Granulometria do agregado graúdo.

Peneira (mm)	Peso retido (g)	Acumulado (g)	Acumulado (%)
9,5	164,8	164,8	5,49
6,3	1184,1	1348,9	44,96
4,8	895,8	2244,7	74,82
2,4	624,4	2869,1	95,64
Fundo	128,5	2997,6	99,92

2.2.3 Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CII-E, para o qual não foram realizados ensaios de caracterização, nem de módulo de finura.

2.2.4 Aço

Foram utilizadas barras de aço nervuradas com diâmetros variados do aço Belgo 50 S, caracterizado por ser um aço especial desenvolvido pela empresa Arcelormittal[®] que, de acordo com o catalogo técnico, apresenta uma camada superficial de alta resistência ao escoamento e um núcleo de alta ductilidade. Em virtude de sua composição química restrita, o produto apresenta uma soldabilidade bastante superior à do CA 50 convencional.

2.2.5 Resinas epóxi

A escolha do tipo de resina epóxi a ser adotado foi baseada em ensaios preliminares, conforme descrito no item 1.6. Assim, foram testados dois tipos comerciais de resinas epóxi: a resina Sikadur 32[®], da Sika[®] e o sistema RE 500 da Hilti[®].

- RE 500 – HILTI[®]

Adesivo epóxi bi-componente injetável, de alta resistência. De acordo com o catálogo técnico do fabricante, possui as seguintes características:

- Tensão de aderência após cura de 2 dias: 12,4 MPa
- Tensão de aderência após cura de 7 dias: 12,4 MPa
- Resistência à compressão: 82,7 MPa
- Resistência à tração aos 7 dias: 43,5 MPa
- Possui propriedades tixotrópicas.

- SIKADUR 32[®] – SIKA[®]

Adesivo estrutural à base de resina epóxi, de média viscosidade (fluido), bicomponente e de pega normal, especialmente formulado para ancoragens em geral e colagens de concreto velho com concreto novo e chapas metálicas ao concreto. Embora possua consistência fluida, não é auto-nivelante. Composição básica: resina epóxi e poliamidas. De acordo com o catálogo técnico do fabricante, possui as seguintes características:

Resistência à compressão após 24h: 60MPa (25°C/50%UR)

Densidade a 25°C: 1,67 kg/dm³

Vida útil de mistura (pot-life): 35 minutos (25°C/50%UR)

Cura inicial: 5 horas

Cura final: 7 dias

Temperatura de aplicação: +10°C a +30°C

O Sikadur 32[®] vem pré-dosado, devendo-se inicialmente efetuar a homogeneização dos componentes A e B em separado. Fazer em seguida a mistura de ambos que no caso foi feita com uma colher, energicamente, até garantir-se a totalidade da mistura dos dois componentes.

2.2.6 Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais

Apenas o concreto e o aço foram caracterizados em laboratório, para a resina epóxi foram adotadas as características fornecidas pelo fabricante, já descritas anteriormente.

2.2.6.1 Resistência do concreto

Para a caracterização do concreto foram moldados corpos de prova padronizados de 15cm de diâmetro e 30cm de altura e realizados dois tipos de ensaio de caracterização do concreto – à compressão axial, conforme NBR 5739 (2007) e à tração por compressão diametral, conforme NBR 7222 (2011).

Os resultados desses ensaios encontram-se descritos na Tabela 19 e referem-se a média dos exemplares ensaiados

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de Caracterização do concreto

Concretagem	Data	Fator a/c	Abatimento	$f_{cm,7\text{ dias}}$	$f_{cm,28\text{ dias}}$	$f_{cm,180\text{ dias}}$	$f_{ctm,180\text{ dias}}$
1		0,7	9 cm		22,3		
2		0,7	16 cm	12,3	21,1	27,9	2,1
3		0,7	13 cm	13,8	17,9	25,9	2,1
4		0,7	7 cm		17,8	25,9	

Nota-se, na Tabela 19, que os traços apresentaram diferentes abatimentos, o que pode estar relacionado com a umidade da areia, que apesar de ter sido compensada na água da mistura, pode ter influenciado a fluidez do concreto.

2.2.6.2 Resistência do Aço

Para a caracterização do aço foram realizados ensaios de tração axial, de acordo com a NBR 7480 (2007) cujos resultados estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de Caracterização do aço CA 50.

CP	Diâmetro Nominal (mm)	Peso (g)	Comprimento (mm)	Carga de Escoamento (kN)	Carga de Ruptura (kN)	L ₀ (mm)	L (mm)
1	10	247	400	47,6	58,3	100	112,8
2	10	246	399	47,5	58,5	100	112,5
3	10	249	402	47	58	100	116
4	12,5	412	429	73	91,5	130	147,8
5	12,5	413	430	69	87,5	130	152,8
6	12,5	415	429	73	91,5	130	151
7	16	726	460	113,5	143,5	160	185
8	16	735	465	113	143,5	160	185,2
9	16	725	457	113,5	143,5	160	187,3

2.3 Concretagem dos Corpos de Prova

Para a produção do concreto foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 400 litros. Para a moldagem dos modelos foram executadas quatro concretagens, distribuídas conforme apresentado na Tabela 21. Em todas as concretagens foram moldados corpos de prova para caracterização do concreto.

Tabela 21—Distribuição das concretagens nos modelos

No da Concretagem	Tipos de Modelos concretados	Volume (litros)
1	Viga 1	105
2	CP10 – CP12,5 – CP16	126
3	Viga 2 - CP10 – CP12,5 – CP16	174
4	Reparo da Viga 2 (2ª fase)	25

O lançamento do concreto nas formas foi feito manualmente, em camadas, perpendicularmente à posição das armaduras, conforme mostra a Figura 58. O adensamento foi feito por meio de vibrador elétrico de imersão, após a colocação de cada camada, de modo a eliminar ao máximo os vazios do concreto. O acabamento do corpo de prova foi dado com colher de pedreiro.



Figura 58 - Direção da concretagem dos Corpos de Prova.

A concretagem dos corpos de prova de caracterização do concreto seguiu o prescrito na NBR 5739 (2007).

Após o término das concretagens, todos os corpos de prova foram mantidos em ambiente do laboratório e a cura foi efetuada por meio de regas e cobertura plástica por pelo menos 5 dias.

A desforma foi feita a seguir e os corpos de prova foram numerados e mantidos em ambiente de laboratório até a data do ensaio.

Nos modelos com barras pós-aderidas, de modo a evitar-se a execução de furos no concreto endurecido com utilização de brocas, foram dispostos nas formas, tubos de PVC como gabarito, envolvidos com filme PVC para evitar aderência à pasta cimentícia. Os furos possuíam diâmetro exato para garantir a espessura pré-determinada de resina epóxi a ser usada na colagem da barra de aço.

2.4 Fixação das Armaduras nos Corpos de Prova

Neste item serão apresentados os ensaios preliminares, feitos para testar o tipo de resina e o sistema de colagem das armaduras ao concreto. Em seguida são descritos os procedimentos de colagem adotados nos modelos testados.

2.4.1 Ensaio preliminares

Para avaliar os procedimentos de colagem – forma de preenchimento, tipo de bucha a ser usada para evitar o escorrimento da resina para a região não aderida, tempo de cura - bem como o aspecto da resina dentro do furo após a colagem, foram testados alguns corpos de prova sem se ter preocupação com as resistências do concreto e do aço empregados.

Para estes ensaios foram moldados 3 corpos de prova do tipo 10-7,5 ϕ -2 e 2 corpos de prova do tipo 10-7,5 ϕ -1 (da mesma betonada) e foram reaproveitados de estudos anteriores 2 corpos de prova do tipo 10-5 ϕ -1 e 2 corpos de prova do tipo 8-5 ϕ -1.

Para o ensaio preliminar foram testados o sistema RE 500 da fabricante Hilti® e a resina Sikadur 32® da fabricante Sika®, sendo as resinas com características bastante diferentes, principalmente na forma de aplicação.

No sistema Hilti RE 500 a resina, com características tixotrópicas, é aplicada por meio de uma pistola de injeção, de tal modo que o furo era preenchido de dentro para fora. Este sistema foi projetado pelo fabricante para o preenchimento de chumbadores embutidos e, portanto, foi adaptado nesta aplicação.

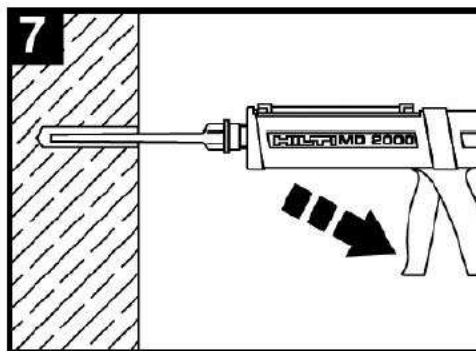


Figura 59 - Injeção da resina por pistola injetora do sistema RE-500 da Hilti®.

A resina Sikadur 32®, que possui densidade de pasta fluida, foi simplesmente vertida para dentro do furo.

2.4.1.1 Resultados dos ensaios preliminares

- Testes com o sistema HILTI® RE 500 [22]:
-

O procedimento de injeção foi do interior do furo para a extremidade, com auxílio de um bico injetor, conforme ilustrado na Figura 59. Após o preenchimento da região de aderência com a resina inseria-se a barra de aço, forçando-a e girando-a para penetração desta na resina aplicada no furo. A barra era inserida no sentido da região não aderida para a região aderida, até que a ponta da barra ultrapassasse cerca de 10cm para fora do corpo de prova, conforme ilustra a Figura 60.



Figura 60 - Barra passante colada no furo previamente preenchido com resina.

- CP 1 – Tipo 10-7,5 ϕ -2:

Neste espécime foi testada uma bucha de silicone aplicada na região não aderida do furo, de modo que a barra, durante a colagem, atravessasse o furo e o silicone, mantendo a parte com silicone sem aderência.

Após o ensaio de arrancamento, cuja carga de ruptura foi inferior a 1 kN, o corpo de prova foi rompido longitudinalmente para análise das condições internas da aderência. Verificou-se a presença de silicone esfarelado (resultado da passagem da barra pela região de silicone) na região de aderência, interferindo totalmente na ligação resina-concreto e resina-aço. Dessa maneira, ficou clara a ineficácia do silicone como bucha para a parte não aderida.



Figura 61 - CP 1 resina Hilti® RE 500.

o CP2 – Tipo 10,0-7,5 ϕ -2:

Neste espécime substituiu-se a bucha de silicone por um filme de PVC enrolado na barra de aço para evitar a aderência na região não aderida.

A carga de ruptura para este teste também foi baixa, com valor de 22,20 kN. Após o rompimento longitudinal deste espécime, notou-se que a falha na aderência ocorreu na interface resina-concreto e que o filme de PVC foi eficiente no isolamento resina-aço, pois nessa região não ocorreu indícios de transferência de esforços entre os elementos.

Entretanto, na região de aderência próxima ao filme, observou-se uma bolha de ar ou falta de resina devido a inserção do aço. Como esta é a região de primeiro contato da barra ao atravessar a região com resina, pode ter ocorrido expulsão da mesma, carreando-a para fora do corpo de prova. Devido a isto, foi percebida a necessidade de tamponamento do furo pela região superior, visando criar uma pressão interna na resina durante a entrada da barra de aço, mantendo a resina na região de aderência.



Figura 62 - CP 2 Resina Hilti® RE 500.

o CP4 – Tipo 10,0-7,5 ϕ -1:

Este espécime teve a peculiaridade de não ser testado ao arrancamento, ou seja, foi apenas rompido longitudinalmente, com a finalidade de verificar a aderência e o preenchimento do furo pela resina. Observou-se que a resina preencheu corretamente o furo, sem deixar bolhas visíveis na região de aderência, bem como, na região de não aderência, o filme de PVC, mais uma vez, impediu a aderência da resina com o aço.



Figura 63 - CP 4 Sistema Hilti® RE 500.

- Testes com a resina SIKA®:

A resina Sikadur 32® apresenta características fluidas e, dessa maneira, pode ser vertida para o interior do furo, e espalhada na superfície de aderência com auxílio de uma varinha de bambu, na tentativa de preencher a região de aderência o máximo possível com a resina. A barra de aço foi inserida da região não aderente para a região aderente conforme procedimento adotado para o sistema RE 500 [22]. A barra de aço, no momento da inserção, já contava com um revestimento de filme PVC na região não aderida.

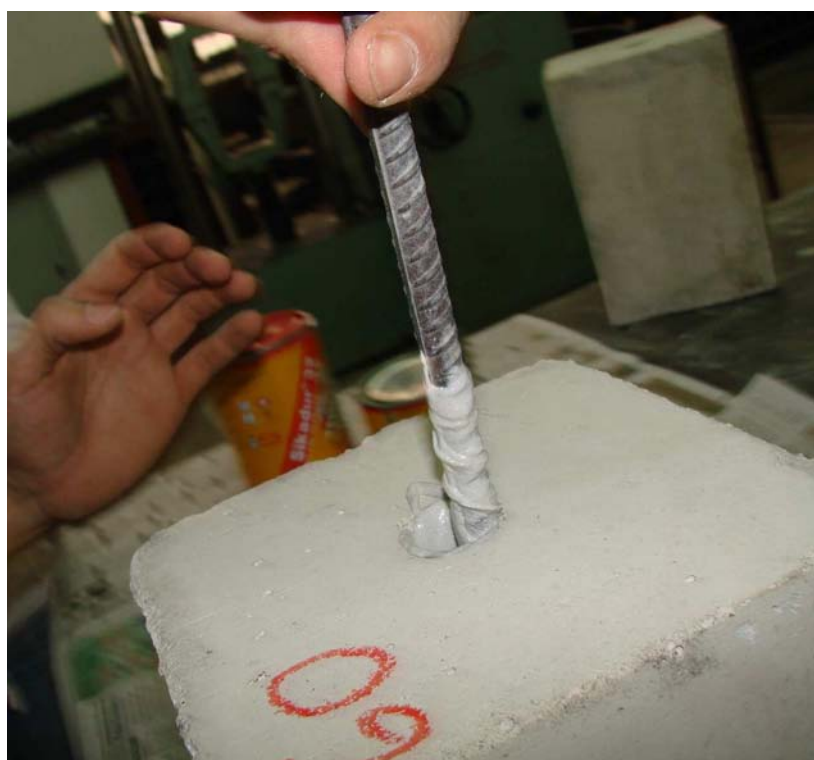


Figura 64 - Aplicação da resina no furo com auxílio de varinha.

- CP1 – Tipo 10-7,5φ-2:

Neste corpo de prova a colagem deu-se em posição vertical em relação à direção do furo, com o objetivo de impedir falhas na continuidade da resina e melhorar a fluidez da mesma até a profundidade da região de aderência.

Este espécime apresentou-se bastante eficaz quanto a resistência de aderência, atingindo carga de ruptura de 37,20 kN. A ruptura se deu por fendilhamento longitudinal do concreto, que neste caso apresentou resina totalmente

aderida ao aço. Nota-se que o valor desta carga de ruptura é superior aqueles obtidos com os testes nos corpos de prova irmãos, testados com sistema HILTI®.



Figura 65 - CP 1 Resina Sikadur 32®.

o CP2 – Tipo 10,0-5φ-1:

Na análise da ligação rompida deste corpo de prova foram verificadas falhas na ligação aço-resina-concreto; o preenchimento do furo se deu de maneira incompleta sendo observado, após o rompimento longitudinal, regiões com bolhas de ar impedindo o contato da resina com o aço. Este fato ocorreu provavelmente pela maneira com que o corpo de prova foi apoiado para a cura da resina, com o furo na horizontal e facilitando a decantação da camada de resina de um lado para o outro.



Figura 66 - CP 2 Resina Sikadur 32[®].

o CP3 – Tipo 8-5 ϕ -1:

Este espécime não teve teste de arrancamento, sendo apenas rompido longitudinalmente, com a finalidade de avaliar o preenchimento da resina. Nele também verificaram-se grandes bolhas de ar ao longo da região de aderência. Com este procedimento foi possível verificar que as bolhas foram provavelmente provocadas pela posição horizontal do corpo de prova durante a cura da resina, permitindo a decantação do material de preenchimento para uma das partes do furo.



Figura 67 - CP 3 Resina Sikadur 32[®].

2.4.1.2 Conclusões dos ensaios preliminares

Os corpos de prova testados com resina Hilti® RE 500 apresentaram capacidade de carga inferiores àqueles testados com resina Sikadur 32®; isto deve-se principalmente à grande diferença entre os dois sistemas, principalmente quanto:

- Às características do furo passante, o qual se enquadra este trabalho;
- À característica tixotrópica da resina Hilti® RE500 que oferece condições desfavoráveis quanto a passagem da barra pelo furo preenchido;
- À característica fluida do Sikadur 32® que favorece a acomodação da resina, mesmo após a inserção da barra de aço, por ação da gravidade.

Foi percebido que os corpos de prova colados com resina Sikadur 32® devem permanecer na vertical, em relação à direção do furo, quando em processo de cura, de maneira a limitar a formação de bolhas e decantação da resina.

Foi identificada a eficiência do filme PVC como eliminador de aderência da barra de aço.

Foi identificada a total ineficiência do silicone como isolante de aderência para compor a região não aderente do corpo de prova.

Foi percebida a necessidade de tamponamento do furo na região superior, visando criar uma pressão interna na resina durante a entrada da barra de aço e evitar a perda de resina na região de aderência.

2.4.2 Descrição do procedimento de colagem das barras

- Preparação dos furos nos modelos

Após a retirada das formas, procedeu-se ao arrancamento dos tubos plásticos, posicionados antes da concretagem, a fim de servirem de gabarito aos furos de passagem das barras de aço. Estes tubos tinham o diâmetro exato que se previa para cada modelo, ou seja, contemplavam o diâmetro da barra mais a espessura que a resina epóxi iria ocupar. Este método permitiu a que da relação entre o diâmetro da barra e o diâmetro do furo fosse constante conforme a espessura de resina adotada.

- Limpeza

A limpeza dos furos era feita com pano umedecido em removedor e envolvido em um pedaço de arame, a fim de remover todo o pó e gordura existente em seu interior.

A limpeza das armaduras foi feita com um pano umedecido em removedor, de modo a retirar qualquer impureza que pudesse prejudicar a aderência.

- Fixação das barras nos modelos usados no ensaio de arrancamento

Com base nos ensaios preliminares, na região onde desejava-se ter o comprimento não aderente, a barra foi revestida com filme PVC, finalizado com um tampão, de modo a evitar o escorrimento da resina da região aderente para a região não aderente, como pode ser observado na Figura 68.



Figura 68 - Esquema da preparação barra de aço para a colagem-



Figura 69 - Suporte de aço para colagem e fixação das barras aos blocos de concreto.



Figura 70 - Corpos de prova colados e apoiados.

Durante a cura da resina, aproximadamente 24 horas, os corpos de prova permaneceram imóveis, de maneira a garantir a colagem de forma correta. Para tal, construiu-se um suporte metálico que, além de prender a barra na posição necessária, apoiava o bloco de concreto. A solução adotada constitui-se por uma dupla cantoneira metálica que funcionava de base para o bloco e, com auxílio de uma morsa de bancada, apertava as barras impedindo o seu deslocamento vertical. O esquema montado pode ser visualizado na Figura 69.

- Fixação das barras no modelo de viga V2

Após a desmoldagem da viga V2, procedeu-se a colagem das barras longitudinais. Primeiramente fez-se a limpeza dos furos, com a retirada de todo o pó. Em seguida, aplicou-se a resina com o auxílio de varetas dentro do furo.

Logo após, no instante de posicionar as armaduras, as mesmas foram abundantemente embebidas em resina e enfiadas através dos furos até ter-se percebido o total preenchimento do furo com a resina. Esperou-se a cura da resina por um período de quatro dias, antes de prosseguir-se com os trabalhos.

Em seguida, efetuou-se um apicoamento na superfície do concreto, na região a ser completada, para melhorar a aderência entre os dois concretos, retirando-se a nata de cimento existente.

A partir daí, procedeu-se a dobragem e amarração dos estribos e a 2ª fase de concretagem, de modo a completar-se o fundo da viga. Na Figura 71 vê-se a Viga 2 logo após a 2ª concretagem.



Figura 71 - Viga 2 após a 2ª fase de concretagem.

2.4.3 Outras considerações

- Problemas verificados nos modelos de arrancamento

Após os ensaios de arrancamento, especificamente nos corpos de prova: CP-15, CP-16, CP-17 e CP-18, foi verificado que a barra de aço inserida possuía em sua região de aderência a logomarca do fabricante, não ocorrendo portanto, a presença de nervuras nesta área. Tal ocorrência pode ser visualizada na Figura 72. As dimensões destas logo-marcas variavam de 2 a 9cm, ocupando uma semi-circunferência da barra. Após análise dos resultados dos ensaios desses modelos e em virtude das conseqüentes perdas de aderência assim causadas, foram desconsiderados o CP-15 e o CP-17.



Figura 72 - Exemplos de logomarca nas barras de aço.

- Problemas verificados nos modelos de viga

Após a cura da viga 2, antes de proceder-se à 2ª fase de concretagem, verificou-se a presença de fissuras de retração transversais ao seu comprimento, no alinhamento dos estribos, conforme pode ser observado na Figura 73.



Figura 73 - Fissura de acomodação do concreto na forma, superficial.

Tal fato pode ter sido ocasionado devido aos estribos estarem presos à forma, impedindo a livre acomodação do concreto. Estas fissuras, localizadas no terço central da viga, possuíam características superficiais e aberturas não maior que 1mm, e somente ocorreram em uma das faces da viga, exatamente aquela que ficou livre para a concretagem (a viga foi concretada lateralmente, por facilidades de execução).

Estas fissuras foram tratadas com nata de cimento, com a finalidade de tentar reduzir qualquer problema futuro.

O procedimento para o tratamento foi simples, com limpeza e preenchimento por nata de cimento na proporção 1 : 0,4 de cimento e água, respectivamente, momentos antes da 2ª fase de concretagem, visando uma retificação da seção de concreto nas fissuras. Este preenchimento foi efetuado a partir da face inferior da viga.

2.5 Sistema de Ensaio e Instrumentação

2.5.1 Ensaio de Arrancamento

Para o ensaio de arrancamento foi utilizada uma máquina universal de tração, da marca Losenhausen – LOS, com capacidade para 60 toneladas, do Laboratório de Estruturas da UERJ.

A montagem do ensaio teve por objetivo permitir a aplicação de uma carga de tração em uma das extremidades da barra de aço e obter o deslocamento relativo entre a barra e o concreto na outra extremidade. Para isso, foi utilizada uma gaiola metálica com a função de reagir contra o bloco de concreto, enquanto a extremidade livre da barra era tracionada. A Figura 74 ilustra este sistema de ensaio.



Figura 74 - Esquema do ensaio dos corpos de prova.

Para efetuar a medição do deslocamento relativo entre a barra de aço e o bloco de concreto foi utilizado um transdutor de deslocamento, fabricado pela Gefran, do tipo Transdutor de Deslocamento Linear PY2, com curso de 10 mm. Este equipamento funciona com uma resistência interna que, sob uma diferença de potencial elétrico que varia de acordo com o deslocamento da haste, provoca uma variação no potencial de saída, o qual é interpretado por um programa de computador. Este sinal de potencial elétrico é posteriormente calibrado de acordo com o curso do transdutor em uma régua de precisão e transformado em medida de comprimento. Dessa maneira, tem-se no computador a resposta do transdutor automaticamente em unidades de milímetro, com uma precisão de até 0,005mm. Este deslocamento foi correlacionado com a força exercida no momento da medição.



Figura 75 - Transdutor de Deslocamentos Linear PY2.

De forma auxiliar, foi disposto um defletoômetro analógico no topo do corpo de prova que teve por objetivo a verificação de falhas e o acompanhamento de medidas durante o ensaio, uma vez que o equipamento eletrônico é extremamente sensível.



Figura 76 – Detalhe do Transdutor de deslocamentos acoplado e do defletoômetro analógico.

Ainda assim, visando manter uma padronização nos ensaios quanto às leituras apresentadas pelo transdutor de deslocamentos, foi efetuada uma re-calibração do mesmo ao se atingir metade dos ensaios previstos. Esta re-calibração se deu pela comparação deste equipamento com um defletoômetro analógico fora do ambiente de ensaio, ou seja, fora das condições de deslocamentos, deformações, carga e vibrações que ocorrem durante o ensaio.

O procedimento de ensaio seguiu o estabelecido para os ensaios de arrancamento, ou seja, o carregamento foi aplicado de forma lenta e contínua. A elevação da carga dava-se de maneira contínua e era observado o comportamento do modelo e registrados os deslocamentos correlacionados com pequenos patamares de carga, da ordem de 1,0 kN.

3 RESULTADO DOS ENSAIOS

3.1 Resultado dos ensaios de arrancamento

Os ensaios ocorreram durante onze dias, com uma média de 5 ensaios por dia. Iniciaram-se os ensaios pelos corpos de prova de referencia, ou seja, corpos de prova sem adesão por epóxi. Dessa maneira foi possível uma melhor adaptação e ganho de sensibilidade quanto ao comportamento dos diferentes tipos de corpos de prova, de modo a evitar surpresas quanto ao comportamento durante a ruptura.

Como a ruptura por fendilhamento do corpo de prova se dava de maneira brusca, foi necessária a retirada do equipamento de medição, para não danificá-lo, momentos antes da ruptura. Entretanto, com o aumento da sensibilidade de previsão da carga de ruptura, conseguiu-se avançar com as medições até bem próximo da carga última.

Da Tabela 22 à Tabela 24 descrevem os tipos de corpos de prova e resumem os resultados dos ensaios. No que diz respeito ao tipo de ruptura adotou-se o denominado na literatura técnica, FIB 10 (2000), que identifica dois tipos de ruptura para os ensaios de pull-out: ruptura por arrancamento e ruptura por fendilhamento.

Tabela 22 - Tabela Resumo dos Resultados dos Ensaios sem resina.

CP	Traço	Tipo	Carga Máx. (kN)	Obs.	Ruptura
1	2	10-5-0	11,8		Deslizamento
2	2	10-5-0	12,2		Deslizamento
3	2	10-5-0	12		Deslizamento
4	2	12,5-5-0	16,6		Deslizamento
5	2	12,5-5-0	24,4		Deslizamento
6	2	12,5-5-0	22		Deslizamento
7	2	16-7,5-0	77,8		Deslizamento
8	2	16-7,5-0	72		Deslizamento
9	2	16-7,5-0	76,4		Deslizamento
10	2	10-7,5-0	31,8		Deslizamento
11	2	10-7,5-0	34,4		Deslizamento
12	2	10-7,5-0	33,2		Deslizamento
13	2	10-7,5-0	58,2	Aço da Viga	Deslizamento
14	2	10-7,5-0	52,8	Aço da Viga	Deslizamento
15	2	12,5-7,5-0	40,8	*B - Área de aderência	Deslizamento
16	2	12,5-7,5-0	49,2	*C - Área de aderência	Deslizamento
17	2	12,5-7,5-0	30,2	*D - Área de aderência	Deslizamento
17A	2	12,5-7,5-0	51,8		Deslizamento
18	2	16-5-0	43,8	*A - Área de aderência	Deslizamento
19	2	16-5-0	53,2		Deslizamento
20	2	16-5-0	46,8		Deslizamento

+ conforme descrição no item 2.4.3.

() Os corpos de prova indicados entre parênteses foram desconsiderados.

Tabela 23 - Tabela Resumo dos Resultados dos Ensaios para Resina 1mm.

CP	Traço	Tipo	Carga Máx. (kN)	Obs.	Ruptura
21	2	10-5-1	40,4		Fendilhamento
22	2	10-5-1	42		Fendilhamento
23	2	10-5-1	48,8		Fendilhamento
24	2	12,5-5-1	64,2		Fendilhamento
25	2	12,5-5-1	64		Fendilhamento
26	2	12,5-5-1	68		Fendilhamento
27	2	16-5-1	56,2	50% área de aderência comprometida	Deslizamento
28	2	16-5-1	71	37% área de aderência comprometida	Deslizamento
29	2	16-5-1	90,4	15% de bolha	Fendilhamento
30	2	10-7,5-1	52,6	3,5%% bolha e 6,5% logomarca	Fendilhamento
31	2	10-7,5-1	54,8		Fendilhamento
32	2	10-7,5-1	45,4	10% bolha	Fendilhamento
33	2	12,5-7,5-1	49,2	40% bolha	Deslizamento
34	2	12,5-7,5-1	39,2	58% bolha	Deslizamento
35	2	12,5-7,5-1	24,8	75% bolha	Deslizamento
36	2	16-7,5-1	80	45% bolha	Deslizamento
37	2	16-7,5-1	99,6	37% bolha	Deslizamento
38	2	16-7,5-1	123		Fendilhamento

() Os corpos de prova indicados entre parênteses foram desconsiderados.

* Os corpos de prova indicados pelo símbolo tiveram carga de ruptura superior a carga de escoamento do aço.

Tabela 24 - Tabela Resumo dos Resultados dos Ensaios para Resina 2 e 3mm.

CP	Traço	Tipo	Carga Máx. (kN)	Obs.	Ruptura
39	3	10-5-2	40	20% bolha e 18% logomarca	Fendilhamento
40	3	10-5-2	48,8		Fendilhamento
41	3	10-5-2	46,6	8% logomarca	Fendilhamento
42	3	12,5-5-2	61	8% bolha	Fendilhamento
43	3	12,5-5-2	69,8	Ruptura na interface Resina-Concreto	Fendilhamento
44	3	12,5-5-2	53,6	25% bolha	Fendilhamento
45	3	16-5-2	78,4	40% bolha *Fendilhamento após Deslizamento	*Fendilhamento
46	3	16-5-2	81,4	45% bolhas	Deslizamento
47	3	16-5-2	101,4	18% bolhas	Fendilhamento
48	3	10-7,5-2	52,6		Fendilhamento
49	3	10-7,5-2	47,8	18% logomarca	Fendilhamento
50	3	10-7,5-2	48,6	Parcial cisalhamento da resina, justificado pelo maior deslizamento	Fendilhamento
51	3	12,5-7,5-2	88,4		Fendilhamento
52	3	12,5-7,5-2	90,6	Ruptura do Aço por tração	Fendilhamento
53	3	12,5-7,5-2	80,8	Escoamento do aço em 69kN	Fendilhamento
54	3	16-7,5-2	86,8	70% bolha	Deslizamento
55	3	16-7,5-2	41,2	75% bolha	Deslizamento
56	3	16-7,5-2	51,4	80% bolha	Deslizamento
57	3	16-5-3	117,2	Girado após assentamento	Fendilhamento
58	3	16-5-3	102,4		Fendilhamento
59	3	16-5-3	84,6	Fendilhamento/deslizamento, furo com curvatura acentuada e 60% bolha	*Fendilhamento
60	3	16-5-3	95,6	Ruptura interface resina-concreto porém c/ bolhas na resina-aço	Fendilhamento
61	3	16-7,5-3	83,8	*Fendilhamento/Deslizamento	*Fendilhamento

() Os corpos de prova indicados entre parênteses foram desconsiderados.

* Os corpos de prova indicados pelo símbolo tiveram carga de ruptura superior a carga de escoamento do aço.

Além do tipo de ruptura apresentado pelos corpos de prova, são de fundamental importância as relações entre força e deslocamento relativo (deslizamento) entre o aço e o concreto observadas no ensaio de aderência, acompanhadas a seguir nos gráficos apresentados.

Nas legendas destes gráficos estão indicados os corpos de prova que foram eliminados. O critério adotado para a eliminação teve por base a análise da Tabela 22, e das curvas dos gráficos carga x deslizamento, e consistiu em:

- Resultados bem inferiores aos demais;
- Mais de 20% do comprimento de aderência afetado por bolhas ou qualquer outro tipo de falha na ligação. O percentual do comprimento de aderência afetado por bolhas foi quantificado através do exame da ligação em cada corpo-de-prova, após o seu rompimento.

O prolongamento por linhas tracejadas das curvas carga x deslocamento indicadas nos gráficos a seguir referem-se à parcela entre a retirada do transdutor e o final do ensaio. Este complemento foi plotado tomando-se por base a carga última atingida e a proporcionalidade dos deslocamentos observados antes da interrupção da medição.

As curvas médias referem-se à média dos ensaios considerados válidos para análise e foi plotada até a menor carga máxima alcançada por um dos corpos de prova do grupo.

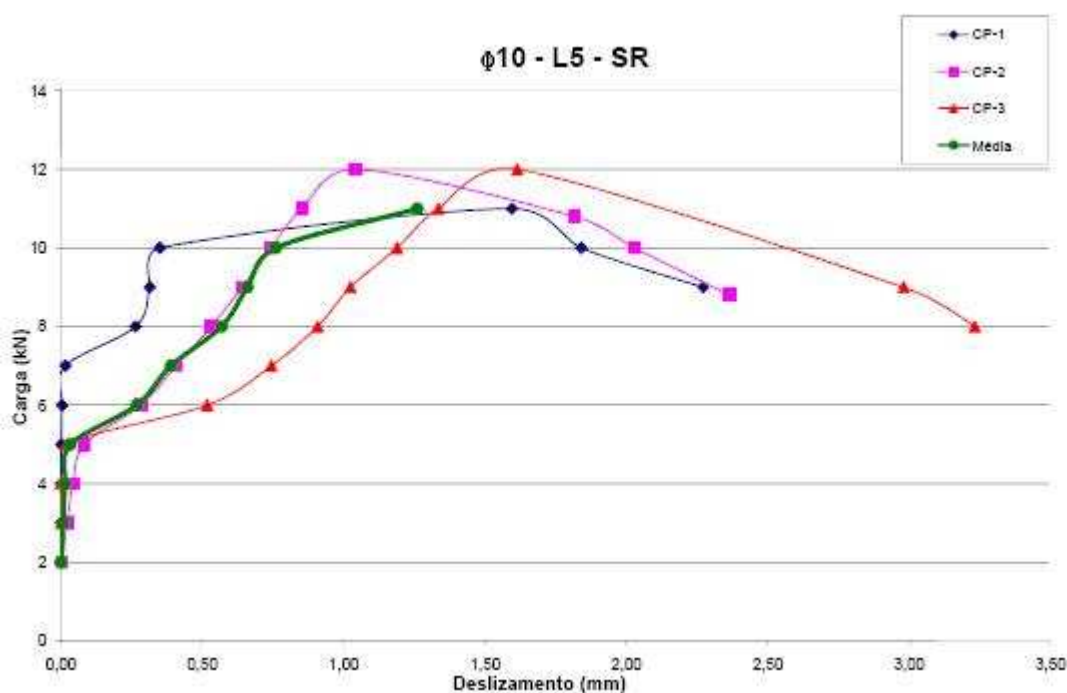


Figura 77 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-5-0.

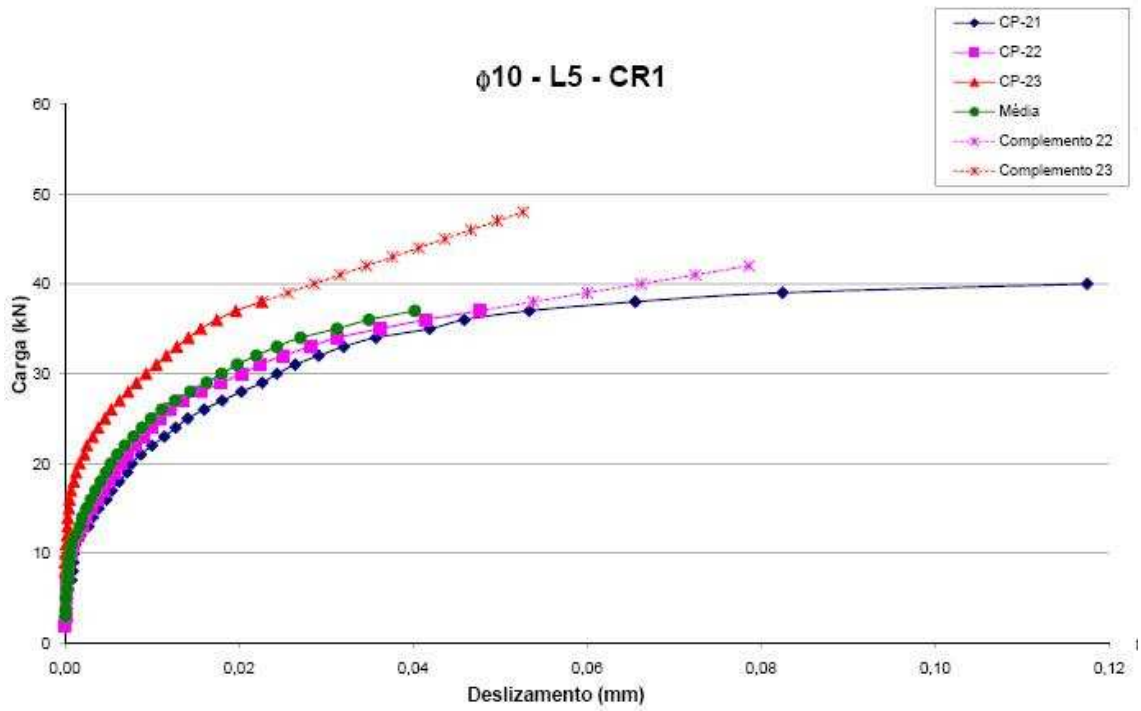


Figura 78 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-5-1.

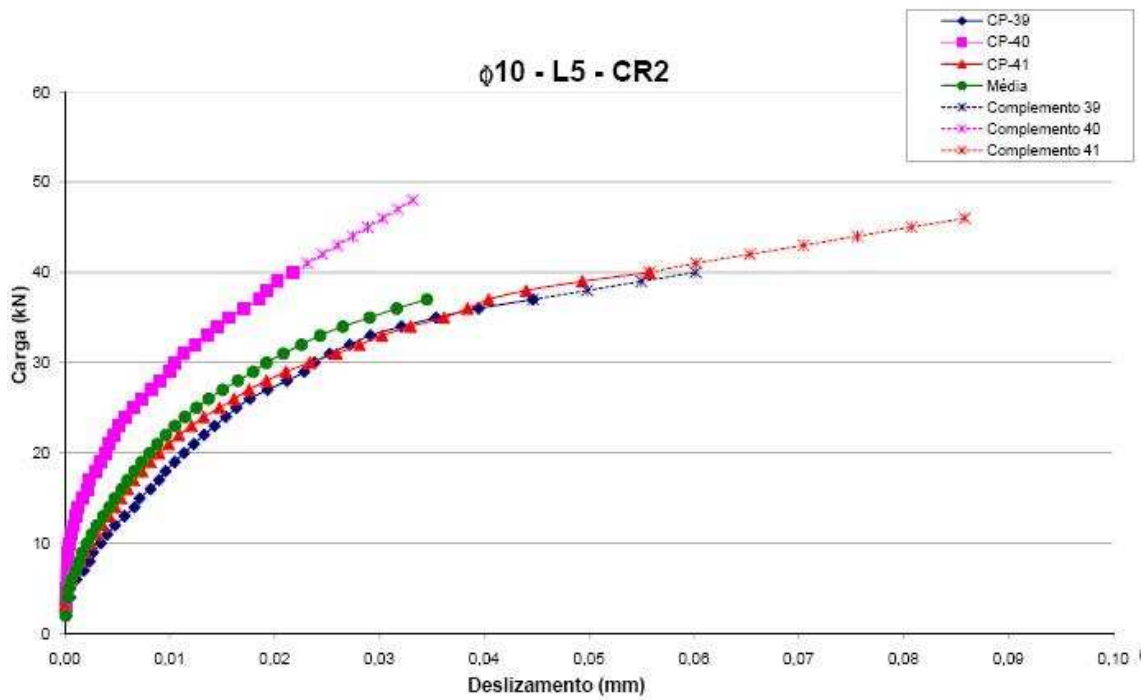


Figura 79 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-5-2.

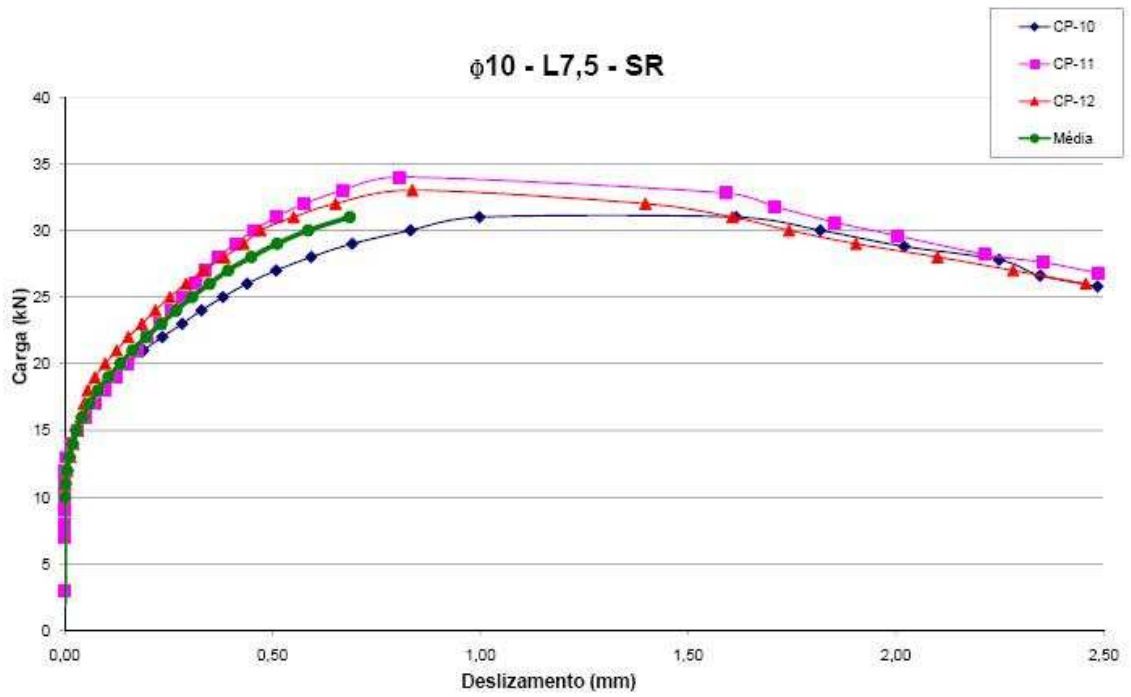


Figura 80 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-7,5-0.

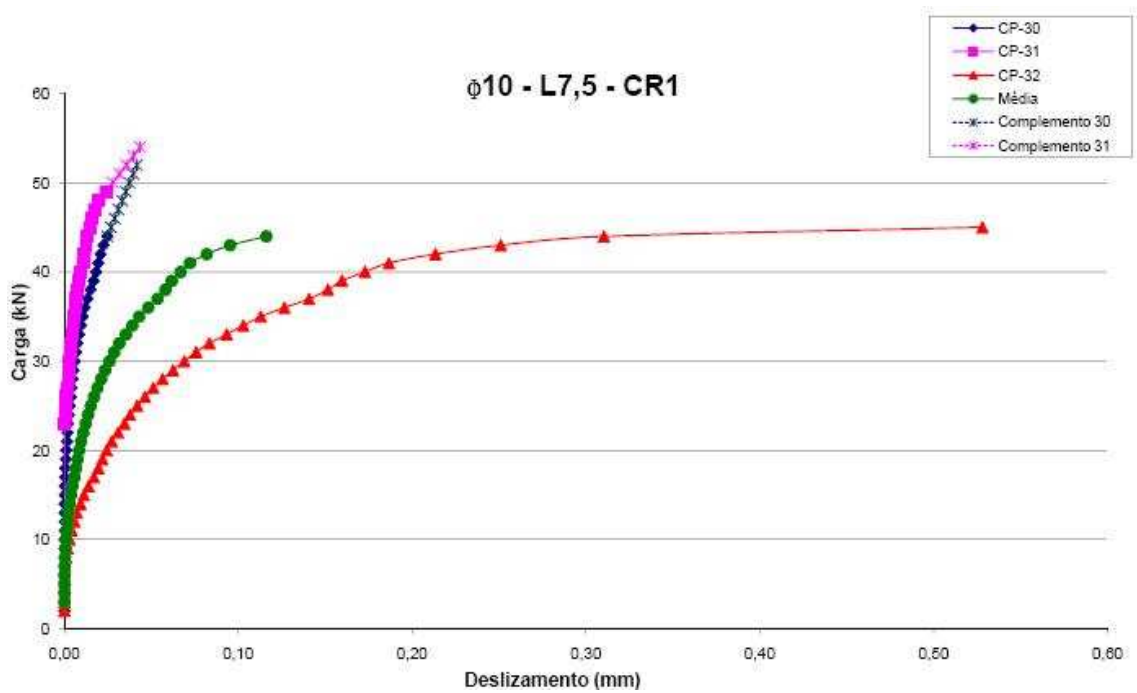


Figura 81 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-7,5-1

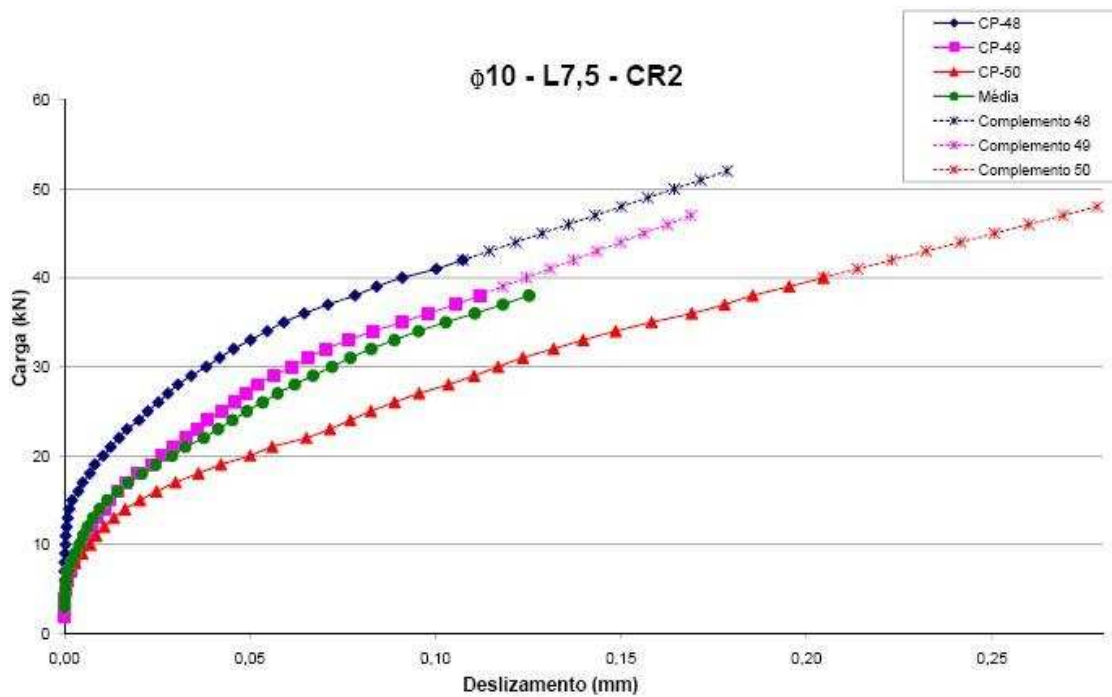


Figura 82 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10-7,5-2

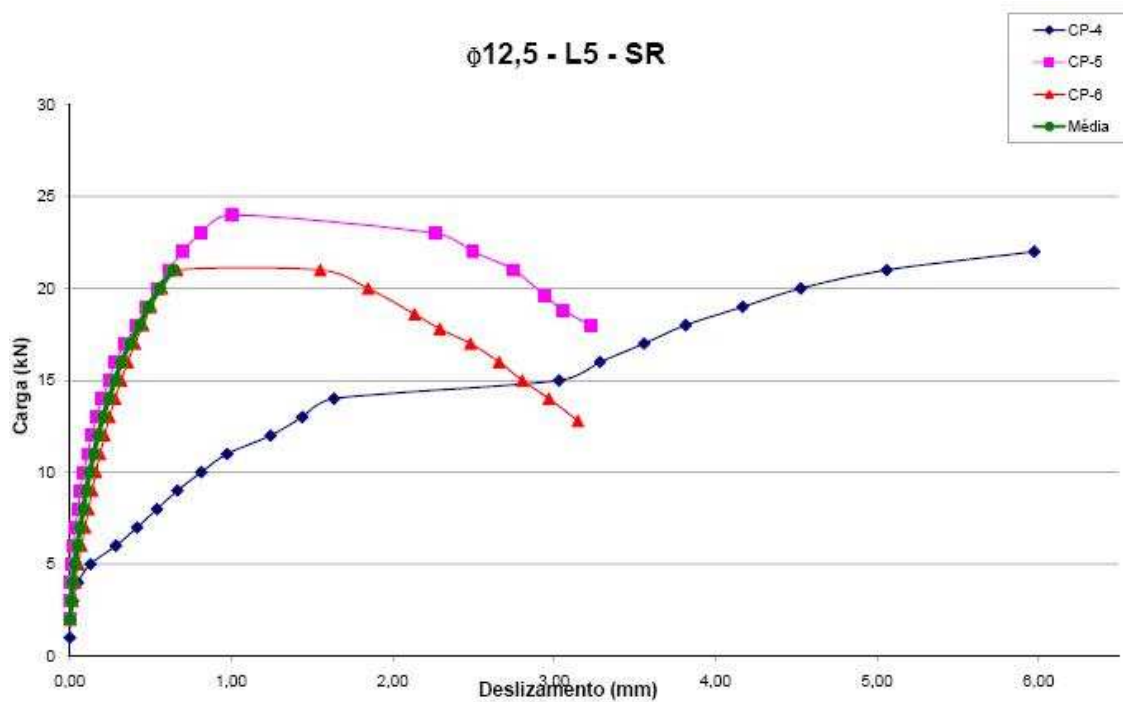


Figura 83 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-5-0. Neste grupo foram considerados para análise apenas os CP-5 e CP-6, pois o CP-4 comportou-se de maneira bastante divergente dos demais.

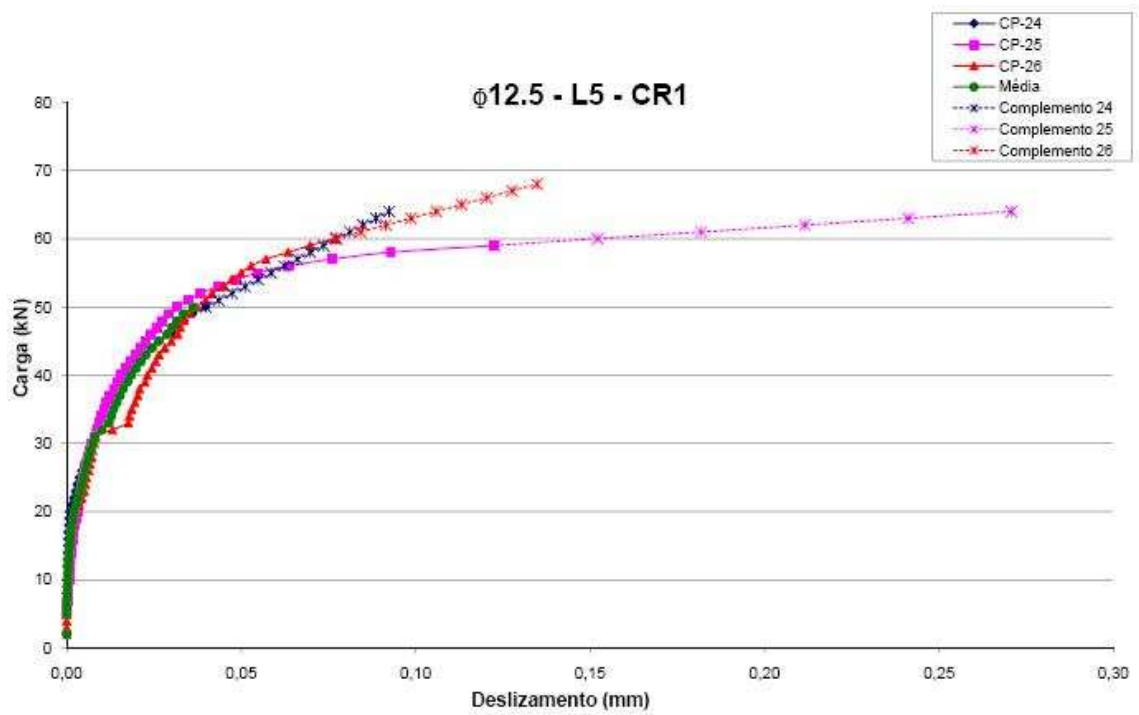


Figura 84 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-5-1

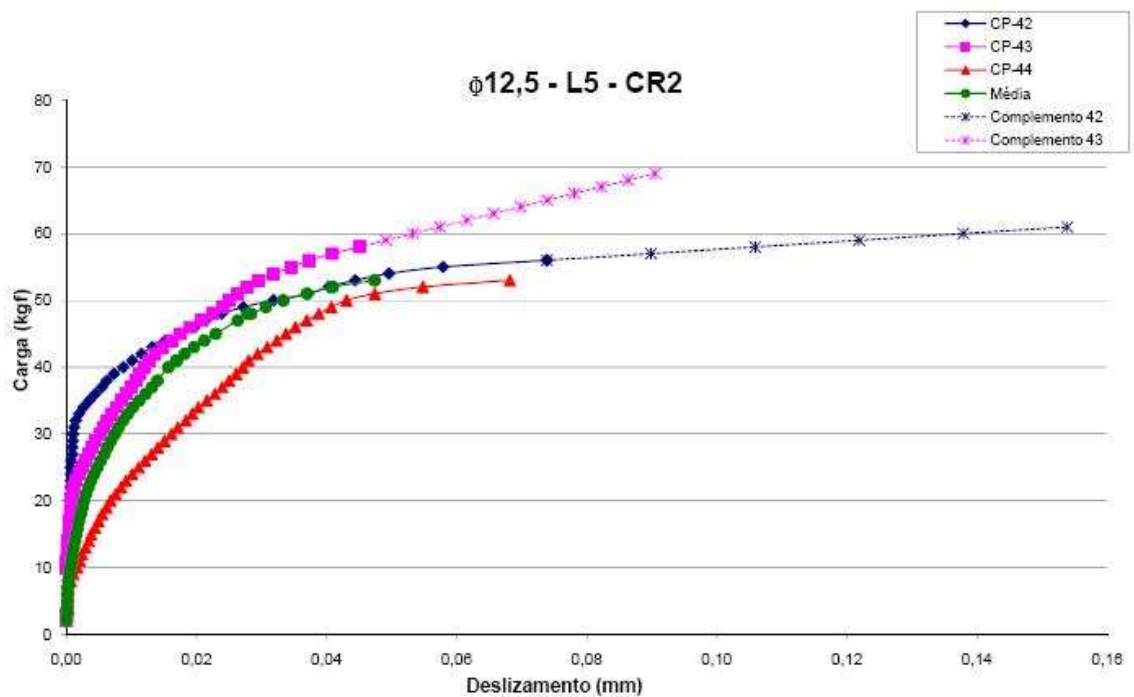


Figura 85 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-5-2

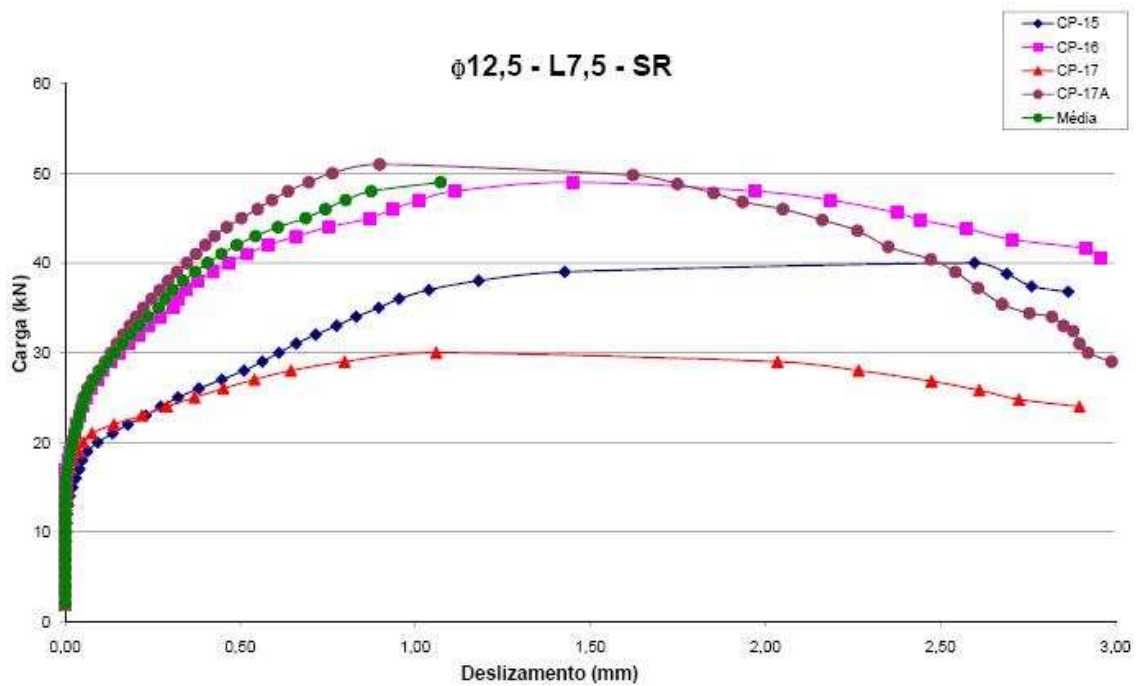


Figura 86 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-7,5-0. Neste grupo foram considerados para análise apenas os CP-16 e CP-17-A, pois os outros apresentaram falhas na aderência.

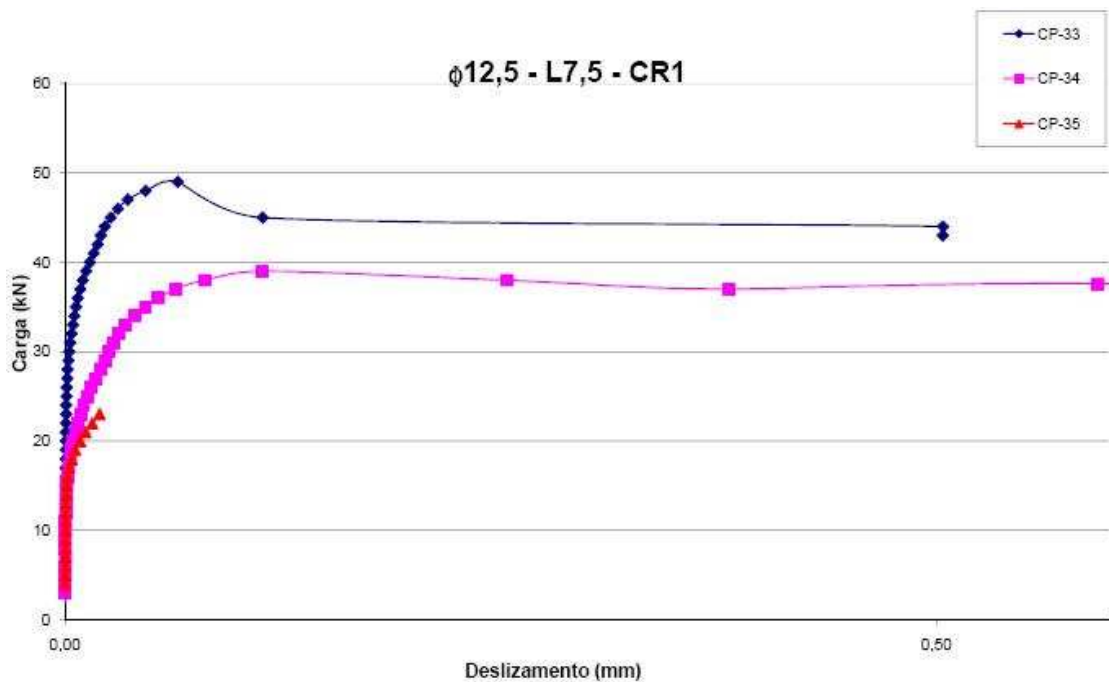


Figura 87 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-7,5-1. Este grupo foi totalmente desconsiderado das análises devido à presença de bolhas na resina.

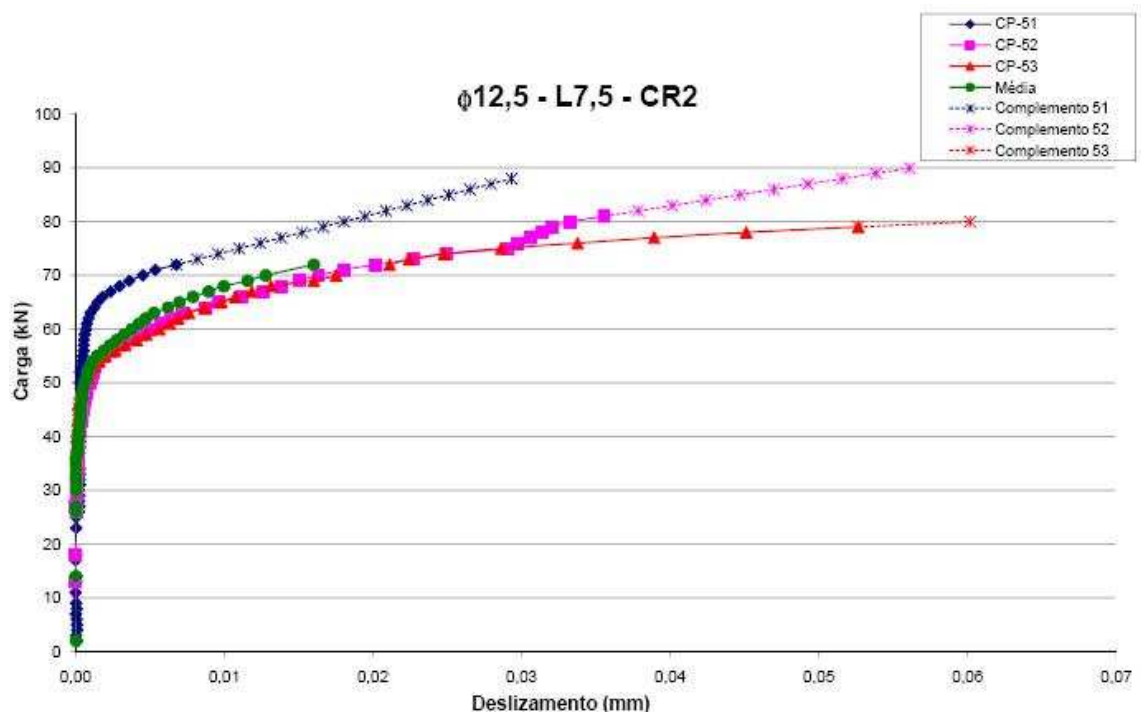


Figura 88 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5-7,5-2

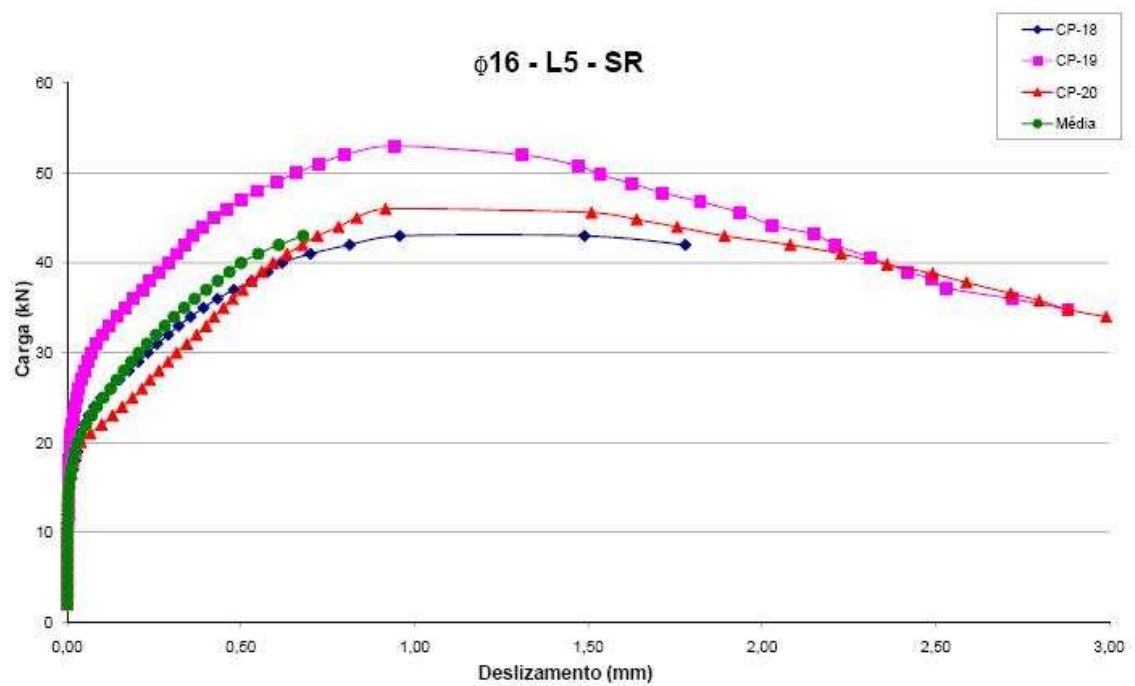


Figura 89 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-5-0

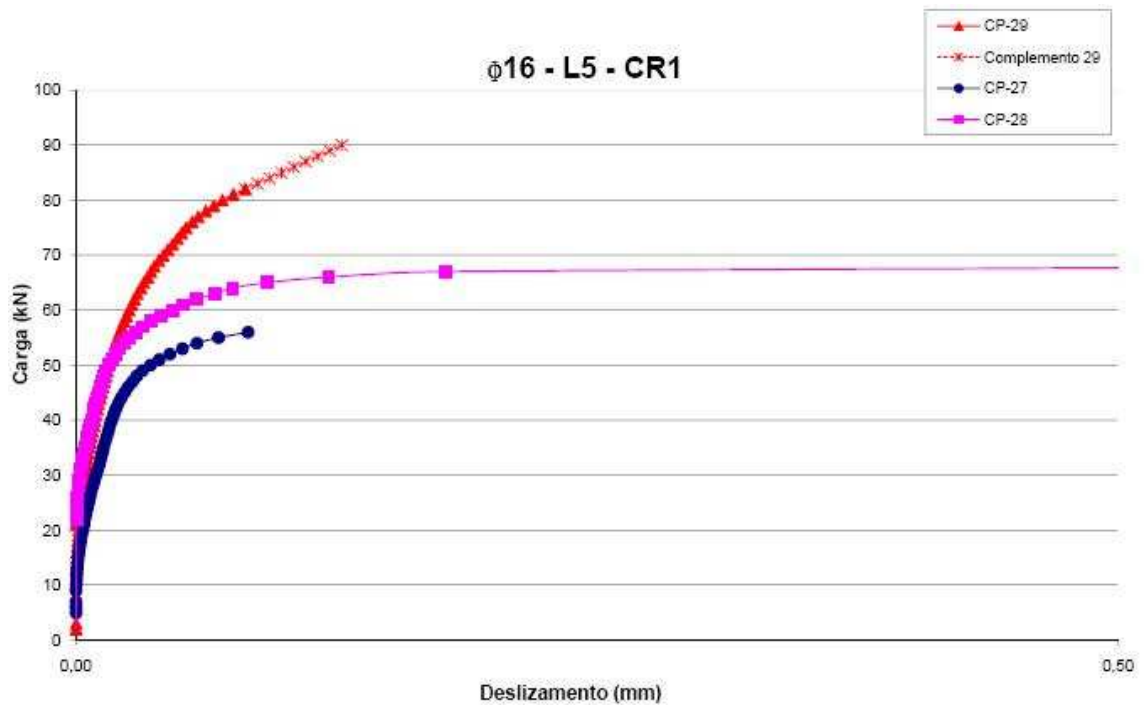


Figura 90 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-5-1. Neste grupo apenas o CP-29 foi considerado, pois os outros apresentaram bolhas na resina.

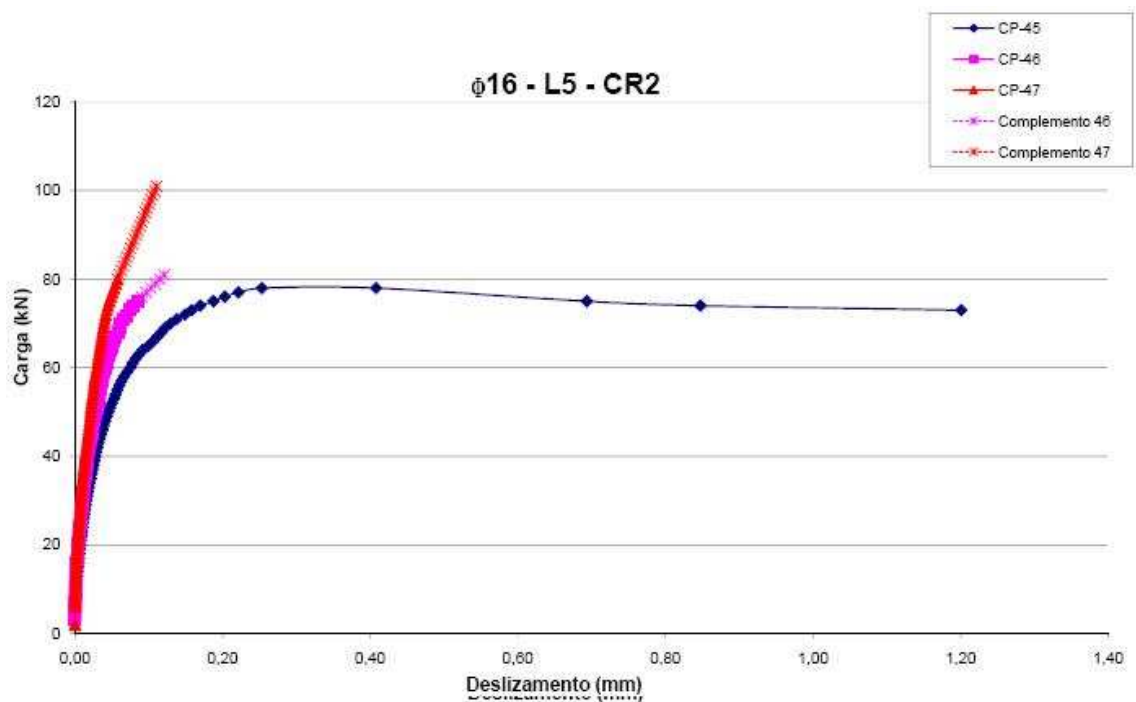


Figura 91 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-5-2. Neste grupo apenas o CP-47 foi considerado para análise pois os demais apresentaram bolhas na resina.

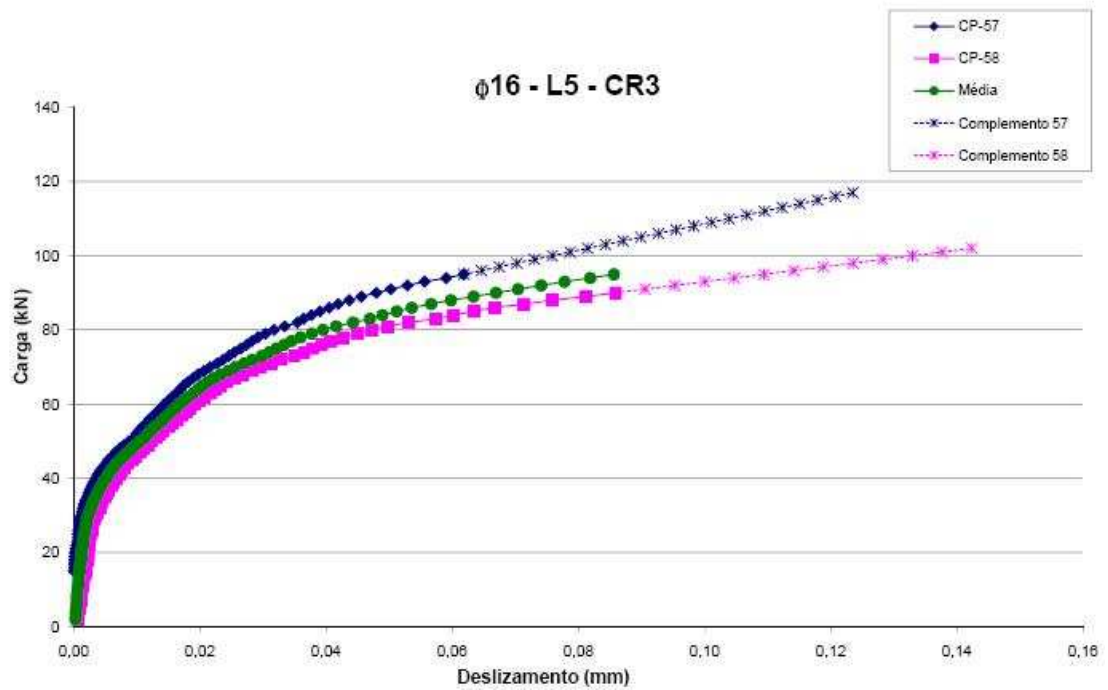


Figura 92 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-5-3

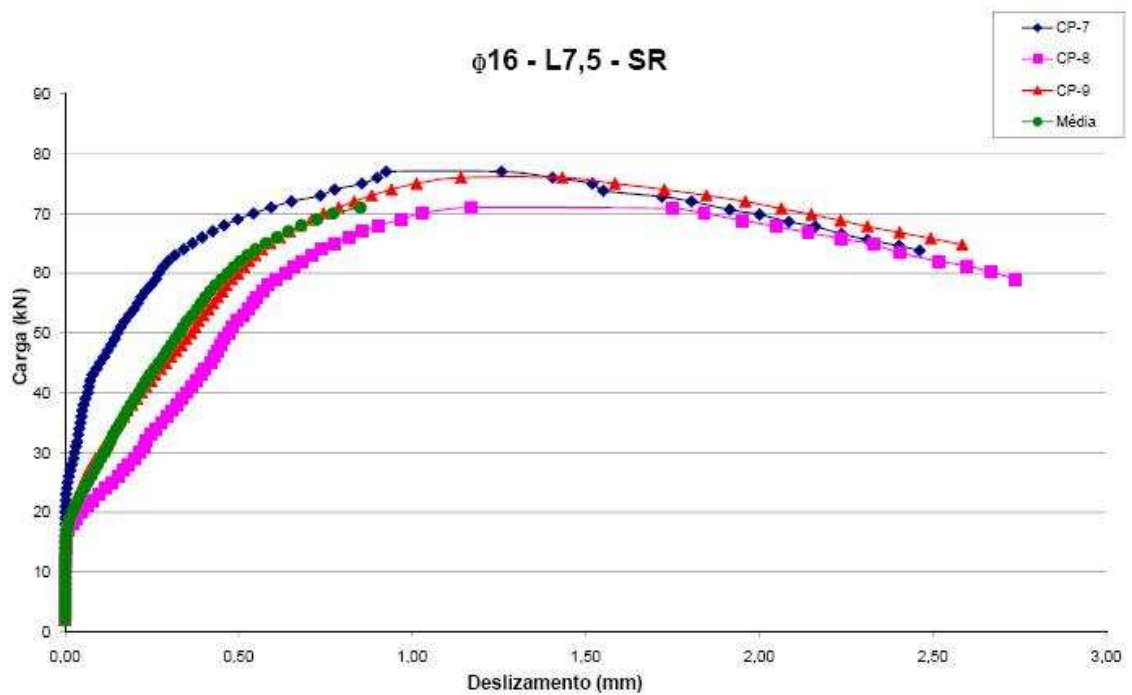


Figura 93 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-7,5-0

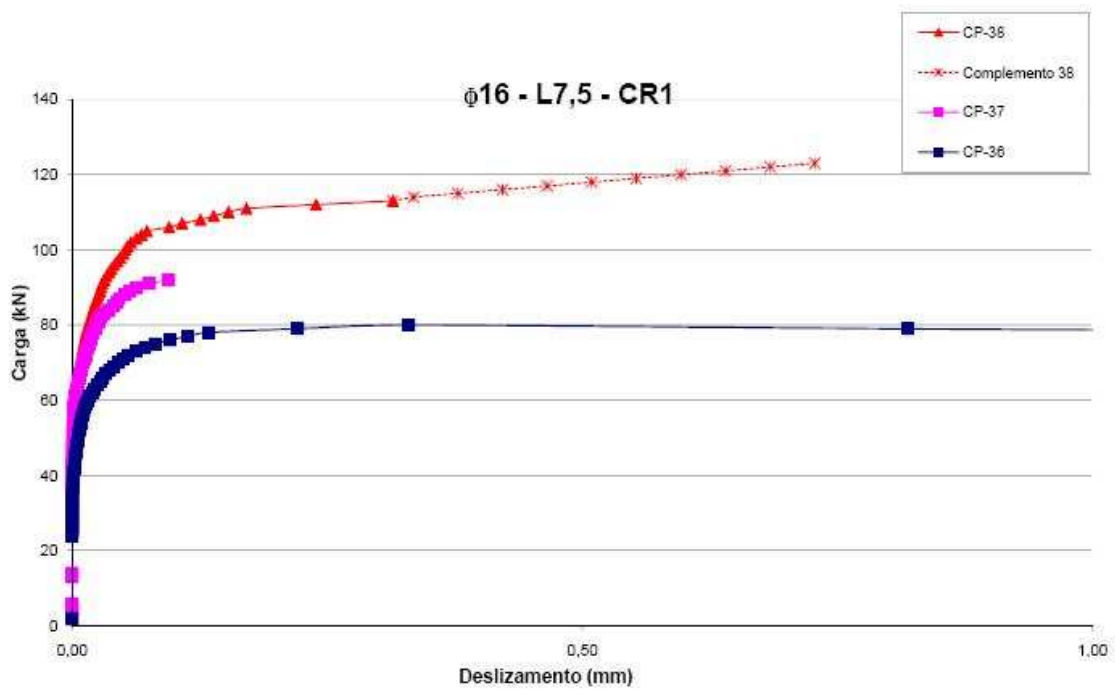


Figura 94 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-7,5-1. Neste grupo apenas o CP-38 foi considerado para análise, pois os demais apresentaram bolhas na resina.

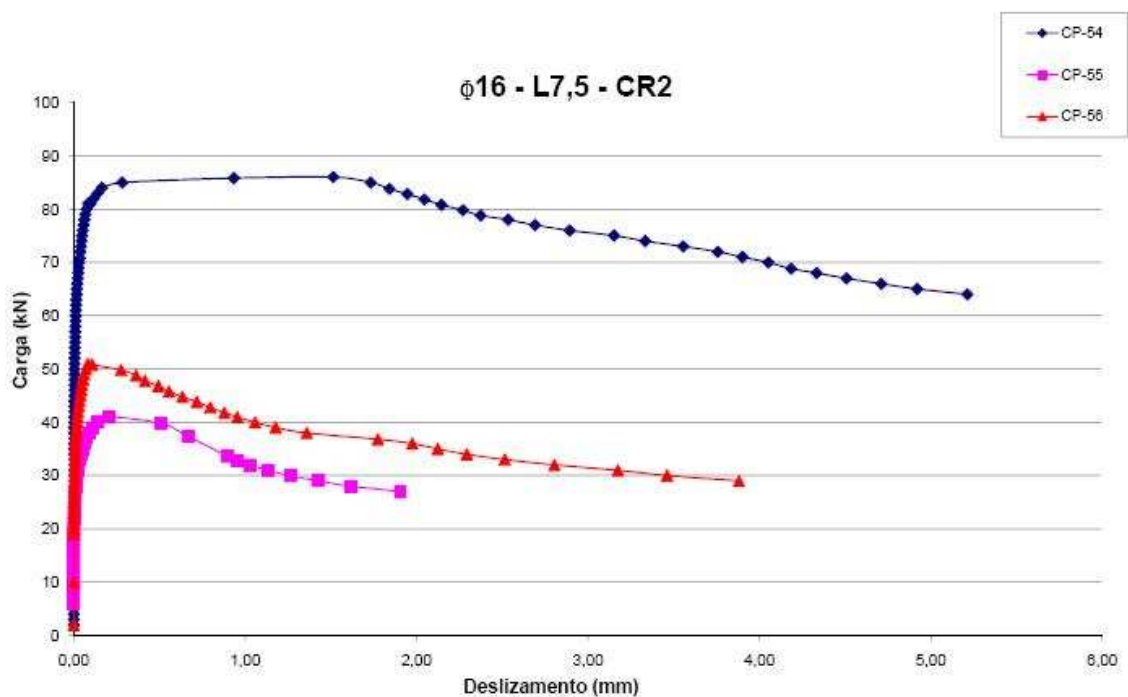


Figura 95 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-7,5-2. Este grupo foi totalmente desconsiderado das análises devido a presença de bolhas na resina.

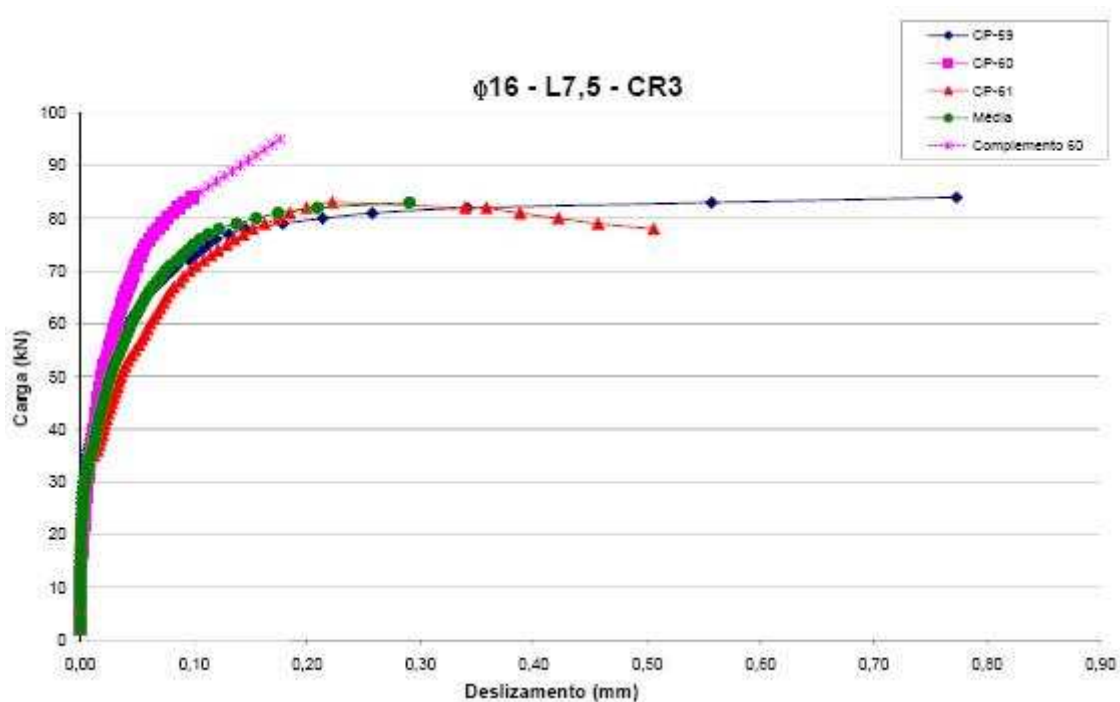


Figura 96 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16-7,5-3

3.2 Tipos de ruptura

Conforme descrito na Tabela 22 à Tabela 24, foram verificados dois tipos de ruptura nos corpos de prova ensaiados: arrancamento e fendilhamento.

A Figura 97 ilustra o aspecto da ligação após a ruptura:

- Arrancamento de barras sem resina na interface concreto-aço: ao deslizar, a barra cisalha o concreto entre as nervuras, caracterizando o arrancamento (a);
- Arrancamento de barras com resina na interface resina-aço: ao deslizar, a barra cisalha a resina entre as nervuras, caracterizando o arrancamento que ocorreram em corpos de prova com elevada presença de bolhas de ar na ligação (b);
- Fendilhamento do concreto:
 - Ruptura na interface entre a resina e a barra de aço (c);
 - Ruptura do concreto envolvente com formação de bulbo e na interface entre a resina e a barra de aço (d);

- Ruptura da barra de aço por tração (e).

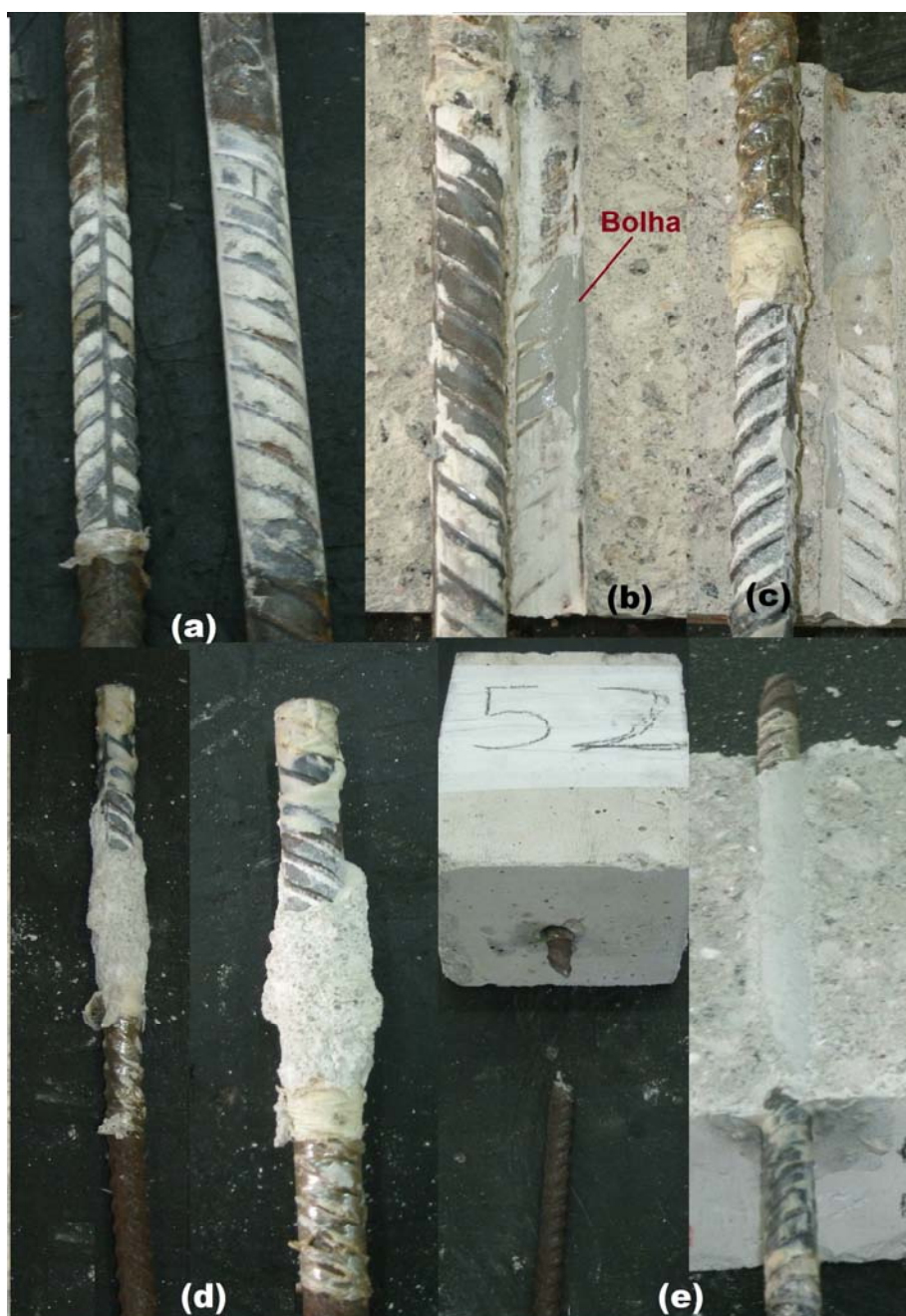


Figura 97 - Formas de ruptura ocorridas durante o ensaio.

3.3 Resultado dos ensaios das vigas

As vigas de concreto bi-apoiadas foram ensaiadas à flexão, sendo o carregamento constituído por duas cargas concentradas localizadas nos terços do

vão, conforme ilustra a Figura 98. O carregamento foi aplicado através de uma prensa hidráulica do tipo Losenhausen – LOS de 100t.

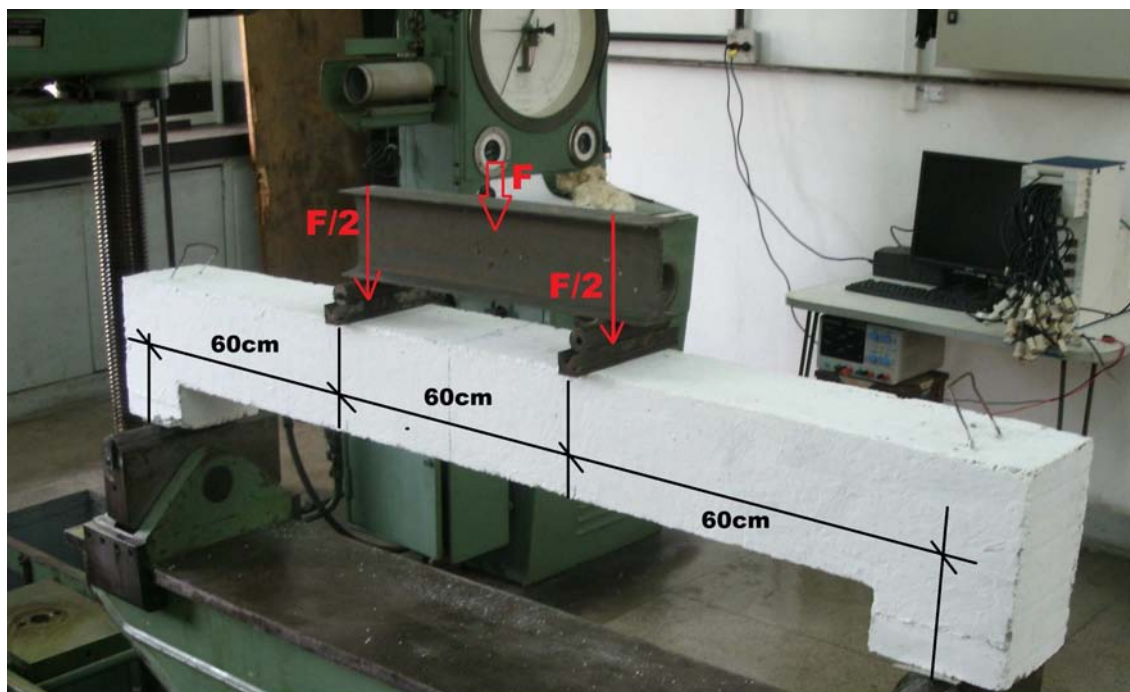


Figura 98 - Esquema de carga viga 1.

Na viga 1, as flechas nas seções de aplicação de carga e no meio do vão foram medidas com o auxílio de deflectômetros analógicos, onde os dados coletados estão plotados no gráfico da Figura 99, nesta, observa-se a homogeneidade das leituras dos deslocamentos obtidas no ensaio.

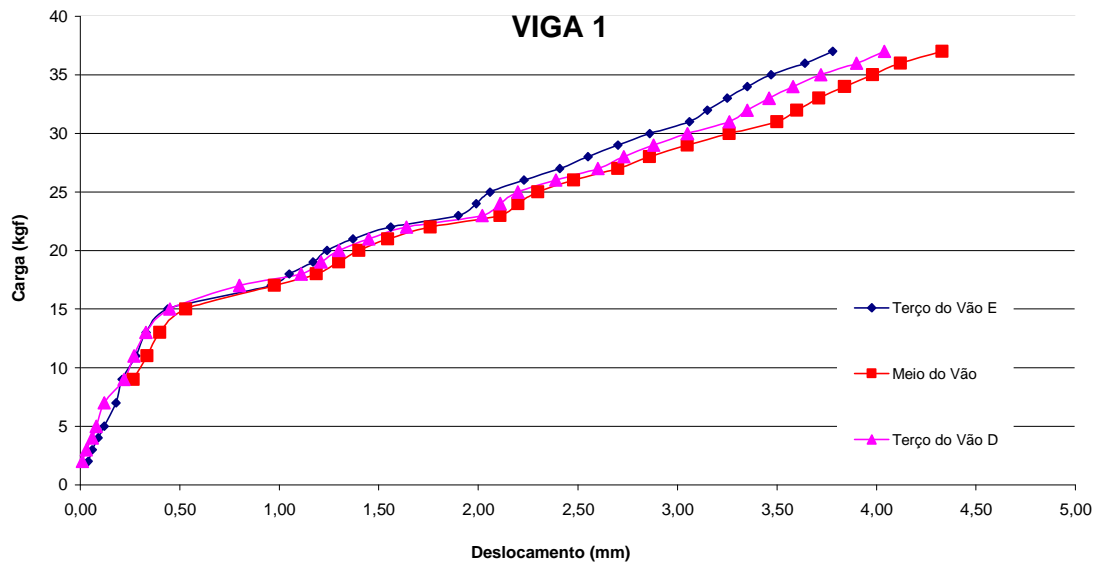


Figura 99 - Curva carga x deslocamento viga 1.

A instrumentação da viga 2 pode ser vista na Figura 100, onde além dos deflectômetros analógicos foram incluídos extensômetros elétricos colados à superfície do concreto, nos vão de corte e no meio do vão, com o objetivo de avaliar as deformações sofridas pela barra longitudinal colada.

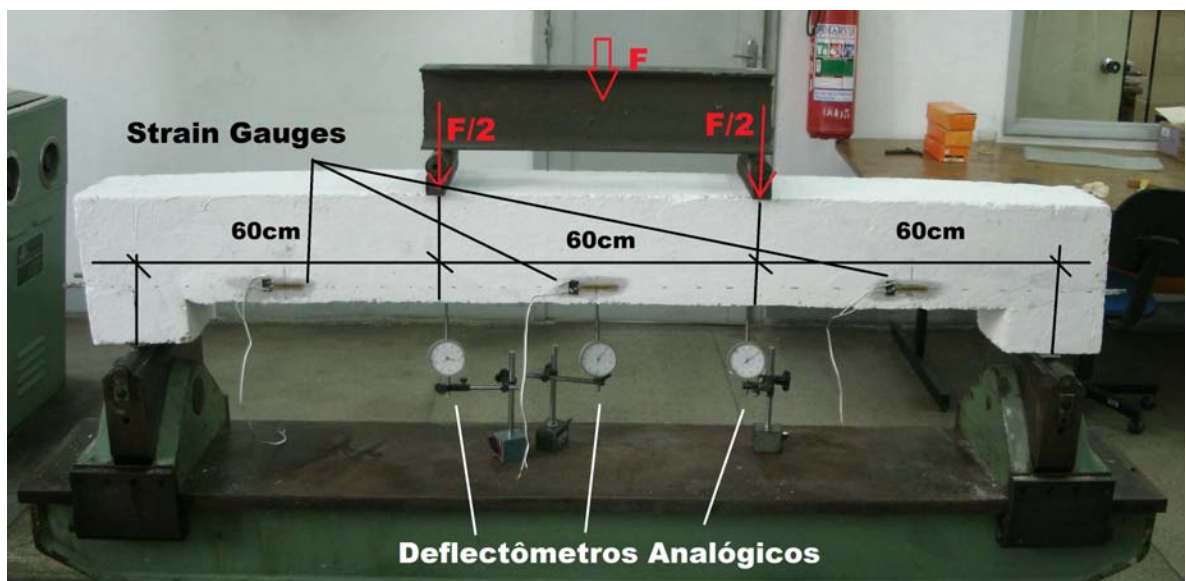


Figura 100 - Esquema de carga Viga 2.

O gráfico da Figura 101 apresenta as flechas nos pontos de aplicação de carga, bem como a flecha máxima no meio do vão, indicando novamente a homogeneidade dos resultados obtidos.

No que diz respeito aos resultados dos extensômetros colados, aquele posicionado no meio do vão foi interceptado por uma fissura, parando de funcionar para uma carga de aproximadamente 24kN. O extensômetro colado no vão de corte apresentou deformações muito pequenas e não significativas, por isso, serão desconsideradas.

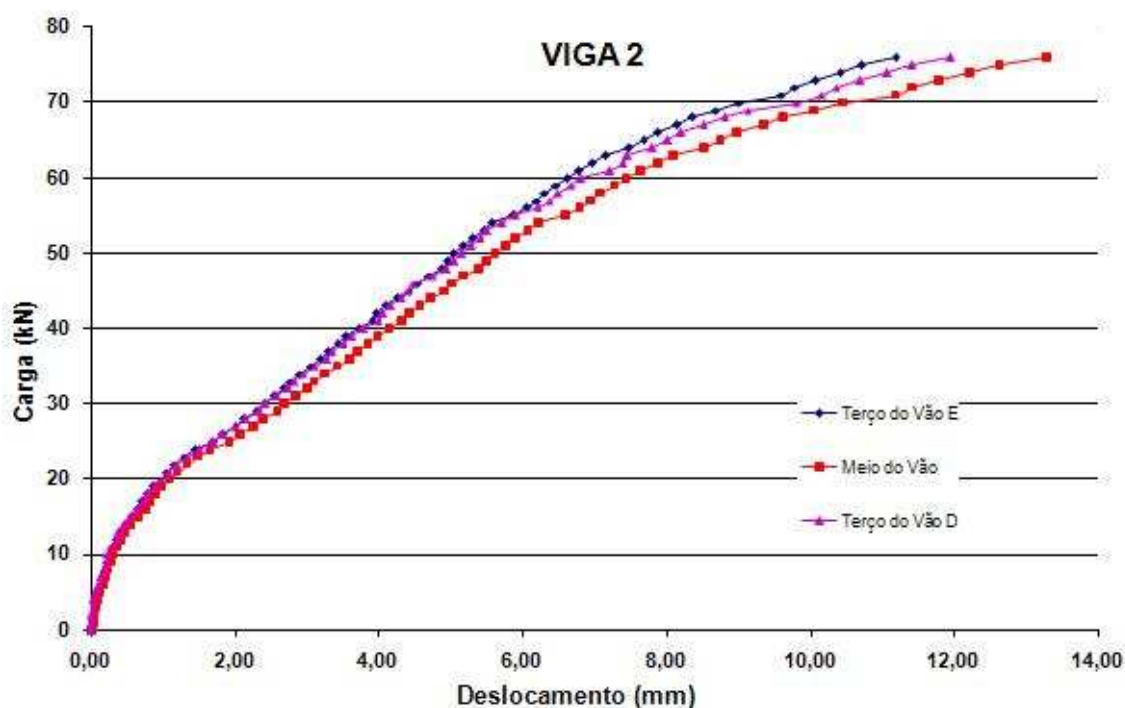


Figura 101 - Curva carga x deslocamento viga 2.

A ruptura das vigas se deu por esmagamento no concreto na mesa superior e deformação excessiva da barra tracionada. Como era esperado, devido ao detalhamento das armaduras, não foram verificadas fissuras de esforço cortante. As fissuras de flexão tiveram comportamento simétrico em relação ao meio do vão. A configuração de ruptura das vigas pode ser visualizada na Figura 102 e na Figura 103.

Como já era esperado, o comportamento de ambas as vigas foram semelhantes, visto que a resina cumpre de maneira eficiente sua característica

adesiva quanto à colagem de barras de aço no concreto, garantindo, assim, a ancoragem das barras longitudinais de tração.



Figura 102 - Rompimento e fissuração da viga 1.



Figura 103 - Rompimento e fissuração viga 2.

No gráfico, carga x deslocamento no meio do vão, mostrado na Figura 104, vê-se que o comportamento de ambas as vigas foi idêntico ao longo do carregamento, indicando que a resina cumpriu de maneira eficiente sua

característica adesiva quanto à colagem do aço no concreto, garantindo a ancoragem das barras longitudinais de tração mesmo sem a utilização de ganchos de ancoragem.

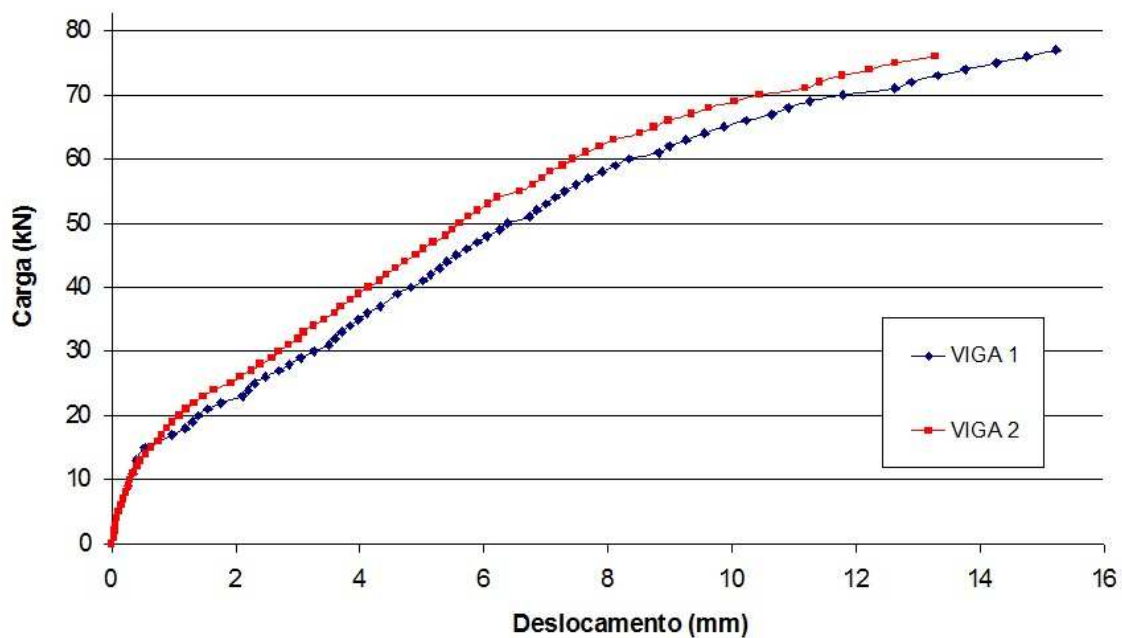


Figura 104 – Curva carga x deslocamento no meio do vão das vigas ensaiadas.

4 INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise dos resultados foram considerados apenas os corpos de prova válidos, apresentados no item anterior.

4.1 Interpretação e análise dos resultados

Em barras nervuradas, no início do carregamento, mas já perdida a adesão química, as nervuras induzem grandes tensões no concreto e originam microfendilhação transversal ao eixo da barra na extremidade das nervuras, seguida por fendilhação ao longo da barra. Com a continuidade do carregamento, a fendilhação longitudinal alastra-se radialmente devido ao aumento da ação das nervuras, que esmagam o concreto que lhes é adjacente e introduzem um estado de tensão de tração. Esta pressão exercida pelas nervuras no concreto circundante é resistida pelas tensões de cintagem no concreto; a resistência mecânica e a rigidez da aderência são asseguradas essencialmente pelo encaixe ao longo da armadura no concreto não cisalhado, pelas bielas radiais de concreto e pelo anel de concreto exterior não danificado. Uma vez esgotada a resistência do concreto, as fissuras alcançam a superfície do revestimento provocando a ruptura brusca do concreto. É o que se conhece na literatura como ruptura por fendilhamento do concreto.

Durante os ensaios foi possível observar-se claramente este mecanismo de ruptura nos modelos com resina. O acúmulo de tensões transversais no topo das nervuras provocou fissuras defasadas de 90° , de acordo com a posição dos topos das nervuras nas barras de aço, como é facilmente percebido nas fotografias dos corpos de prova rompidos apresentados na Figura 106.

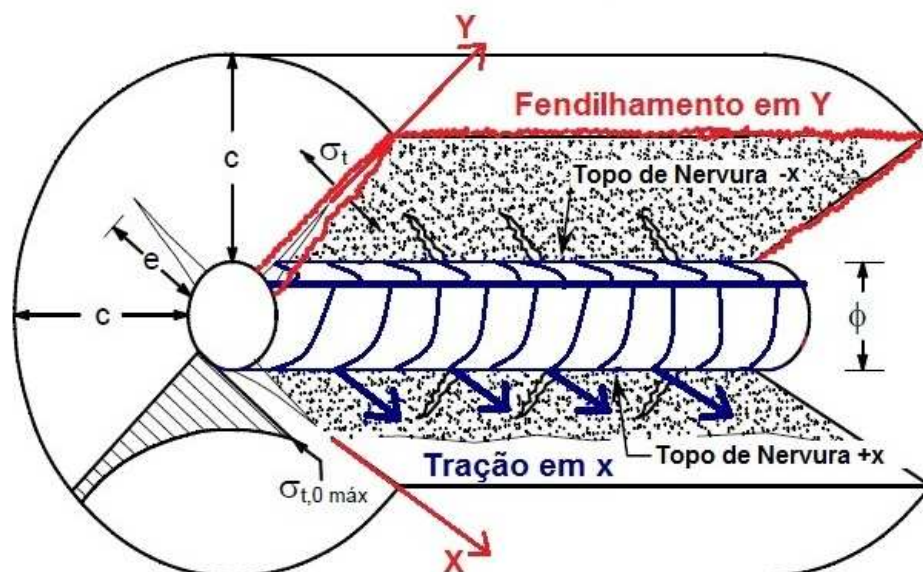


Figura 105 - Adaptação do Esquema de fissuras de fendilhamento, proposta por Tassios (1979), apud Oliveira (2008).

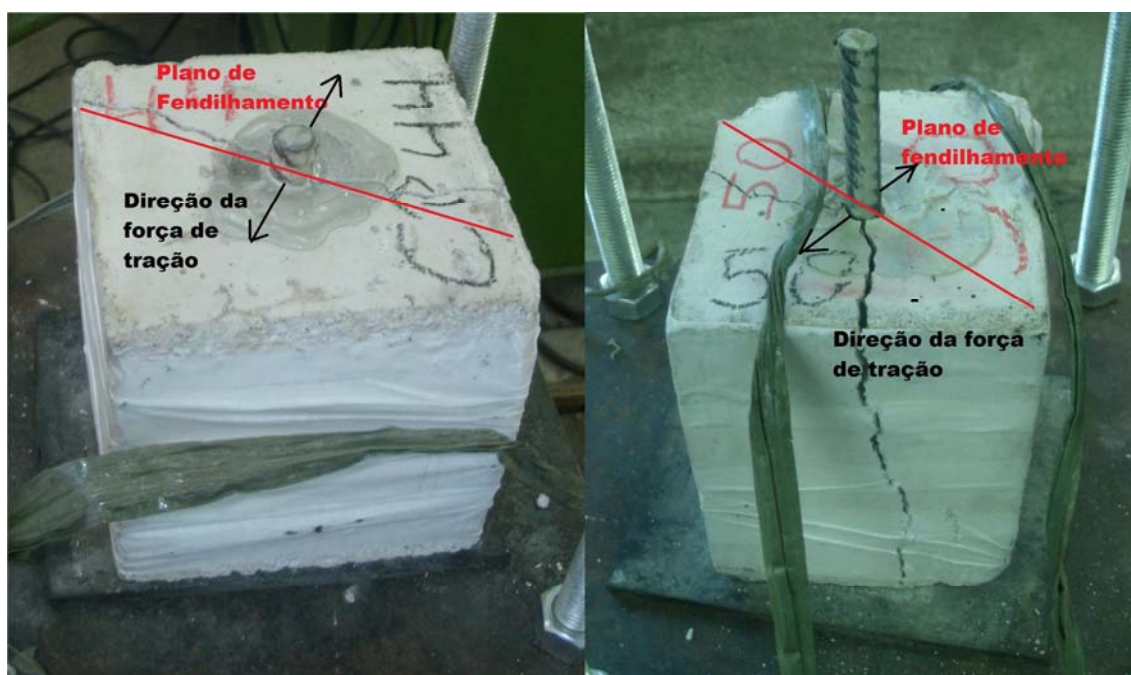


Figura 106 - Detalhe da ocorrência do fendilhamento.

Quando se insere resina epóxi entre o aço e o concreto ocorre um aumento significativo da resistência da ligação, visto que a resina epóxi, além de possuir excelente capacidade adesiva, possui resistência superior a do concreto utilizado.

4.2 Resultados modelos sem resina (SR)

4.2.1 Influencia do comprimento de aderência

Para um mesmo diâmetro de barra, o aumento do comprimento de aderência (ℓ) conduziu a maiores valores de força de adesão e carga última, em todos os modelos estudados, conforme mostra a Tabela 22, Figura 107, Figura 108 e Figura 109.

Isto também foi verificado por FELÍCIO (1995).

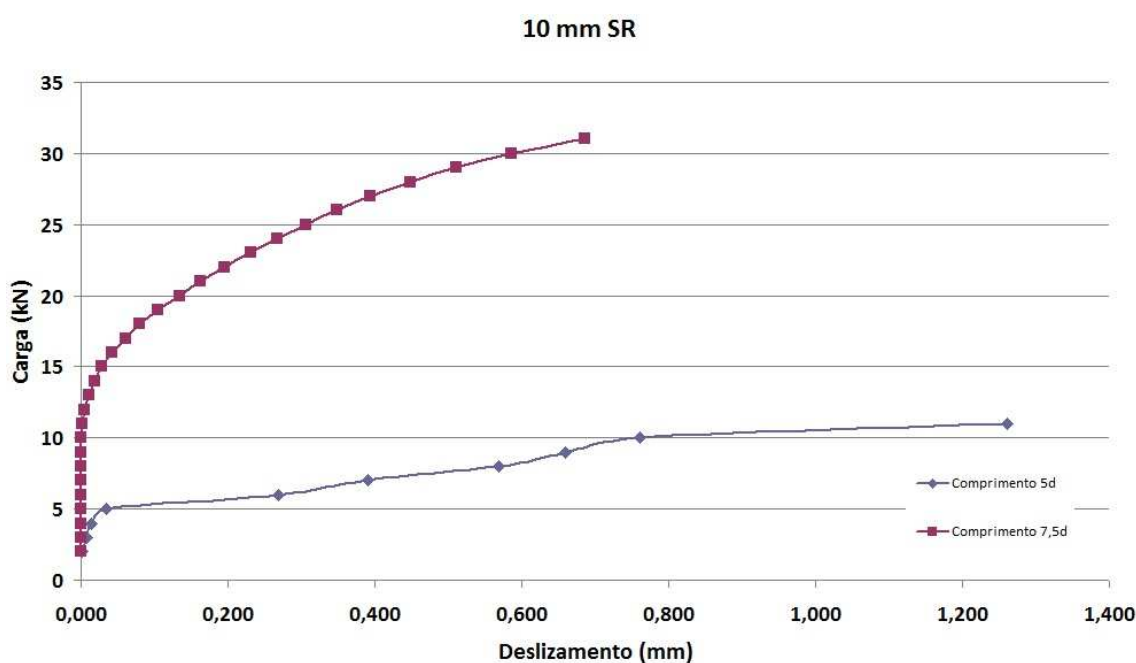


Figura 107 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10mm SR

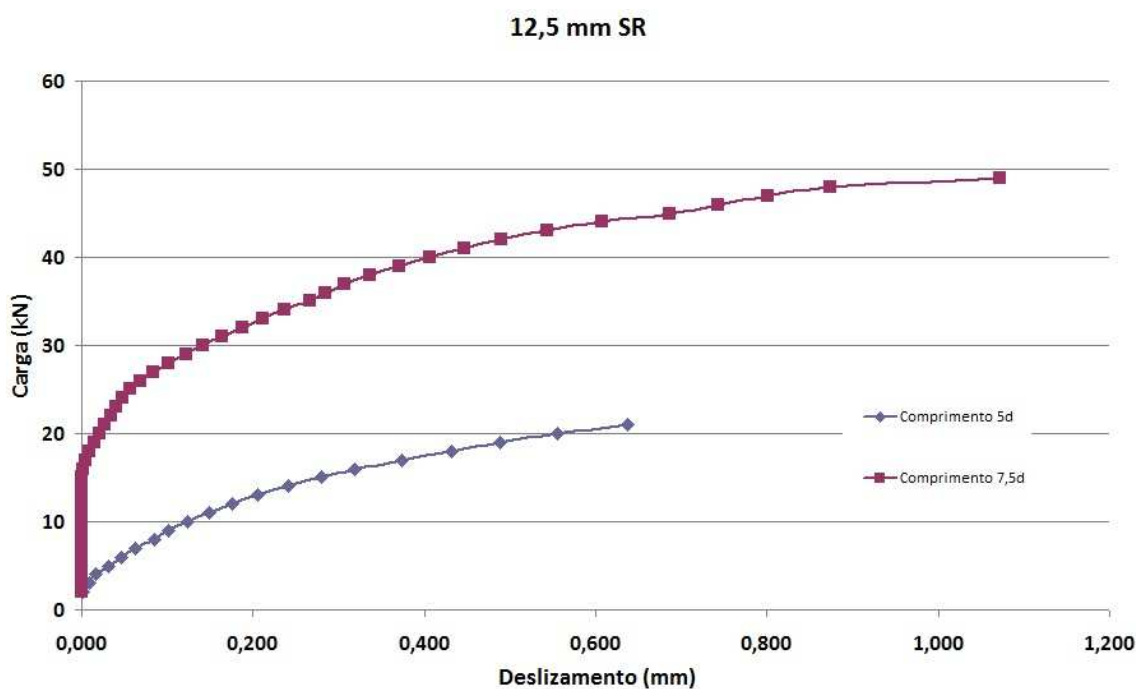


Figura 108 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5mm SR

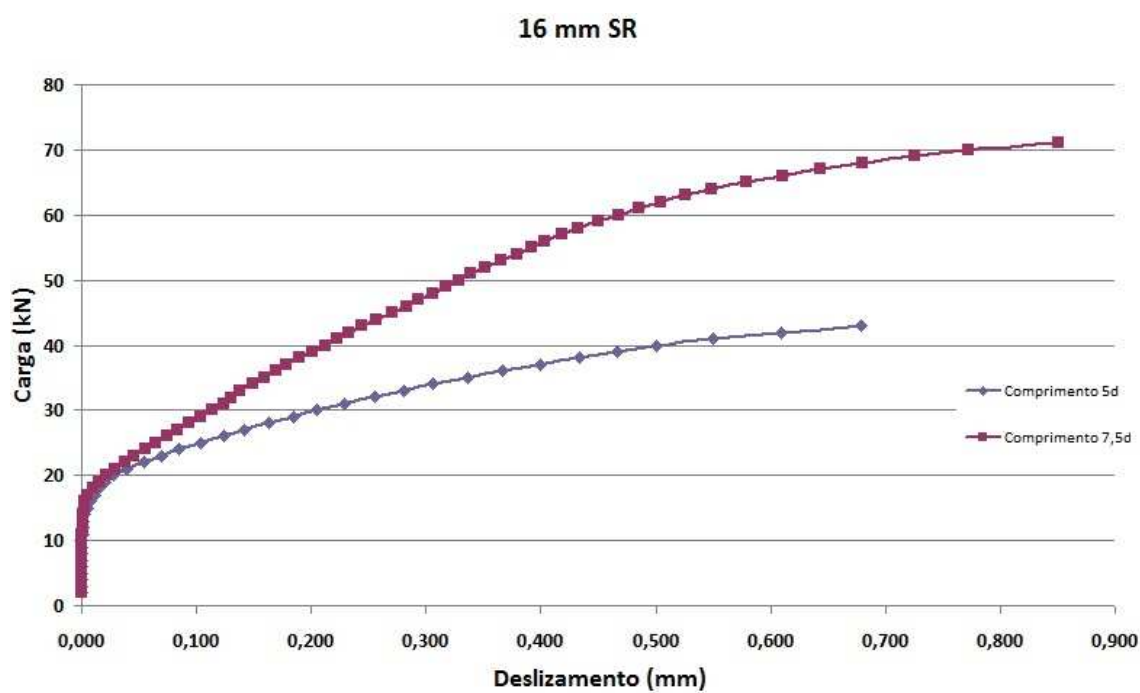


Figura 109 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16mm SR

4.2.2 Influência do diâmetro da barra

Para um mesmo comprimento de aderência, os valores da força de adesão e da carga última aumentam quanto maior for o diâmetro da barra.

Conforme Tabela 22, Figura 110 e Figura 111.

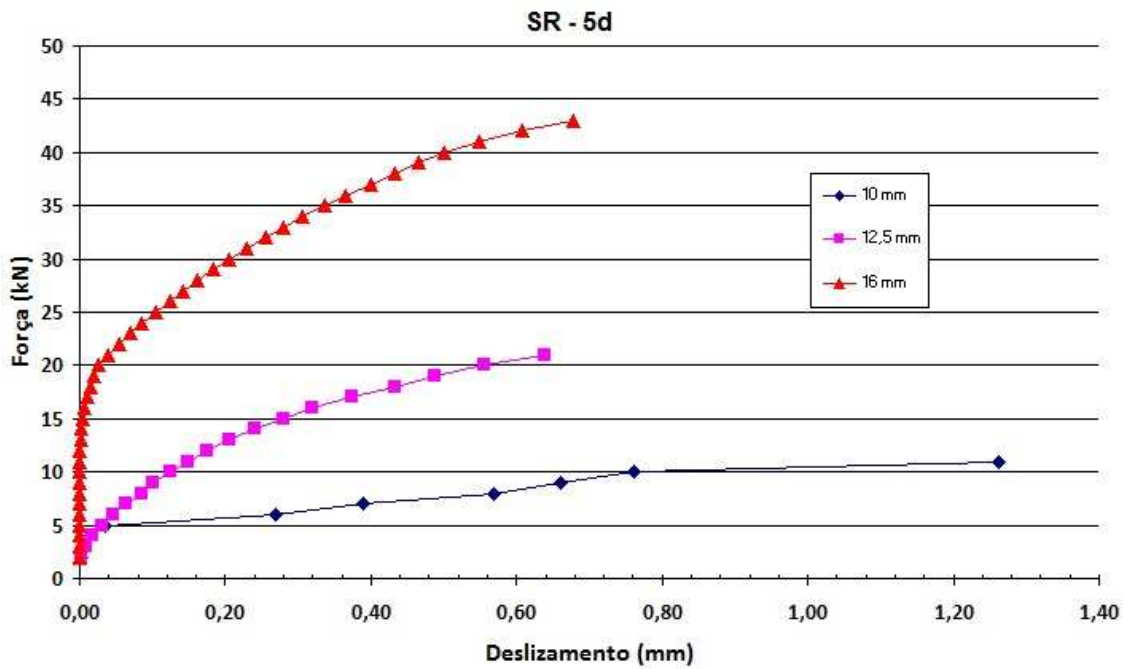


Figura 110 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo SR e Comprimento de Aderência de 5φ.

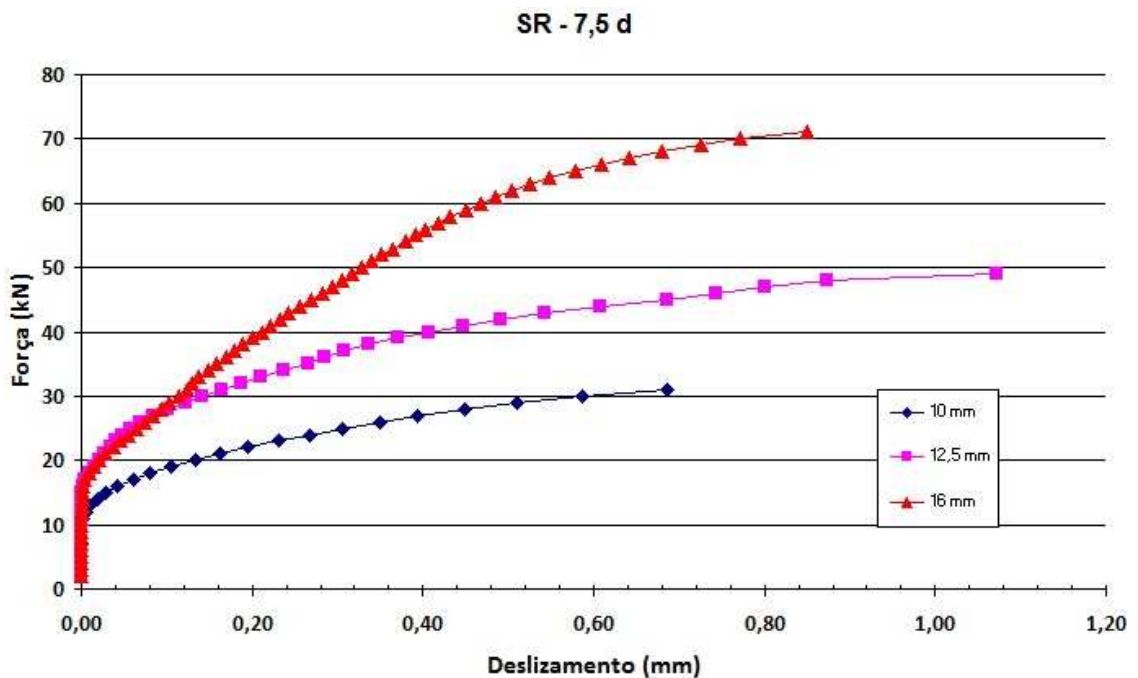


Figura 111 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo SR e Comprimento de Aderência de 7,5φ.

4.2.3 Modo de ruptura dos modelos SR

Todos os corpos de prova dos modelos SR romperam por arrancamento, semelhante ao resultado do estudo realizado por Barbosa (2001), tal qual é verificado neste tipo de ensaio (pull-out-test).



Figura 112 - Ruptura do CP-2 com detalhes do deslizamento entre o aço e o concreto.



Figura 113 - Detalhe do cisalhamento do concreto entre as nervuras da barra no CP-2.



Figura 114 - Ruptura do CP-5 e detalhe do cisalhamento do concreto entre as nervuras que configura o deslizamento da barra

4.3 Modelos com resina (CR)

4.3.1 Influência do comprimento de aderência

De acordo com os valores apresentados na Tabela 23, na Tabela 24 e na Figura 115 verifica-se que o aumento do comprimento de aderência leva ao aumento da força de adesão e da força última para todos os diâmetros, sendo mais significativo para as barras de 12,5 e de 16mm, independentemente da espessura da resina de colagem.

Bouazaoui (2008) verificou o mesmo para barras com diâmetro de 12, 16 e 20mm.

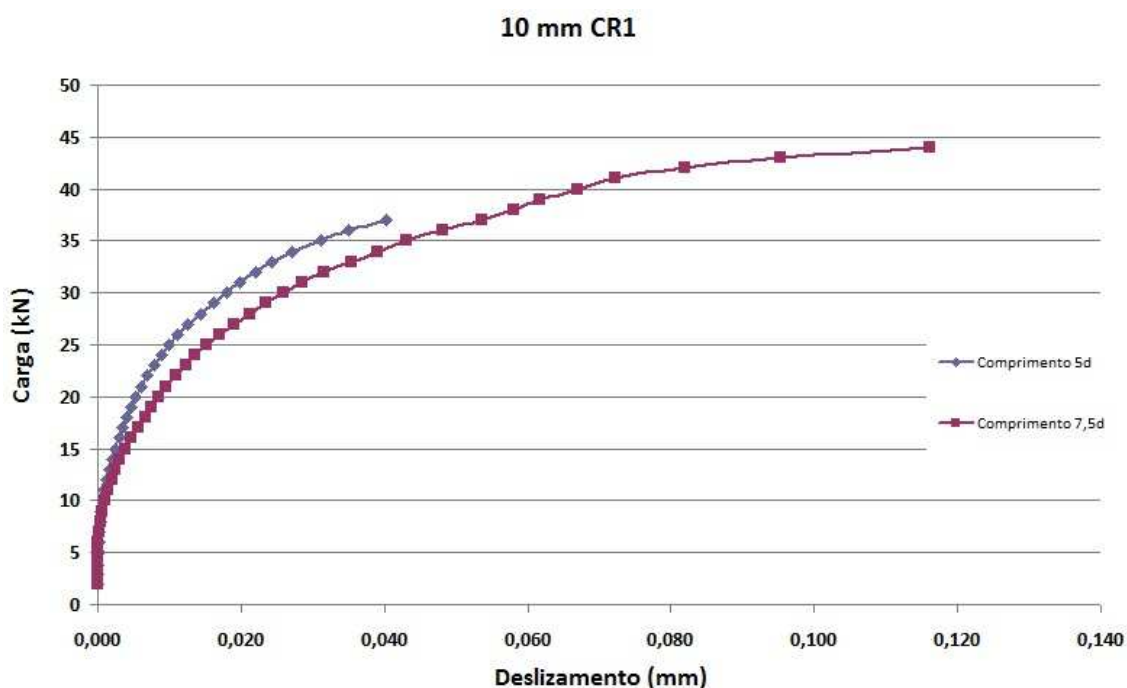


Figura 115 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10mm CR1

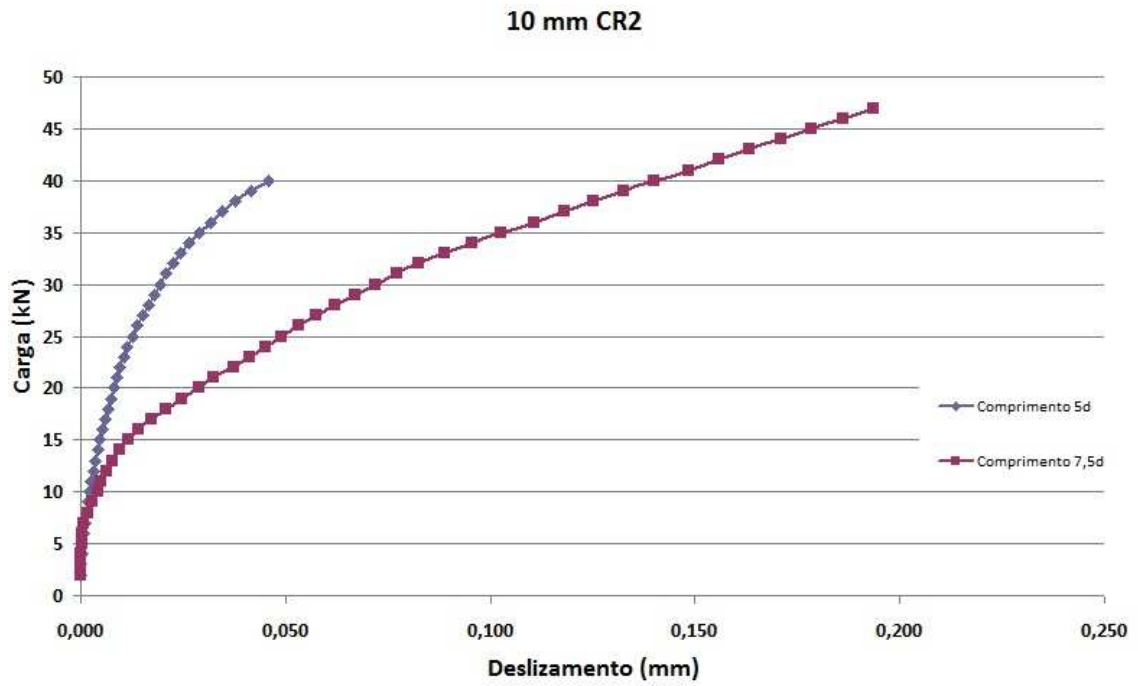


Figura 116 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10mm CR2

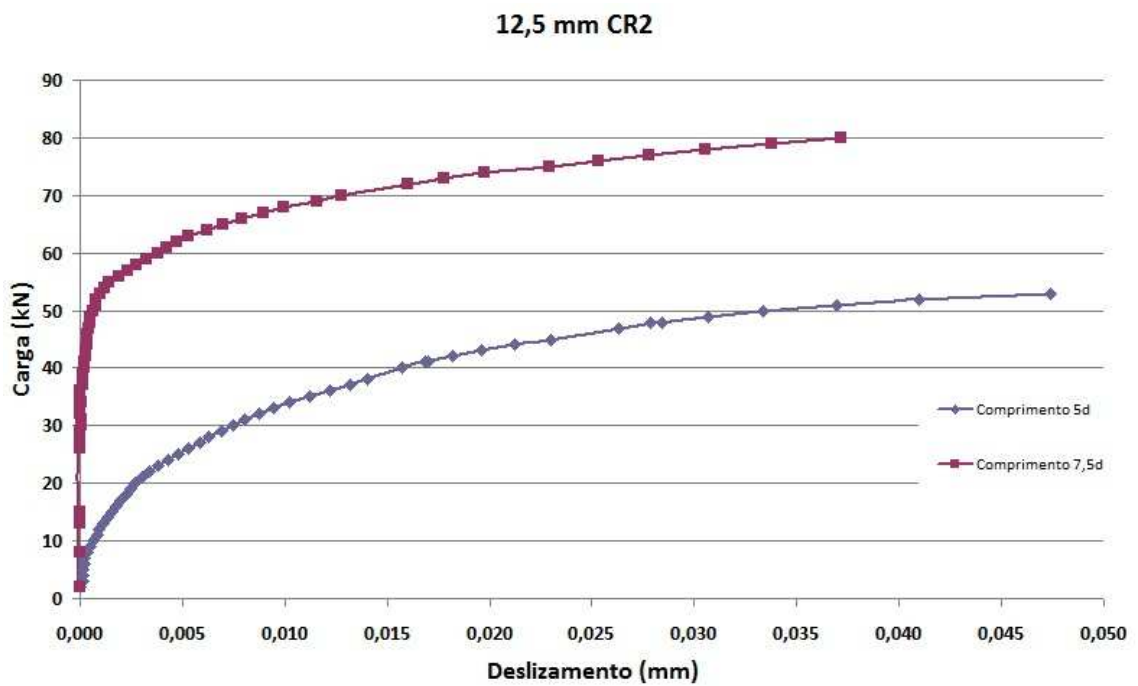


Figura 117 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5mm CR2

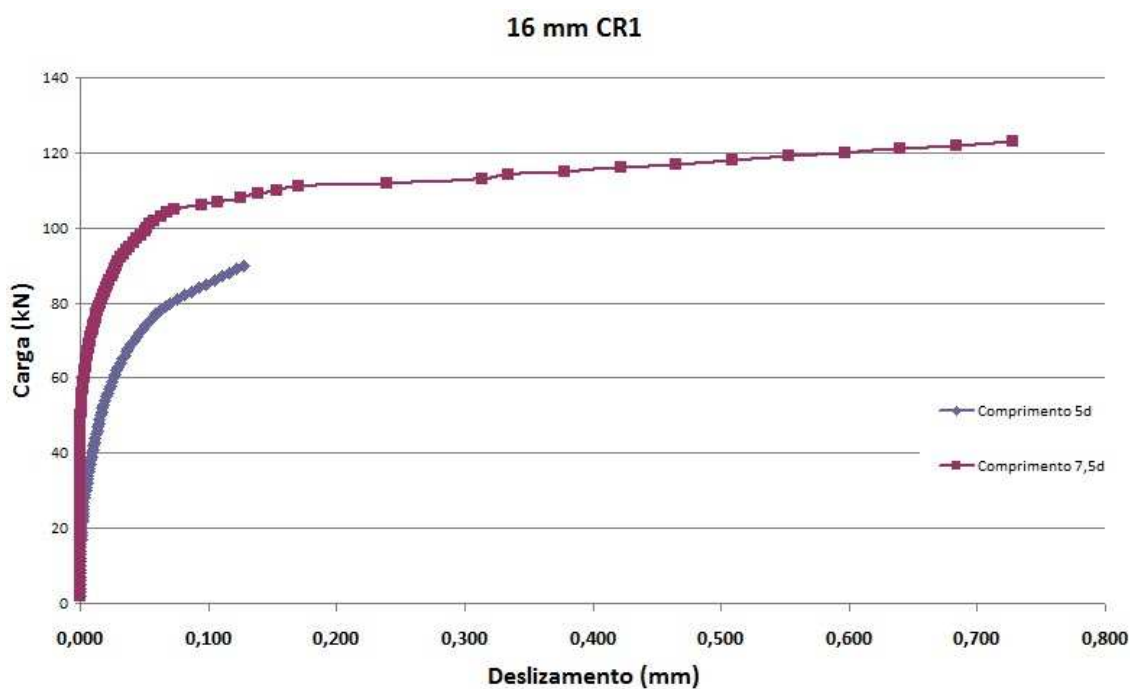


Figura 118 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16mm CR1

4.3.2 Influência do diâmetro da barra

Analogamente ao que foi verificado nos modelos SR, para o mesmo comprimento de aderência, a força de adesão e a força última aumentam com o aumento do diâmetro da barra.

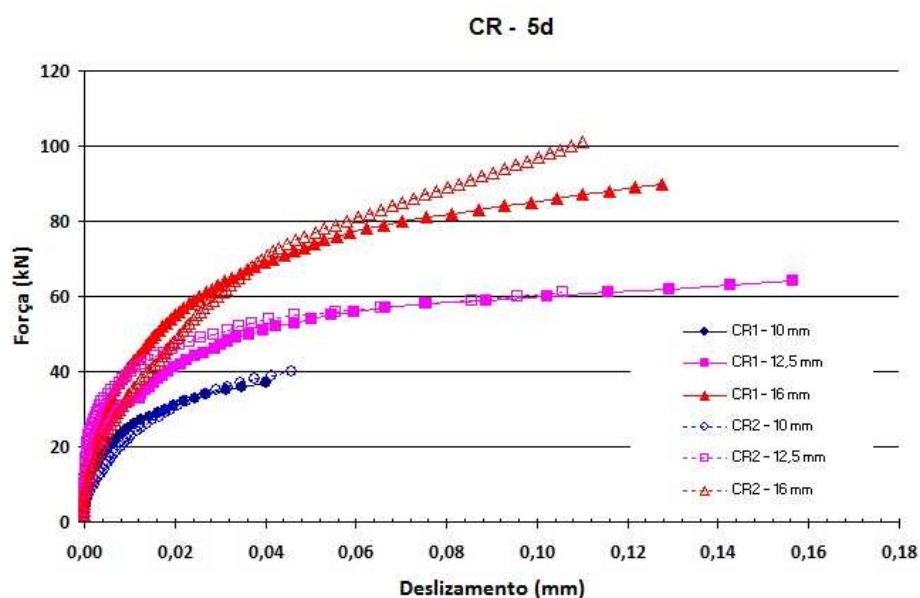


Figura 119 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo CR e Comprimento de Aderência de 5ϕ .

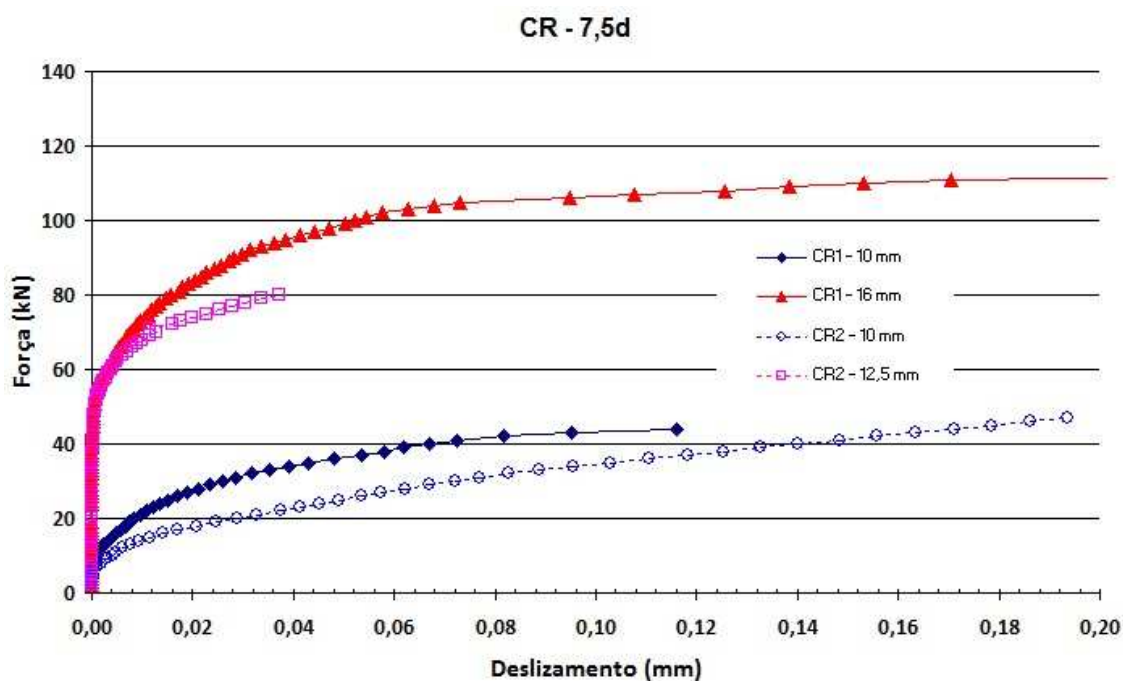


Figura 120 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo CR e Comprimento de Aderência de $7,5\phi$.

4.3.3 Influência da espessura de resina

A variação de 1 mm para 2 mm na espessura da resina parece não afetar o desempenho da colagem, como se verifica na Figura 119 e na Figura 120 que apresentam as curvas muito semelhantes para colagem com 1mm e com 2mm de espessura.

4.3.4 Modo de ruptura

Da observação dos gráficos da Figura 119, da Figura 120, da Tabela 23 e da Tabela 24 verifica-se que com exceção dos modelos que apresentaram falhas na aderência devido à presença de bolhas, ou seja, todos os modelos considerados válidos apresentaram ruptura brusca, com fendilhamento longitudinal e pequenos deslocamentos até a carga máxima, o que também foi verificado por FELÍCIO (1995).



Figura 121 - Fendilhamento durante o ensaio de arrancamento do CP-38.



Figura 122 - Vista interna do comportamento e do trabalho realizado pela nervura da barra na resina



Figura 123 - Exemplo de bolhas ocasionando o escorregamento do aço mesmo nos modelos com resina.

4.4 Comparação entre os modelos SR e CR

Os gráficos das Figura 124 até a Figura 129, ajudam nesta análise comparativa.

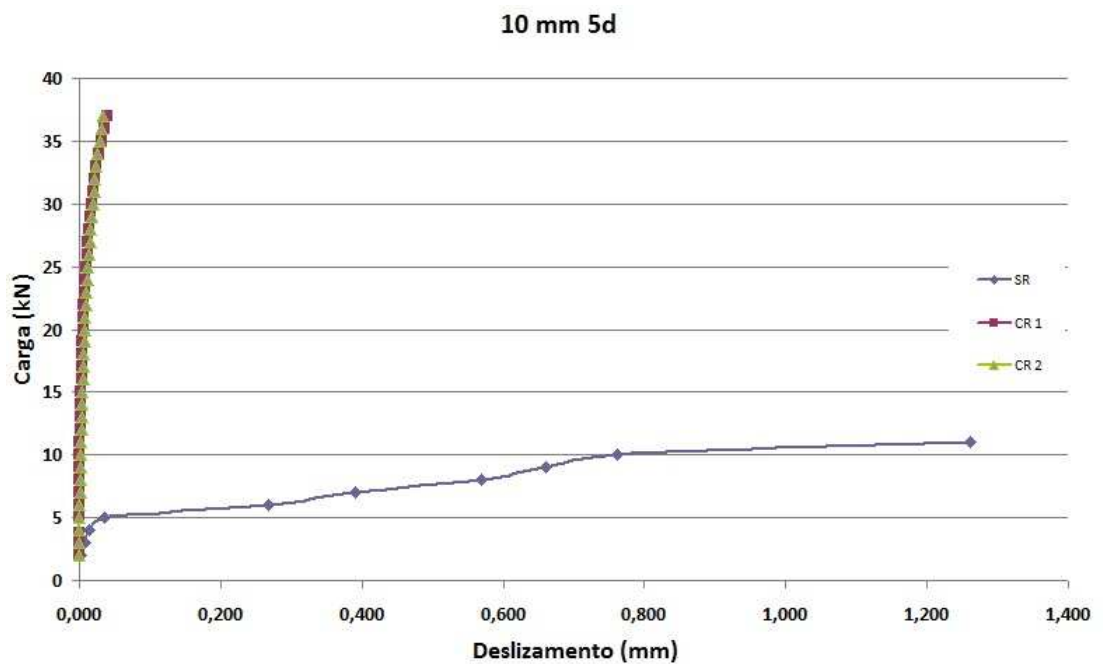


Figura 124 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10 mm - 5 ϕ .

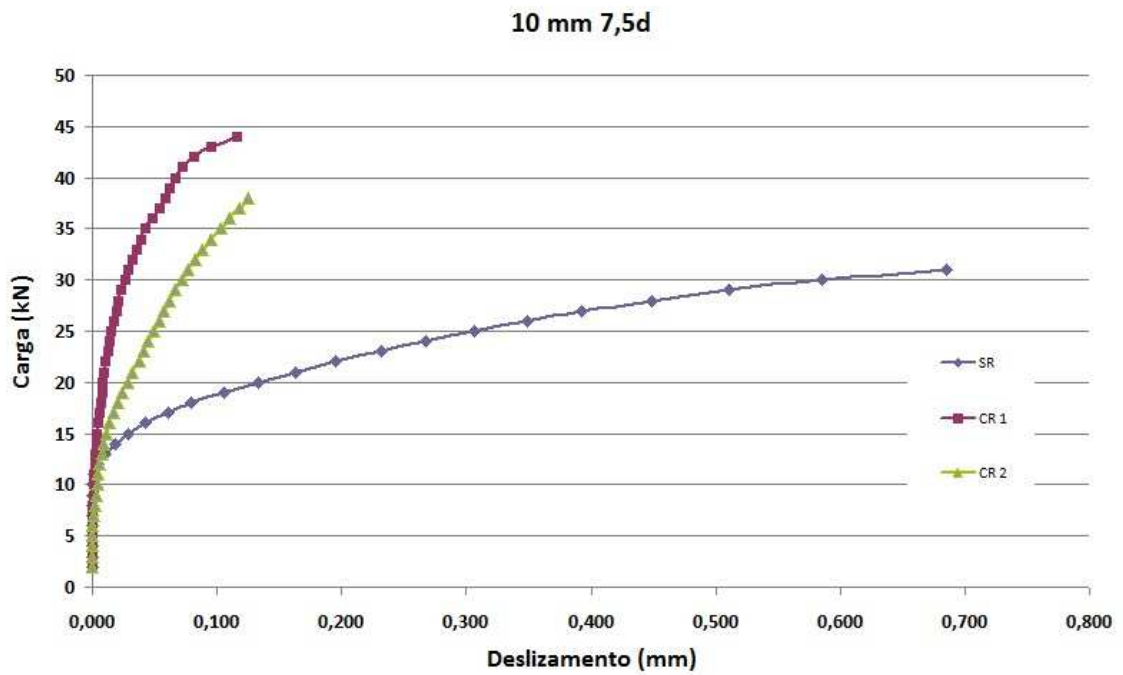


Figura 125 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 10 mm - 7,5φ.

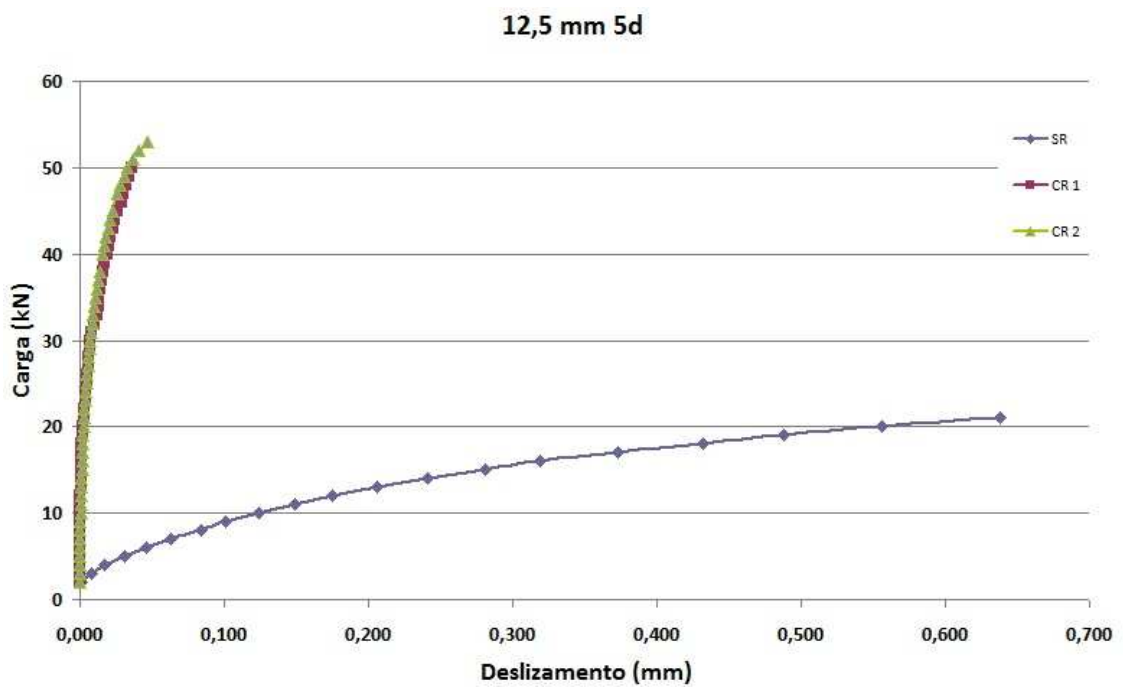


Figura 126 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5mm - 5 φ.

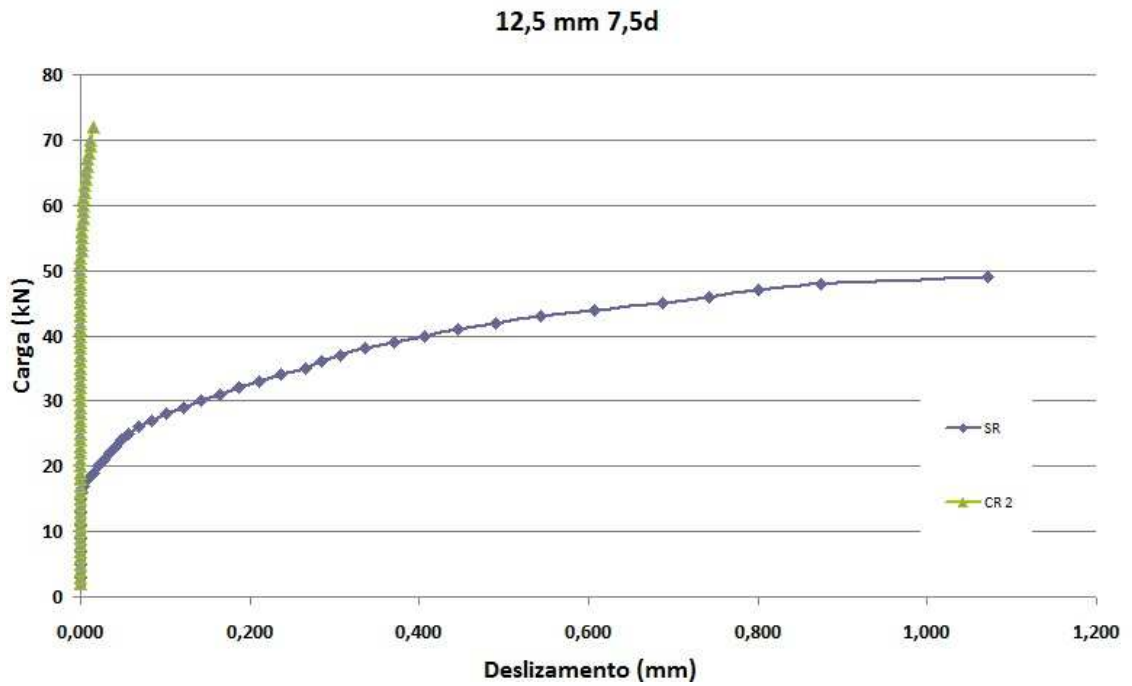


Figura 127 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 12,5mm - 7,5 ϕ .

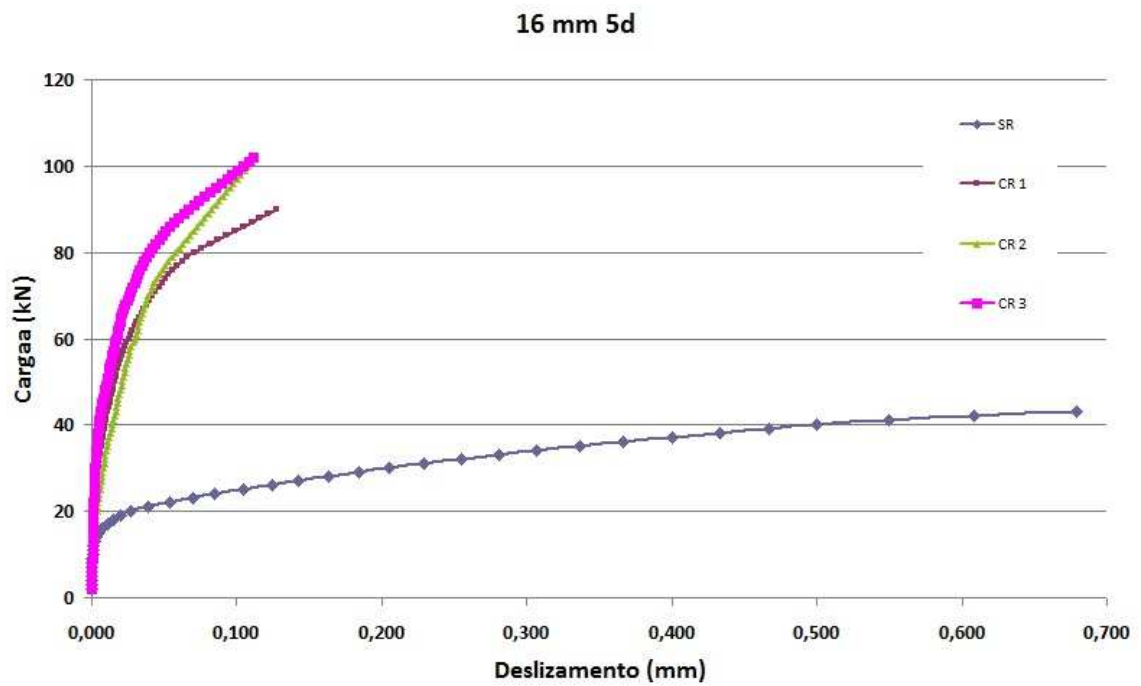


Figura 128 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16mm - 5 ϕ .

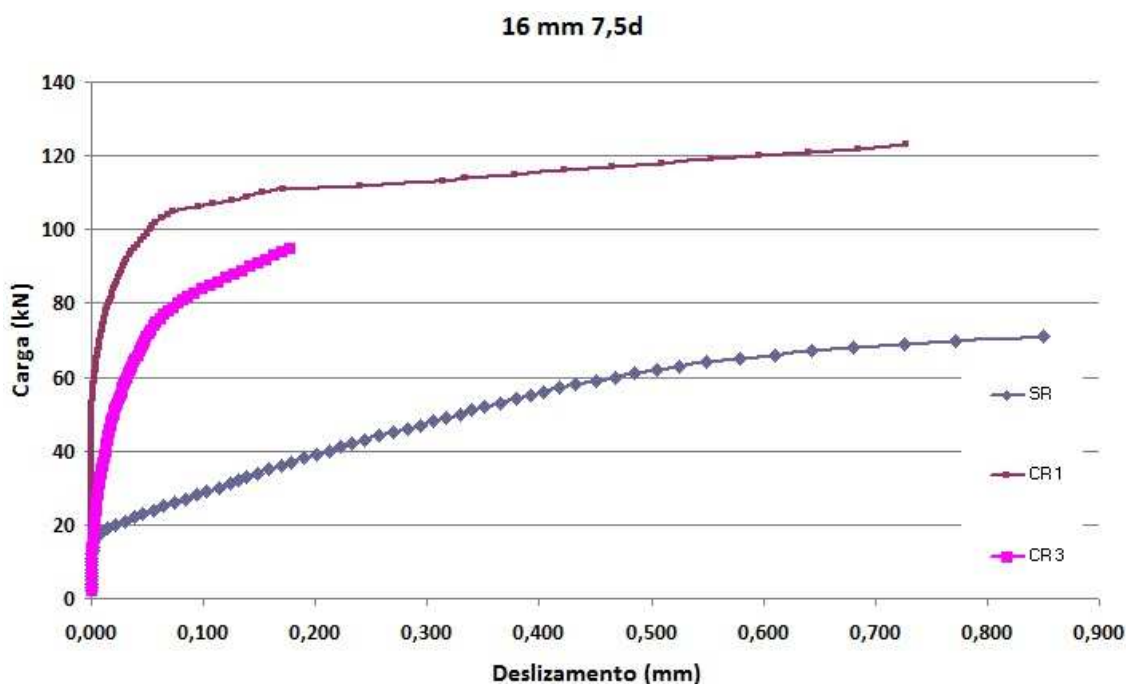


Figura 129 - Gráfico Força x Deslizamento Modelo 16 mm - 7,5 φ.

Os resultados mostraram que a colagem com resina epóxi aumenta a rigidez da ligação aço-concreto produzindo valores de força de aderência e carga última bem superiores aos modelos SR e com deslocamentos bem inferiores, confirmando a capacidade de adesão da resina.

4.5 Aspectos relacionados com a técnica de colagem

Quanto à relação diâmetro do furo x diâmetro da barra testada, esta se mostrou indiferente na resistência de aderência quando avaliados diretamente, ou seja, a espessura da resina não acarretou incremento de resistência, apenas uma melhora no processo de colagem diminuindo a presença de bolhas e, assim, afetando indiretamente a resistência e a forma de ruptura.

A presença de pequenas bolhas (conforme mostrado na Tabela 23 e na Tabela 24, comprometendo no máximo 20% da superfície de aderência) em alguns dos corpos de prova não impediram de considerar seus resultados válidos, uma vez que apresentaram o mesmo padrão de comportamento daqueles sem bolhas na curva carga x deslizamento.

Apesar de alguns resultados apresentarem bolhas na colagem, pode ser percebido um padrão bastante significativo na curva carga x deslizamento, como é o caso da Figura 124, Figura 126 e Figura 128.

A presença de bolhas também foi verificada por SOUZA (1990); FELÍCIO (1995).

A espessura da resina influencia significativamente o volume de preenchimento do furo. Por se tratar de um material de elevado custo, este se torna um parâmetro válido de caracterização.

Durante a preparação do modelo experimental verificou-se a facilidade de preenchimento do furo e sua eficiência depois de inserida a barra de aço. Foi constatado que quanto maior a relação diâmetro do furo x diâmetro da barra, melhor inserção da barra na resina e menores as chances de surgirem bolhas de ar no sistema.

Quanto maior o comprimento de aderência mais profundo o furo no bloco de concreto, logo, maior a dificuldade de preenchimento.

Admite-se que estas considerações são válidas para a situação de furo passante adotada no trabalho, visto que para outras utilizações podem ser observados diferentes resultados.



Figura 130 - Representação da camada de resina após colagem e rompimento.

Na Figura 130 pode ser percebido que a resina, apesar de ter-se acumulado mais de um lado que do outro da barra, não levou a variações significativas nos

resultados, conforme mostram os gráficos já apresentados anteriormente para o corpo de prova 53.

Cuidados extras devem ser tomados quando a colagem ocorrer em furos horizontais, pois a fluidez da resina permite seu escorrimento para a região inferior do furo de modo a criar bolhas na parte superior, tais situações podem ser evitadas com o uso de resinas tixotópicas.

4.6 Avaliação da colagem com resina epóxi

A superfície de aderência, ou seja, a superfície de contato barra-concreto ou barra-resina-concreto, integra um parâmetro único que relaciona o diâmetro da barra e o comprimento de aderência. Os valores da superfície de aderência calculados estão apresentados na Tabela 25.

A eficiência da colagem também é verificada através do modo de ruptura, onde nos modelos CR ocorreu ruptura na parte mais frágil da ligação que é o concreto, ou até mesmo na barra de aço, conforme foi verificado no ensaio do CP-52.

Tabela 25 - Resumo dos Resultados.

Modelo	Resistência Última (kN)	Comprimento de Aderência (ℓ)	Superfície de Aderência (cm ²)	Tensão de Aderência (MPa)	Incremento de Resistência
10-5-0	12,20	5cm	15,71	7,77	
10-7,5-0	34,40	7,5cm	23,56	14,60	
12,5-5-0	24,40	6,25cm	24,54	9,94	
12,5-7,5-0	51,80	9,38cm	36,82	14,07	
16-5-0	53,20	8cm	40,21	13,23	
16-7,5-0	77,80	12cm	60,32	12,90	
10-5-1	48,80	5cm	15,71	31,07	4,00
10-7,5-1	54,80	7,5cm	23,56	23,26	1,59
12,5-5-1	68,00	6,25cm	24,54	27,71	2,79
16-5-1	90,4	8cm	40,21	22,48	1,70
16-7,5-1	123,00	12cm	60,32	20,39	1,58
10-5-2	48,80	5cm	15,71	31,07	4,00
10-7,5-2	52,60	7,5cm	23,56	22,32	1,53
12,5-5-2	69,80	6,25cm	24,54	28,44	2,86
12,5-7,5-2	90,60	9,38cm	36,82	24,61	1,75
16-5-2	101,40	8cm	40,21	25,22	1,91
16-5-3	117,20	8cm	40,21	29,15	2,20

Os valores identificados na Tabela 25 como incremento de resistência (tensão de aderência CR / tensão de aderência SR) permitem verificar de uma forma direta que a colagem com resina tem maior influência nos menores comprimentos de aderência.

A Figura 131 que relaciona a força com a superfície de aderência indica que quando aumenta-se a superfície de aderência (diâmetro e comprimento de aderência), aumenta-se a capacidade resistente última ao arrancamento.

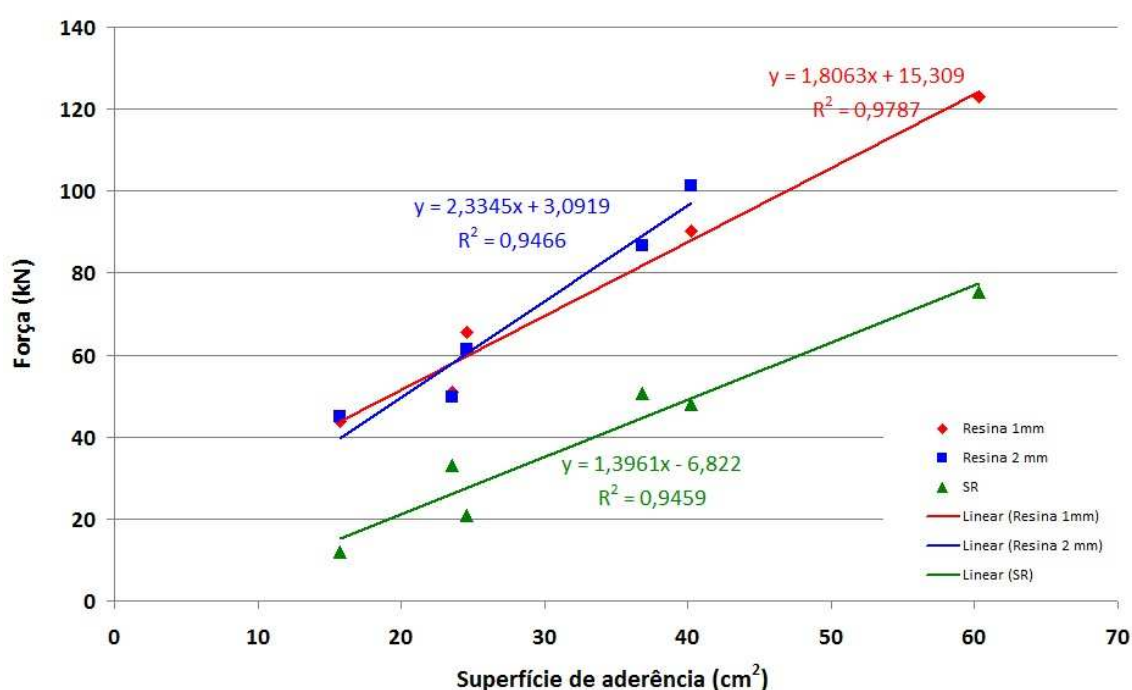


Figura 131 - Gráfico que relaciona força com superfície de aderência.

Ainda na Tabela 25 e no gráfico da Figura 131 observa-se que os modelos com resina possuem maiores capacidades de aderência quando comparados aos sem resina, e que nos modelos com resina, os valores diminuem com o aumento do diâmetro da barra e com o aumento do comprimento de aderência. De fato, e como indica a Figura 132, isto parece indicar que na ligação com resina, pequenos comprimentos já são suficientes para garantir a aderência e que os maiores comprimentos talvez não contribuíssem para o desenvolvimento de tensões ao longo

de todo o comprimento colado. Uma melhor compreensão deste comportamento só será possível com uma análise experimental que contemple a instrumentação de todo o comprimento de aderência.

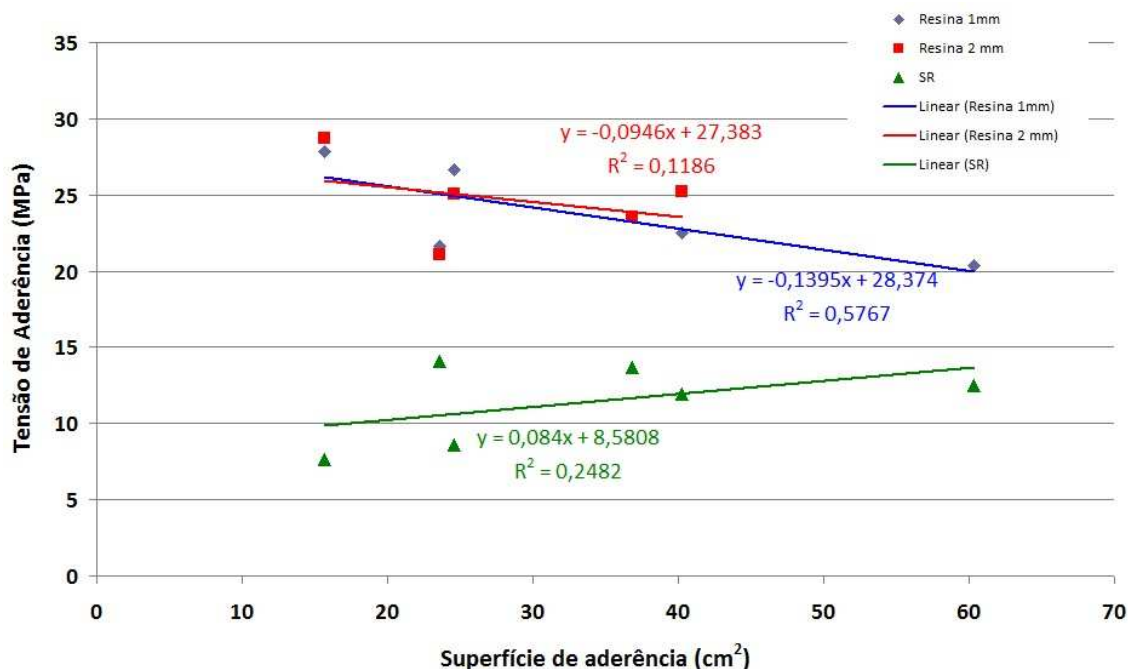


Figura 132 - Tensão de aderência relacionada com a superfície de aderência para os modelos com e sem resina.

No gráfico da Figura 131 verifica-se o ganho de eficiência oferecido pela colagem com resina epóxi em comparação com barras simplesmente concretadas. Verifica-se ainda que para uma carga fixa, no modelo CR é possível a utilização de uma superfície de aderência significativamente inferior que a requerida no modelo SR, da ordem de 50%. Ainda no gráfico da Figura 131, ao comparar-se as curvas que se referem à espessura de resina de 1mm com a de 2mm, verifica-se mais uma vez que a variação na espessura da resina não influenciou significativamente o comportamento dos modelos ensaiados.

No gráfico da Figura 133, comparando-se os modelos SR com os CR verifica-se que o aumento do comprimento colado é mais efetivo nas barras de maiores diâmetros, sendo a barra de diâmetro 12,5mm a mais eficiente.

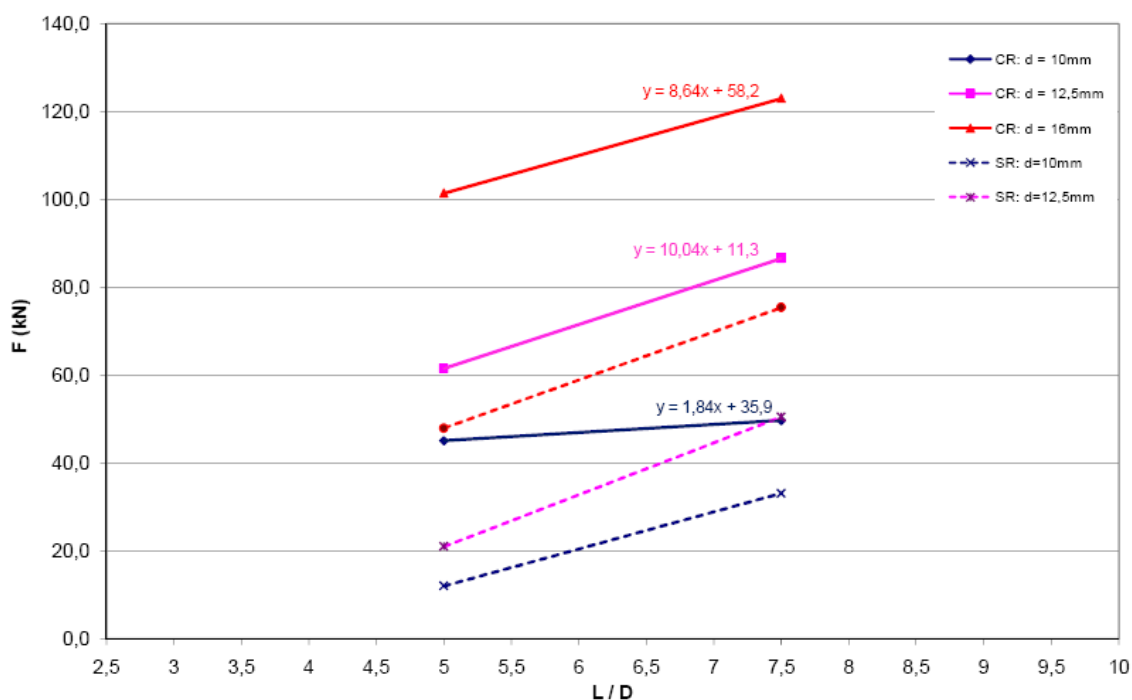


Figura 133 - Gráfico que relaciona carga com parâmetro de comprimento de ancoragem em função do diâmetro.

4.7 Avaliação da espessura da resina

A influência da espessura da resina pode ser novamente avaliada através da Figura 134 que relaciona a carga com a superfície de aderência, cujos valores foram retirados da Tabela 25.

Da observação deste gráfico verifica-se novamente que a variação na espessura da resina não influencia o comportamento dos modelos ensaiados.

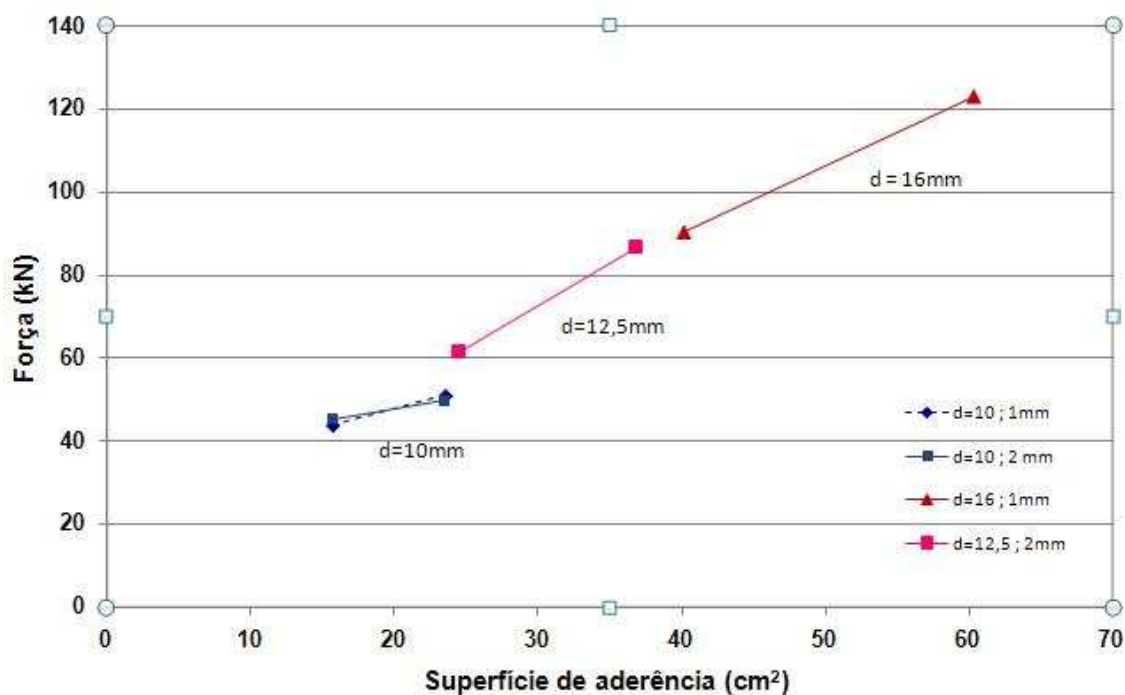


Figura 134 - Relação do comportamento do comprimento de ancoragem com a superfície de aderência e a bitola do aço.

4.8 Considerações sobre o modelo de ensaio

Quanto ao modelo dos corpos de prova, foi percebido que o furo passante influencia negativamente a colagem da barra ao concreto, visto o grande número de dispersões ocasionadas pela presença de bolhas de ar e colagens ineficientes. Isto se deve principalmente à expulsão de significativa quantidade de resina durante a passagem da barra pelo furo.

5 CONCLUSÕES

A aderência de barras de aço ao concreto por colagem com resina epóxi é de grande eficiência quando comparada à aderência aço-concreto, podendo ser avaliada uma redução do comprimento de ancoragem quando se utiliza esta técnica.

A colagem com resina epóxi deve ser feita de maneira criteriosa, visando controlar as características de tempo de utilização (pot life) e de fluidez do adesivo escolhido.

O local e a posição de injeção de resina é de extrema importância, pois a resina deve preencher completamente o espaço entre os materiais a serem colados de maneira a criar uma interface contínua. A profundidade do furo também interfere no preenchimento, pois quanto mais profundo, maiores as chances de bolhas.

Foi percebido que a resistência de aderência, assim como a eficiência do modelo CR, está relacionada diretamente com o preenchimento por completo, do espaço entre o aço e o concreto, com a resina epóxi.

A técnica de furo passante não é a melhor representação da situação de campo; este caso também não é recomendado pelos fabricantes destes tipos de chumbadores químicos para as funções de aderência.

A variação de espessura de resina epóxi de 1mm e 2mm testada não influenciou o comportamento dos modelos com resina.

A parcela da adesão é muito significativa nos modelos CR, nestes modelos a deformação para as cargas iniciais e médias é extremamente baixa, quando comparados com os modelos SR. Tal fato também foi observado por SOUZA (1990); FELÍCIO (1995)

Quanto ao modo de ruptura, todos os modelos SR romperam por arrancamento. Nos modelos CR a ruptura deu-se de forma brusca no concreto, considerado o elo mais fraco da ligação.

Para um mesmo diâmetro de barra, o aumento do comprimento de aderência conduziu a maiores valores de força de adesão e carga última, em todos os modelos SR. Nos modelos CR o aumento de carga última também foi verificado. Este comportamento também foi identificado por BOUZAOU (2008).

Foi verificado que quanto maior o diâmetro da barra, maior a carga última de ruptura. Este comportamento também foi verificado por FELÍCIO (1995); BOUZAOU (2008).

Em todos os modelos – sem resina e com resina - o aumento diâmetro de barra e do comprimento de aderência conduziram a maiores valores de força de adesão e carga última.

As vigas possuíram comportamento significativamente semelhante, apesar de suas configurações de ancoragem serem bastante diferentes. Isto reafirma a eficiência da colagem de barras visando a diminuição do comprimento de ancoragem necessário.

6 ESTUDOS FUTUROS

Considera-se importante a realização de novos estudos que contemplem maiores espessuras de cobrimento e concretos com diferentes valores de resistência à tração, parâmetros que estão diretamente ligados com a ruptura por fendilhamento.

São válidas novas abordagens do estudo conforme modelo proposto por Bouazaoui (2008), onde o furo prévio efetuado no corpo de prova não atravessa completamente a seção de concreto.

É instrumento válido a futura avaliação numérica deste modelo experimental por modelagem computacional, de maneira a compreender o funcionamento e o comportamento das tensões nos modelos descritos.

Sugere-se também a implementação de programa experimental para avaliar os chumbadores químicos comerciais, bem como a capacidade de fluência da ligação colada.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.T.L.; EDWARDS, S.C. - "Repair of Concrete Structures", Blackie & Son Ltd, London, 1987, 204pp.
- ARCELORMITRAL, Empresa produtora de aço, laminados e trefilados. Desenvolve o vergalhão Belgo 50-Soldável.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). ABNT NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002). ABNT NBR 14168 – Chumbadores Instalados em Elementos de Concreto ou Alvenaria – Determinação de Resistência à Tração e ao Cisalhamento. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007). ABNT NBR 5739 - Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2011). ABNT NBR 7222 - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007). ABNT NBR 7480 – Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). ABNT NBR NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.
- AGUIAR, J. L. BARROSO DE. Contribuição para o estudo da aderência entre polímeros e betão. Tese de Doutorado – Universidade do Minho – Braga – Portugal. 1990.
- COOK, RONALD A.; KONZ, ROBERT C. Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors. ACI Structural Journal - January-February 2001
- Barbosa, M.T.G.; “Teoria da Plasticidade Aplicada ao Estudo da Aderência Aço-Concreto”, Revista de engenharia – estudo e pesquisa, Universidade Federal de Juiz de Fora, Vol.2, nº2, Julho/Dezembro, 1999
- BARBOSA, MARIA TERESA GOMES. Avaliação do Comportamento de Aderência em Concretos de Diferentes Classes de Resistência. Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro – RJ – 2001
- BOUAZAOU (2008), LOUBNA; LI, ALEX. Analysis of steel/concrete interfacial shear stress by means of pull out test. International Journal of Adhesion & Adhesives 28. Pag. 101–108 – França – 2008.

CAMA (2002) - Special Inspection Guidelines for Expansion and Adhesive Anchors. CAMA (Concrete Anchor Manufacturers Association). Copyright @ 2002 CAMA - St. Charles, Missouri

DIAZ, BENJAMIN ERNANNI. Técnicas de Colagem Estrutural de Aduelas de Concreto em Pontes. Comunicação Técnica – Rio de Janeiro, 1982.

ELIGEHAUSEN, R.; SILVA, J. - The assessment and design of adhesive anchors in concrete for sustained loading. Artigo - 2008

FELÍCIO, MÁRCIA DACACHE, Eficiência da Ligação Aço-Concreto Utilizando Colagem com Resina Epóxi. Dissertação de Mestrado – UFF – Niterói-RJ – 1995.

FIGEYS, WINE; GEMER, DIONYS VAN; AGUIAR, J. L. BARROSO. Feasibility Study of Geopolymers for Externaly Bonded Reinforcement. Artigo – 12^o International Congress in Polymers on Concret – Korea – 2007

FILHO, FERNANDO MENEZES DE ALMEIDA. Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concreto auto adensável. Tese de Doutorado - USP – São Carlos – SP. 2006

GARZÓN REYES, FREDY ENRIQUE. Análise da Aderência entre Barras de Aço e Concreto (CC, CAA, CAAFA) sob influencia de aços monotônicas e cíclicas. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – USP – São Carlos – SP – 2009

GOMES, A.; APPLETON, J. – Reforço de estruturas e betão armado por encamisamento das secções. Artigo - Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n.42, 1997.

RE500 - Adesivo Bi-componente injetável e tixotrópico. Fabricante HILTI®.

ICC-ES – AC308 – Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements. 2009, 125 p. download em: <http://www.icc-es.org/Criteria/>

LARANJEIRAS, Antonio Carlos Reis; Chumbadores. Notas Técnicas – Dezembro 2008.

LEONHARDT, FRITZ; MONNING, E. - Construções de concreto: Vol. 5 – Concreto Protendido. Tradução João Luis Escosteguy Merino. Editora Interciência 316p – Rio de Janeiro, 1983.

OLIVEIRA, WALTER EDGLEY DE. Estudo experimental da influência do cobrimento na interação aço-concreto em elementos sujeitos à compressão. Tese de Doutorado – PUC-Rio – Rio de Janeiro – RJ – 2008.

RIBEIRO, J. L. DUARTE. Análise Experimental dos Fatores que Influenciam a Aderência de Barras Nervuradas. Porto Alegre, 1985. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRS

RILEM, FIP, CEB, 1973, “Essai portant sur l’adhérence des armatures du béton. 1. Essai par flexion (7-II-28D). 2. Essai par traction (7-II-128), Recommandations Provisoires. Matériaux et Constructions, (mars – avr), v. 6, n. 32, pp. 96–105.

SIKADUR 32[®], Adesivo Epóxi Bi-componente fluido. Fabricante SIKA[®].

SOUZA, RHF; Análise do Comportamento de Vigas de Betão Armado Reforçadas à Flexão e ao Esforço Transverso. Lisboa, 1990. 320p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico.

SOUZA, Regina H. F. - Materiais Usados na Reparação e Reforço, Notas de Aula do Curso de Mestrado da UERJ, 2009.

TEATINI, JOÃO CARLOS DE SOUZA CLIMACO. Repair of structural concrete involving the additional of new concrete. Tese de Doutorado – Polytechnic of Central London – London – England. 1990.

WOLLMERSHAUSER, RICHARD E.; MATTIS, LEE. – Understanding Adhesive Anchor Installation and Inspection. Artigo. Estados Unidos.