



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA CONCRETO-AÇO:
EFEITOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO
CONCRETO E DO COMPRIMENTO DE ADERÊNCIA**

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**

Nelson Rossi

Orientador: Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior

Fevereiro, 2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA CONCRETO-AÇO:
EFEITOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO
CONCRETO E DO COMPRIMENTO DE ADERÊNCIA**

Nelson Rossi

Orientador: Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.

Prof. Dr.

Matrícula:

23/04/10
[Assinatura]
214124

Campinas, 2002

SP - Brasil

UNIDADE	30
Nº CHAMADA	T(UNICAMP)
	R735r
V	EX
TOMBO BCI	54701
PROC.	16-124103
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/07/03
Nº CPD	

CM00186766-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

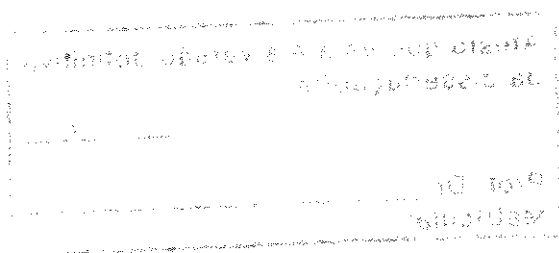
BIB ID 295547

R735r Rossi, Nelson

Resistência de aderência concreto-aço: efeitos da resistência à compressão do concreto e do comprimento de aderência / Nelson Rossi.--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Armando Lopes Moreno Junior.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Aderências. 2. Deslizamento. 3. Concreto de alta resistência. I. Moreno Junior, Armando Lopes. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

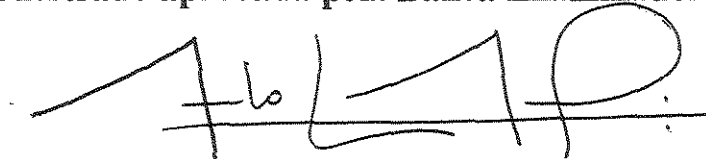


**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA CONCRETO-AÇO:
EFEITOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO
CONCRETO E DO COMPRIMENTO DE ADERÊNCIA**

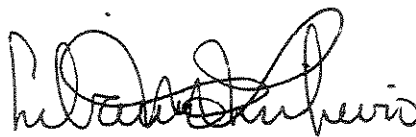
Nelson Rossi

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



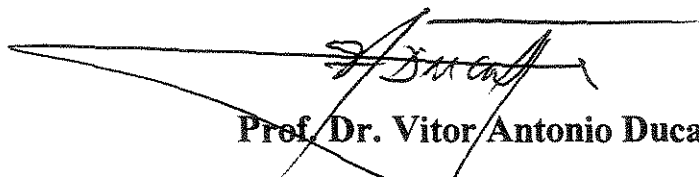
Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior

Presidente e Orientador – FEC – UNICAMP



Prof. Dr. Libânio Miranda Pinheiro

EESC – USP



Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti

FEC – UNICAMP

Campinas, 28 de Fevereiro de 2002

Ao meu avô, (in memoriam)

Jose Rossi, pelos meus primeiros passos

Ao meu pai,

Nercio Rossi, que até hoje caminha comigo

À minha mãe,

Ofelia Staut Rossi

À minha esposa,

Maria Cacilda P. C. Rossi

Aos meus filhos,

Nelson Rossi Junior e Sarah Rossi

Ao meu irmão,

Edson Rossi

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Armando Lopes Moreno Junior pela formação e conhecimentos passados durante todo o curso de mestrado, e especialmente, pela orientação e dedicação na elaboração deste trabalho.

Aos Professores Doutores, Mauro Augusto Demarzo, Newton de O. Pinto Junior e Vitor Antonio Ducatti, pelos ensinamentos durante as disciplinas que ministraram no curso de mestrado, e principalmente, pelas discussões e sugestões que muito auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais da UNICAMP, Jose R. Marçal, Marcelo Francisco Ramos, Luciano Passos, Ademir de Almeida e Rodolfo Bonamico, pela amizade e empenho na execução dos ensaios.

Aos Professores Doutores, Vladimir Antonio Paulon e Gladis Camarini, pelos ensinamentos durante as disciplinas que ministraram no curso de mestrado e pelas palavras e atitudes de incentivo, que muitas vezes me fizeram seguir em frente.

À vida, pela graça de conceder os amigos que participaram dessa travessia; alguns deles em especial me permitiram ouvir a canção que fala que amigos serão sempre amigos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxiii
RESUMO.....	xxvii
ABSTRACT.....	xxix
1 OBJETIVO.....	1
2 INTRODUÇÃO.....	3
3 MECANISMOS DE ADERÊNCIA(FENÔMENOS DE ADERÊNCIA).....	7
3.1 Aderência por adesão química.....	8
3.2 Aderência por atrito.....	9
3.3 Aderência mecânica.....	10
3.4 Comportamento local da aderência-deslizamento conforme o modelo de TASSIOS....	13
3.4.1 Análise da distribuição das tensões e das fissuras na interface aço-concreto...	15
3.5 Comportamento da tensão de aderência e o deslizamento proposto pelo Código Modelo CEB-FIP (1990).....	17
3.6 Influência da geometria da barra na aderência.....	22
4 ENSAIOS USUAIS NA DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO.....	25
4.1 Ensaios dos tirantes.....	25

4.2 Ensaio de arrancamento ASTM C-234.....	28
4.2.1 Influência na aderência devido à variação dos materiais utilizados.....	32
4.2.2 Influência na aderência devido à posição das barras durante a concretagem...	33
4.2.3 Influência na aderência devido a resistência à tração do concreto.....	35
4.2.4 Influência na aderência devido a resistência à compressão do concreto.....	40
4.3 Ensaio das quatro barras.....	44
4.3.1 Influência na aderência devido a resistência à compressão do concreto.....	48
4.3.2 Influência na aderência devido ao diâmetro das barras.....	49
4.4 Ensaios de flexão.....	51
4.5 Comparação entre os ensaios de arrancamento e o de flexão.....	55
 5 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS REALIZADAS UTILIZANDO O ENSAIO DE VIGA, PADRÃO RILEM/CEB/FIP – RC 5.....	 61
5.1 ISA, M. M., 1997. Aderência concreto - armadura: Influência da corrosão e da proteção catódica.....	61
5.1.1 Corpos de prova e ensaio.....	62
5.1.2 Resultados obtidos.....	63
5.1.3 Análise dos resultados e conclusões.....	65
5.2 De LARRARD, F.; SCHALLER, I.; FUCHS, J., 1993. Efeito do diâmetro da barra na resistência de aderência da armadura em concreto de alto desempenho.....	72
5.2.1 Componentes do concreto.....	73
5.2.2 Armadura.....	73
5.2.3 Método experimental.....	74
5.2.4 Resultados do ensaio.....	76
5.2.4.1 Curvas carga-deslizamento.....	76
5.2.4.2 Tensões de aderência.....	79
5.2.5 Conclusões dos autores do trabalho.....	83
5.3 USUDA, F. E.; PEIXOTO, A. S. P.; BATELOCHI, R., 1988. Estudo da aderência do aço em concreto de alta resistência.....	84
5.3.1 Corpo de prova.....	85
5.3.2 Material utilizado e composição do concreto para moldar os corpos de prova.....	86

5.3.3 Ensaio.....	87
5.3.4 Resultados.....	87
5.3.5 Análise dos resultados.....	89
5.3.6 Considerações sobre o ensaio realizado por USUDA e outros.....	91
6 METODOLOGIA E PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	93
6.1 Detalhes e dimensões das vigas utilizadas.....	94
6.1.1 Armadura auxiliar dos corpos de prova.....	95
6.1.2 Preparação da barra de aço a ser ensaiada.....	96
6.2 Caracterização dos materiais e preparação dos corpos de prova.....	97
6.2.1 Composição do concreto.....	97
6.2.2 Mistura do concreto.....	102
6.2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova.....	102
6.2.4 Determinação das resistências dos concretos utilizados.....	102
6.2.5 Características do aço utilizado no ensaio de aderência.....	103
6.3 Execução do ensaio de aderência.....	104
7 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	107
7.1 Resultados obtidos para vigas de concreto com resistência média na faixa de 25 MPa.....	108
7.1.1 Resultados para barras com comprimento de aderência de 3 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	109
7.1.2 Resultados para barras com comprimento de aderência de 5 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	112
7.1.3 Resultados para barras com comprimento de aderência de 10 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	114
7.1.4 Tensões de aderência para um determinado deslizamento em função do comprimento de aderência.....	116
7.2 Resultados obtidos para vigas de concreto com resistência média na faixa de 50 MPa.....	119
7.2.1 Resultados para barras com comprimento de aderência de 3 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	120

7.2.2 Resultados para barras com comprimento de aderência de 5 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	122
7.2.3 Resultados para barras com comprimento de aderência de 10 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	124
7.2.4 Tensões de aderência para um determinado deslizamento em função do comprimento de aderência.....	126
7.3 Resultados obtidos para vigas de concreto com resistência média na faixa de 85 MPa.....	129
7.3.1 Resultados para barras com comprimento de aderência de 3 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	130
7.3.2 Resultados para barras com comprimento de aderência de 5 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	132
7.3.3 Resultados para barras com comprimento de aderência de 10 ϕ : considerações sobre o ensaio.....	135
7.3.4 Tensões de aderência para um determinado deslizamento em função do comprimento de aderência.....	138
7.4 Arquivo fotográfico dos ensaios realizados.....	141
8. ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	149
8.1 Análise para concreto de resistência à compressão na faixa de 25 MPa.....	149
8.2 Análise para concreto de resistência à compressão na faixa de 50 MPa.....	151
8.3 Análise para concreto de resistência à compressão na faixa de 85 MPa.....	153
8.4 Análise interativa entre os concretos de resistência 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa.....	154
8.5 Discussão dos procedimentos normatizados para o cálculo da tensão de aderência.....	162
8.5.1 Tensão de aderência baseada nos resultados experimentais obtidos.....	162
8.5.2 Tensão de aderência, calculada pela NBR 6118 (1978).....	163
8.5.3 Tensão de aderência, calculada pela NBR 6118 (2000).....	164
8.5.4 Tensão de aderência, calculada pelo EUROCODE 2.....	164
8.5.5 Comparação entre tensões de aderência calculadas teoricamente e as tensões de aderência experimentais.....	165
8.6 Considerações finais.....	168

9.PROSSEGUIMENTO DOS ESTUDOS.....	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	173

LISTA DE FIGURAS

3.1	Aderência por adesão química. (adap. FUSCO, 1995).....	8
3.2	Aderência por atrito no ensaio de arrancamento. (adap. FUSCO, 1995).....	9
3.3	Aderência mecânica decorrente das saliências. (adap. FUSCO, 1995).....	10
3.4	As irregularidades superficiais que produzem aderência mecânica.(adap. FUSCO, 1995).....	11
3.5	Ações e reações entre o console de concreto e a nervura da barra de aço (HAMAD, 1995).....	12
3.6	Relação entre a tensão de aderência e o deslizamento local. (TASSIOS, 1979).....	13
3.7	Fissuras transversais e de fendilhamento. (TASSIOS, 1979).....	15
3.8	Distribuição das tensões no entorno da barra (na interface aço-concreto). (Tassios, 1979).....	16
3.9	Relação analítica entre a resistência de aderência e o deslizamento. (CEB-FIP, 1990).....	18
4.1	Modelo e dimensões de tirantes.....	26
4.2	Esquema de instrumentação da barra no ensaio do tirante.....	27
4.3	Formas metálicas dos corpos de prova do ensaio ASTM C-234.....	29
4.4	Modelo de Goto, mostra as forças entre a barra nervurada e o concreto.....	36
4.5	Estágios elástico, elástico parcialmente fissurado e plástico. (TEPFERS).....	38
4.6	Efeito da espessura de concreto na capacidade de aderência. (adap.DUCATTI, 1991).....	39
4.7	Influência da resistência à compressão na aderência. (adap.DUCATTI, 1993).....	41
4.8	Esquema da execução do ensaio de tração, e o esquema da compressão por efeito de arco e da compressão transversal (LEONHARDT e MÖNNING, 1977).....	43
4.9	Ensaio de arrancamento proposto por REHM, 1986.....	44
4.10	Esquema do corpo de prova do ensaio das quatro barras (DUCATTI, 1993).....	45
4.11	Posicionamento dos extensômetros no ensaio realizado por DUCATTI, 1993.....	46
4.12	Curvas de aderência para os modelos T9, T9/S, U9 e U9/S (DUCATTI, 1993).....	49

4.13 Comparação entre curvas de aderência (DUCATTI, 1993).....	50
4.14 Ensaio de flexão proposto pela Universidade do Texas (1908), (adap. ISA, 1997).....	52
4.15 Ensaio de viga, para $\phi < 16$ mm, recomendação RILEM/CEB/FIP – RC 5, 1978.....	54
4.16 Curvas de tensão de aderência em relação ao deslizamento. RILEM/CEB/FIP, 1979.....	56
4.17 Relação (POT/BT) em função do diâmetro da barra. (SORETZ et al, 1972 e 1975).....	58
5.1 Comportamento da aderência para o aço para as semi vigas 1. (ISA, 1997).....	64
5.2 Comportamento da aderência para o aço para as semi vigas 2. (ISA, 1997).....	65
5.3 Valores de τ_{bm} e τ_{br} para as semi vigas 1. (ISA, 1997).....	69
5.4 Valores de τ_{bm} e τ_{br} para as semi vigas 2. (ISA, 1997).....	70
5.5 Curvas carga-deslizamento para barras nervuradas, $d_B=10$ mm. (LARRARD et al, 1993)....	77
5.6 Curvas carga-deslizamento para barras nervuradas, $d_B=16$ mm. (LARRARD et al, 1993)....	77
5.7 Curvas carga-deslizamento para barras nervuradas, $d_B=25$ mm. (LARRARD et al, 1993)....	78
5.8 Curvas carga-deslizamento para barras lisas, $d_B=25$ mm. (LARRARD et al, 1993).....	78
5.9 Tensão de aderência-diâmetro das barras para diferentes deslizamentos. (LARRARD et al, 1993).....	80
5.10 Estado de tensão no concreto ao redor da barra. (LARRARD et al, 1993).....	81
5.11 Tensão de aderência-deslizamento para o lado A e B da viga. (USUDA et al, 1998).....	89
5.12 Deformação do aço em função do deslizamento para o lado A e lado B da viga (USUDA et al, 1998).....	90
6.1 Dimensões da viga e detalhe dos equipamentos. (adap. RILEM RC 5, 1978).....	96
6.2 Detalhe da armadura auxiliar (de confinamento) (adap. RILEM RC 5, 1978).....	97
6.3 Faixas granulométricas dos agregados. (adap. RILEM RC 5, 1978).....	98
6.4 Agregado utilizado na pesquisa, dentro da faixa recomendada pela RILEM.....	101
6.5 Conformação geométrica superficial do aço usado na pesquisa.....	104
6.6 Viga mostrando a posição dos extensômetros e dos relógios comparadores.....	106
7.1 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 3ϕ ($f_{c28}= 25$ MPa).....	111
7.2 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 5ϕ ($f_{c28}= 25$ MPa).....	113
7.3 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 10ϕ ($f_{c28}= 25$ MPa).....	116
7.4 Curvas de tensões pelos comprimentos de aderência para diferentes deslizamentos e resistência à compressão do concreto de 25 MPa.....	118
7.5 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 3ϕ ($f_{c28}= 50$ MPa).....	121
7.6 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 5ϕ ($f_{c28}= 50$ MPa).....	123
7.7 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 10ϕ ($f_{c28}= 50$ MPa).....	126

7.8	Curvas de tensões pelos comprimentos de aderência para diferentes deslizamentos e resistência à compressão do concreto de 50 MPa.....	128
7.9	Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 3 ϕ (f_{c28} = 85 MPa).....	132
7.10	Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 5 ϕ (f_{c28} = 85 MPa).....	135
7.11	Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 10 ϕ (f_{c28} = 85 MPa).....	138
7.12	Curvas de tensões pelos comprimentos de aderência para diferentes deslizamentos e resistência à compressão do concreto de 85 MPa.....	140
7.13	Lavagem do agregado graúdo para retirada do material pulverulento (a e b).....	141
7.14	(a) Ensaio granulométrico da areia utilizada. (b) Peneiramento para retirada do material mais grosso e impurezas.....	141
7.15	(a) Barra preparada com extensômetro e luva plástica. (b) Montagem da armadura.....	142
7.16	Aparato montado para concretagem, antes e depois do fechamento da forma.....	142
7.17	Detalhe da barra mostrando o comprimento de aderência (a) 3 ϕ e (b) 5 ϕ	142
7.18	Detalhe da barra com comprimento de aderência de 10 ϕ e armadura auxiliar.....	143
7.19	(a) Viga moldada e corpos de prova de controle do concreto, recém moldados. (b) Viga e corpos de prova de controle do concreto em processo de cura.....	143
7.20	Vista geral do ensaio, mostrando a posição dos extensômetros e apoios.....	144
7.21	Detalhe do centro da viga, articulação e bloquete de aplicação de carga.....	144
7.22	(a) Dispositivo de travamento na extremidade da barra. (b) Dispositivo, folga de 3 mm... 145	
7.23	(a) Dispositivo de apoio na extremidade da viga. (b) Fixação do relógio comparador.....	145
7.24	Ensaio em andamento, monitorado eletronicamente no computador.....	146
7.25	Vista de baixo da viga, mostrando a barra monitorada no vão central.....	146
7.26	Fim do ensaio neste lado da viga, o dispositivo encosta no concreto.....	147
7.27	No fim do ensaio, no meio do vão, nota-se a flexão sofrida pela viga.....	147
7.28	(a) Ensaio à compressão do concreto. (b) Corpos de prova-módulo de deformação.....	148
7.29	Determinação do módulo de deformação (a) Início do ensaio. (b) Fim do ensaio.....	148
8.1	Curvas carga-deslizamento para concreto com resistência média à compressão na faixa de 25 MPa e comprimentos de aderência de 3 ϕ , 5 ϕ e 10 ϕ	155
8.2	Curvas carga-deslizamento para concreto com resistência média à compressão na faixa de 50 MPa e comprimentos de aderência de 3 ϕ , 5 ϕ e 10 ϕ	155

8.3	Curvas carga-deslizamento para concreto com resistência média à compressão na faixa de 85 MPa e comprimentos de aderência de 3 ϕ , 5 ϕ e 10 ϕ	156
8.4	Curvas carga-deslizamento para comprimentos de aderência de 3 ϕ e concretos nas faixas de resistência média à compressão de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa.....	156
8.5	Curvas carga-deslizamento para comprimentos de aderência de 5 ϕ e concretos nas faixas de resistência média à compressão de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa.....	157
8.6	Curvas carga-deslizamento para comprimentos de aderência de 10 ϕ e concretos nas faixas de resistência média à compressão de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa.....	157
8.7	Curvas de tensões em função dos comprimentos de aderência para deslizamentos de 10, 100 e 1000 μ m e resistência à compressão dos concretos de 25, 50 e 85 MPa.....	159
8.8	Curvas de tensões de aderência em função da resistência do concreto, para deslizamentos de 10, 100 e 1000 μ m e comprimentos de aderência de 3 ϕ , 5 ϕ e 10 ϕ	161
8.9	Curvas de tensões experimentais de aderência e tensões teóricas de aderência em função da resistência à compressão do concreto.....	167

LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros da relação tensão de aderência-deslizamento em barras nervuradas.....	20
3.2	Parâmetros da relação tensão de aderência-deslizamento para barras lisas.....	20
4.1	Tensões de aderência obtidas em ensaio de flexão e de arrancamento. (RILEM).....	57
5.1	Valores de carga e deslizamento em ensaios de flexão. (ISA,1997).....	64
5.2	Valores de P_{10} , P_{100} e P_r , para deslizamentos de 10 μm , 100 μm e de ruptura. (ISA,1997)..	68
5.3	Valores de τ_{bm} e τ_{br} em ensaios de flexão (ISA, 1997).....	69
5.4	Composição e propriedades dos concretos usados (LARRARD et al, 1993).....	74
5.5	Comprimento de aderência para os vários diâmetros de barras. (LARRARD et al, 1993).....	75
5.6	Número de ensaios realizados. (LARRARD et al, 1993).....	76
5.7	Tensões médias e de aderência, MPa. (LARRARD et al, 1993).....	80
5.8	Cálculo da tensão interna máxima nos concretos. (LARRARD et al, 1993).....	82
5.9	Resultados do ensaio de aderência. (USUDA e outros, 1998).....	88
6.1	Dimensões dos corpos de prova (RILEM, 1978).....	95
6.2	Características granulométricas da areia.....	99
6.3	Características granulométricas das britas 1 e 2 e da composição utilizada.....	100
6.4	Características do aço utilizado no ensaio de aderência.....	104
7.1	Composição do concreto de 25 MPa.....	109
7.2	Propriedades mecânicas e de trabalhabilidade do concreto na faixa de 25 MPa.....	109
7.3	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 3 ϕ (f_{c28} =25 MPa).....	110
7.4	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 5 ϕ (f_{c28} =25 MPa).....	112
7.5	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 10 ϕ (f_{c28} =25 MPa).....	115

7.6	Cargas, tensões no aço e tensões de aderência, em função de diferentes valores de deslizamento para cada comprimento de aderência ($f_{c28}=25$ MPa).....	117
7.7	Composição do concreto de 50 MPa.....	119
7.8	Propriedades mecânicas e de trabalhabilidade do concreto na faixa de 50 MPa.....	119
7.9	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 3ϕ ($f_{c28}=50$ MPa).....	120
7.10	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 5ϕ ($f_{c28}=50$ MPa).....	122
7.11	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 10ϕ ($f_{c28}=50$ MPa).....	124
7.12	Cargas, tensões no aço e tensões de aderência, em função de diferentes valores de deslizamento para cada comprimento de aderência ($f_{c28}=50$ MPa).....	127
7.13	Composição do concreto de 85 MPa.....	129
7.14	Propriedades mecânicas e de trabalhabilidade do concreto na faixa de 85 MPa.....	129
7.15	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 3ϕ ($f_{c28}=85$ MPa).....	130
7.16	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 5ϕ ($f_{c28}=85$ MPa).....	133
7.17	Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 10ϕ ($f_{c28}=85$ MPa).....	136
7.18	Cargas, tensões no aço e tensões de aderência, em função de diferentes valores de deslizamento para cada comprimento de aderência ($f_{c28}=85$ MPa).....	139
8.1	Tensões em função dos comprimentos de aderência para deslizamentos de 10, 100 e 1000 μm (concretos com resistências de 25, 50 e 85 MPa).....	158
8.2	Tensões de aderência em função da resistência do concreto para deslizamentos de 10 e 100 e 1000 μm (comprimentos de aderência de 3ϕ , 5ϕ e 10ϕ).....	161
8.3	Tensões τ_{b10} , τ_{b100} , τ_{b1000} , τ_{bm} e τ_{br} e tensões de aderência pela NBR 6118 (1978 e 2000), e EUROCODE 2 (1990), dadas em função da resistência do concreto.....	166

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente que depende da forma com que a relação tensão de aderência é modelada.
ε	Deformação específica do aço.
ε_y	Deformação específica relativa à tensão de escoamento do aço.
ε_0	Deformação específica do aço, no meio do vão livre da barra ensaiada.
ε_1	Deformação específica do aço, após a zona de aderência da barra, no lado ímpar da viga.
ε_2	Deformação específica do aço, após a zona de aderência da barra, no lado par da viga.
ε_3	Deformação específica do aço, antes da zona de aderência da barra, lado ímpar da viga.
ε_4	Deformação específica do aço, antes da zona de aderência da barra, no lado par da viga.
ε^*	Retração autógena do concreto.
ϕ	Diâmetro da barra de aço.
γ_c	Coeficiente de minoração da resistência do concreto
η_b	Coeficiente de conformação superficial do aço (NBR 6118/78).
η_1	Coeficiente que leva em conta a conformação superficial das barras (NBR 6118/2000).
η_3	Coeficiente que leva em conta a situação de aderência das barras (NBR 6118/2000).
η_4	Coeficiente que leva em conta o diâmetro das barras (NBR 6118/2000).
σ_a	Tensão na barra de aço.
σ_I	Tensão diagonal responsável pelas fissuras diagonais ou transversais.
σ_t	Tensão tangencial de tração no concreto em torno da barra de arrancamento.
σ_{tmax}	Tensão tangencial máxima de tração no concreto.
σ_x	Tensão longitudinal de tração no concreto em torno da barra de arrancamento.
σ_y	Tensão radial de compressão no concreto em torno da barra de arrancamento.

σ_{y0}	Tensão radial ou longitudinal externa devido à retração do concreto..
σ_M	Tensão de confinamento no concreto.
τ_b	Tensão de aderência.
τ_{bm}	Tensão média de aderência.
τ_{bmax}	Tensão máxima de aderência.
τ_{br}	Tensão de ruptura da aderência.
τ_{b0}	Tensão em que é rompida a aderência química.
τ_{bA}	Tensão de aderência em que ocorrem as primeiras fissuras transversais (TASSIOS).
τ_{bB}	Tensão de aderência em que ocorrem as primeiras fissuras longitudinais (TASSIOS).
τ_{bC}	Tensão de aderência em que ocorrem as primeiras fissuras de cisalhamento (TASSIOS).
τ_{bU}	Tensão de aderência equivalente a τ_{bC} (TASSIOS).
τ_{b10}	Tensão de aderência em relação à um deslizamento de 10 μm .
τ_{b100}	Tensão de aderência em relação à um deslizamento de 100 μm .
τ_{b1000}	Tensão de aderência em relação à um deslizamento de 1000 μm .
ζ	Coeficiente que depende do campo triaxial de tensões em torno da barra de arrancamento
A	Área calculada da seção transversal da barra de aço.
A_s	Área nominal da seção transversal da barra de aço.
A_{st}	Área da seção transversal de estribo.
$A_{st,min}$	Área mínima da seção transversal de estribo.
c_x	Cobrimento de concreto.
c_y	Cobrimento de concreto.
d	Diâmetro da barra da armadura.
E01	Extensômetro elétrico colado na parte central da barra.
E02	Extensômetro elétrico colado na parte central da barra.
E1	Extensômetro elétrico colado após a zona de aderência da barra, no lado ímpar da viga.
E2	Extensômetro elétrico colado após a zona de aderência da barra, no lado par da viga.
E3	Extensômetro elétrico colado antes da zona de aderência da barra, no lado ímpar da viga.
E4	Extensômetro elétrico colado antes da zona de aderência da barra, no lado par da viga.
E_c	Módulo de deformação longitudinal do concreto.
E_s	Módulo de deformação longitudinal do aço.

f_{bc}	Tensão de aderência no instante da fissuração longitudinal do concreto.
f_{bd}	Tensão de aderência teórica (NBR 6118/1978, NBR 6118/2000 e EUROCODE 2)
f_c	Resistência à compressão do concreto.
f_{cd}	Resistência à compressão de cálculo do concreto (NBR 6118/78).
f_{cm}	Resistência média à compressão do concreto.
f_{cm28}	Resistência média à compressão do concreto aos 28 dias.
f_{ctd}	Resistência à tração de cálculo do concreto (NBR 6118/2000).
$f_{ctk,inf}$	Resistência à tração característica inferior do concreto
f_t	Resistência à tração do concreto.
f_{tm}	Resistência média à tração do concreto.
f_{tm28}	Resistência média à tração do concreto aos 28 dias.
f_y	Tensão de escoamento do aço.
f_R	Módulo de ruptura à tração do concreto.
K_s	Módulo de deslizamento.
$K_{s0,1}$	Módulo de deslizamento secante para deslizamento igual a 0,1 mm.
n	Número de barras envolvidas pelos estribos.
p	Pressão transversal exercida sobre o concreto pela armadura de confinamento.
P	Carga aplicada.
P_s	Carga de tração aplicada no aço.
P_r	Carga de ruptura da aderência.
$R1$	Relógio comparador colocado do lado ímpar da viga.
$R2$	Relógio comparador colocado do lado par da viga.
s	Deslocamento relativo entre o aço e o concreto (deslizamento).
ν_c	Coefficiente de Poisson do concreto.
ν_s	Coefficiente de Poisson do aço.

RESUMO

Rossi, Nelson. Resistência de Aderência Concreto-Aço: Efeitos da Resistência à Compressão do Concreto e do Comprimento de Aderência. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 207 páginas. Dissertação de Mestrado.

O ensaio tipo viga RILEM/CEB/FIP - RC 5 é considerado bastante apropriado para determinação da tensão de aderência entre aço e concreto, uma vez que pode estabelecer panorama de tensões na barra de aço, similar ao verificado na prática. Neste ensaio, parâmetros como a resistência à compressão média do concreto e o comprimento de aderência da barra de aço tem seus valores fixados, respectivamente, entre 22,5 MPa e 27,5 MPa, e em 10 vezes o diâmetro da barra. Resultados recentes apresentados na literatura indicam que para resistências à compressão do concreto mais elevadas, o valor do comprimento de aderência da barra deva ser diminuído, sob o risco de não se atingir o limite máximo de deslizamento relativo previsto neste ensaio padrão. Este trabalho pretende oferecer subsídios à futura normatização deste ensaio para o concreto de alta resistência. Parâmetros como a resistência à compressão do concreto e o comprimento de aderência da barra foram avaliados através do estudo experimental de 9 corpos de prova tipo viga, divididos em 3 séries de 3 vigas com resistência a compressão do concreto de aproximadamente 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa. Em cada série, com uma mesma resistência à compressão, uma barra de aço com 20 mm de diâmetro teve seu comprimento de aderência fixado em 10, 5 e 3 vezes o diâmetro da barra. Ao final deste trabalho a influência dos parâmetros envolvidos foi, criticamente, avaliada.

Palavras-Chave: tensão de aderência, aderência, deslizamento, concreto de alta resistência.

ABSTRACT

The beam test RILEM/CEB/FIP – RC 5 is considered quite appropriate to determine the bond strength between steel bars and concrete, since it can establish the strength condition in the reinforcing bar, as we verified in practice. In this test, parameters as the compressive strength of the concrete and the bond lengths of the reinforcing bar have their fixed values, respectively, between 22,5 and 27,5 MPa, and 10 times the bar diameter. Recent results presented in the literature indicate that for high-strength concrete, the bond length value should be decreased, under the risk of not reaching the maximum relative slippage limits foreseen in this standard test. This work intends to offer subsidies to the future standardization of this test for the high-strength concrete. Parameters as the compressive strength of concrete and bar bond length were evaluated through the experimental study of 9 specimens type beam, divided in 3 series of 3 beams with compressive strength of the concrete of approximately 25 MPa, 50 MPa and 85 MPa. In each series, with a same compressive strength, a steel bar with a diameter of 20 mm had its bond length fixed in 10, 5 and 3 times of bar diameter. At the end of this work the influence of involved parameters was, critically, evaluated.

Keywords: bond strength, bond, slippage, high-strength concrete

1 OBJETIVO

A RILEM/CEB/FIB (1978), conforme as recomendações do RC 5, prevê um ensaio de aderência entre o aço e o concreto, utilizando-se de um ensaio em vigas onde é fixado além da resistência média do concreto (entre 22,5 MPa e 27,5 MPa, medidos em corpos de prova cilíndricos), o diâmetro do aço e em relação a ele o comprimento de aderência, as dimensões do corpo de prova e da armadura de confinamento.

Como é sabido pelos resultados apresentados na literatura consultada e também por experiência em outro trabalho semelhante realizado nos laboratórios da UNICAMP, mantendo-se os comprimentos de aderência especificados no RC 5, não se consegue determinar a resistência de aderência quando se trabalha com concretos de resistências maiores devido a ocorrência do escoamento do aço e deslizamentos incipientes.

O objetivo principal deste trabalho é fornecer subsídios para padronizar o ensaio da RILEM para outras classes de resistência à compressão do concreto. Foram mantidos fixos o diâmetro e tipo do aço ($\phi = 20$ mm, para barra nervurada de CA 50 com patamar de escoamento), a armadura de confinamento conforme recomendação do RC 5 para esse diâmetro de barra e a composição do concreto.

Foram variados o comprimento de aderência, usando-se os 10 diâmetros (10 ϕ) proposto pela RILEM, além de 5 diâmetros (5 ϕ) e 3 diâmetros (3 ϕ), variando ainda a resistência média do concreto, trabalhando dentro da faixa da RILEM com 25 MPa, além de 50 MPa e 85 MPa. Como se tem três resistências e três comprimentos de aderência, totalizam-se nove tipos diferentes de

vigas. Como a dispersão de resultados, segundo LARRARD et al (1993), é bastante grande neste tipo de ensaio, existe a possibilidade de repeti-los mais uma vez, o que se acontecer para cada situação, daria um total inicial de dezoito vigas.

A resistência média, aos 28 dias, de cada concreto utilizado foi medida em corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. As vigas ensaiadas, empregando concreto conforme especificação da RILEM, na faixa de resistência de 25 MPa, servem como testemunhos para efeito comparativo, com as outras situações de resistência.

2 INTRODUÇÃO

Uma das características essenciais do concreto armado é a aderência entre o aço e o concreto. Na verdade, este é o fundamento do concreto armado: para absorver os esforços solicitantes, o concreto e a armadura devem atuar em conjunto. Assim, os estudos sobre a aderência aço-concreto são de importância central (DAL MOLIN, 1995).

Considera-se, conforme DUCATTI (1993), que o modelo do comportamento da aderência entre o concreto e o aço é representado pela relação entre a tensão de aderência e o deslizamento, sendo a primeira idealizada pela tensão de cisalhamento na interface barra-concreto e o segundo pelo deslocamento relativo entre a armadura e o concreto ocasionado pela diferença entre as deformações específicas do aço e do concreto.

O entendimento das características da resistência de aderência do concreto-aço é extremamente importante para que, por exemplo, os projetistas consigam estabelecer um comprimento seguro de ancoragem da barra de aço nos elementos em concreto. Sabe-se também pelo levantamento bibliográfico que o comportamento de aderência tem sido pouco testado em condições representativas para viga de concreto armado, na presença de armadura transversal.

Pode-se citar FUSCO (1995): “A validade do ensaio de arrancamento para a determinação da capacidade de ancoragem das barras é por vezes contestada, em virtude das divergências existentes entre o panorama de tensões obtido nesse tipo de ensaio e aquele correspondente às regiões de ancoragem das armaduras das peças de concreto armado. No ensaio de arrancamento, existe uma compressão longitudinal do concreto que não existe na zona de

ancoragem da armadura de tração das vigas fletidas, por isso se sugere que a capacidade de ancoragem das barras seja determinada por meio de um corpo de prova do tipo viga”.

Portanto, no presente trabalho pretende-se simular o panorama de tensões que ocorre na região de ancoragem da barra em uma viga de concreto armado, numa situação prática, utilizando um corpo de prova tipo viga sujeito à flexão.

O ensaio padrão RILEM/CEB/FIP – RC 5 fixa parâmetros como a resistência à compressão média do concreto entre 22,5 MPa e 27,5 MPa e o comprimento de aderência da barra de aço, em 10 vezes o diâmetro da barra. Quando da utilização de concretos com resistências à compressão mais elevadas, pode ocorrer a não verificação do limite máximo de deslizamento relativo, previsto neste ensaio padrão. Isto pode ser atribuído ao fato de o comprimento de aderência se mostrar excessivo diante da melhoria de aderência provocada pelas características deste concreto.

Com o intuito de oferecer subsídios à futura normatização deste ensaio para o concreto de alta resistência, parâmetros como a resistência à compressão do concreto e o comprimento de aderência da barra foram avaliados através do estudo experimental de 9 corpos de prova tipo viga, divididos em 3 séries de 3 vigas com resistência a compressão do concreto em torno de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa. Para que ao final deste trabalho fosse feita uma avaliação crítica da influência dos parâmetros envolvidos, procura-se estabelecer uma faixa de resistência à compressão média do concreto que contemple o estabelecido no padrão RILEM/CEB/FIP e atinja também aquela que define os concretos de alta resistência.

Em cada série, com uma mesma resistência à compressão, uma barra de aço com 20 mm de diâmetro teve seu comprimento de aderência fixado em 10, 5 e 3 vezes o diâmetro da barra, contemplando o estabelecido pelo ensaio padrão e ao mesmo tempo procurando estabelecer comprimentos de aderência compatíveis a concretos de resistências mais elevadas.

Este trabalho é estruturado em 9 capítulos.

No capítulo 1, depois de fazer uma apresentação do método de ensaio de aderência em vigas proposto pela RILEM/CEB/FIP - RC 5, delinea-se o objetivo principal deste trabalho que coloca variações, cujo intuito é fornecer subsídios para a padronização do método para concretos com resistências e comprimentos de aderência diferentes do especificado na norma original.

No capítulo 2, além da estrutura deste trabalho, disserta-se sobre a sinergia entre o aço e o concreto cuja característica essencial é a atuação em conjunto destes dois materiais com o propósito de absorver os esforços solicitantes, deixando claro que o entendimento da aderência entre o concreto e o aço é fundamental para o dimensionamento de ancoragens nas estruturas e propondo este estudo em corpos de prova tipo viga de concreto armado, numa situação mais próxima possível da prática.

No capítulo 3 são estudados os fenômenos da aderência, dando ênfase ao modelo clássico de comportamento da aderência proposto por TASSIOS (1979), e pelo código modelo de comportamento entre a tensão de aderência e o deslizamento proposto pelo CEB-FIP (1990).

No capítulo 4 discorre-se sobre os ensaios usuais na determinação da aderência entre o aço e o concreto; começando pelo ensaio dos tirantes, passa-se para o ensaio de arrancamento, em seguida pelo das quatro barras chegando finalmente aos ensaios de flexão. Em cada um destes ensaios, são colocadas as experiências de diversos pesquisadores do assunto, bem como os resultados obtidos, análises e conclusões elaboradas pelos mesmos.

No capítulo 5 são apresentadas as investigações experimentais realizadas utilizando o ensaio de viga, padrão RILEM/CEB/FIP - RC 5, objetivo principal deste trabalho, destacando o trabalho de ISA, M. M. (1997) e o trabalho de De LARRARD, F.; SCHALLER, I.; FUCHS, J.(1993). Também consta, como motivação para a realização deste próprio trabalho, o ensaio realizado na UNICAMP por USUDA, F. E., PEIXOTO, A. S. P., BATELOCHI, R. (1988).

O capítulo 6 trata da metodologia e do programa experimental da pesquisa, passando pelo estudo do corpo de prova empregado, armadura de confinamento, tipo de barra de aço estudado e comprimentos de aderência utilizados, faixas de resistência à compressão do concreto selecionadas para este estudo, bem como a escolha e a adequação dos materiais componentes para que se colocassem em acordo com características exigidas pelo ensaio. Os passos seguintes, foram a produção do concreto, moldagem das vigas com as fôrmas apropriadas, moldagem de corpos de prova cilíndricos para controle tecnológico do concreto, e condições de cura. Este capítulo trata ainda do monitoramento eletrônico da viga com o intuito de fazer a medição das deformações do aço em diversos pontos da barra bem como o deslizamento entre a barra e o concreto, objetivo principal do ensaio.

No capítulo 7, foram apresentados os resultados obtidos na parte experimental deste trabalho, utilizando-se de tabelas de dados e gráficos oriundos das medições realizadas, com comentários analíticos sobre cada ensaio realizado. No final do capítulo, são apresentadas as principais impressões fotográficas a respeito dos trabalhos realizados.

No capítulo 8, comenta-se, de uma maneira geral, os resultados obtidos no capítulo 7, iniciando-se pela análise do concreto de resistência à compressão na faixa de 25 MPa, e, em seguida, analisando-se o concreto com resistência à compressão na faixa de 50 MPa. Por fim, analisa-se o concreto com resistência à compressão na faixa de 85 MPa.

No capítulo 9, são feitas considerações finais sobre o prosseguimento dos estudos.

3 MECANISMOS DE ADERÊNCIA (FENÔMENOS DE ADERÊNCIA)

É muito importante no contexto deste trabalho que se faça um estudo do comportamento da aderência entre o concreto e a armadura sob carregamento monotônico e de curta duração, entendido como um carregamento que se inicia em zero e é aplicado de forma contínua e crescente até a ocorrência da ruptura caracterizada por perda de aderência, durante um intervalo de tempo pequeno.

A hipótese fundamental do concreto armado está baseada na transferência de esforços entre a armadura e o concreto, que é possível devido à iminência de escorregamento relativo entre os dois materiais, sendo que a resistência ao escorregamento é entendida como resistência de aderência ou simplesmente aderência. A tensão de cisalhamento, atuante na interface formada pelo concreto e a armadura é comumente utilizada para identificar a aderência entre os dois materiais.

Conforme FUSCO (1995), a solidariedade entre a armadura e o concreto é garantida pela existência de uma certa aderência entre os dois materiais, sendo a mesma composta de diversas parcelas, que decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação dos dois materiais.

Segundo o BULLETIN D'INFORMATION DU CEB (1990), a grandeza das resistências de aderência depende fundamentalmente da conformação geométrica superficial da armadura, posição e orientação da barra durante a concretagem, das condições da interface concreto-barra, do cobrimento do aço pelo concreto, da resistência do concreto à compressão e à tração, e da definição de um valor de deslizamento entre o aço e o concreto.

LEONHARDT e MÖNNING (1977), assim como FUSCO (1995), afirmam que a aderência é decorrente de três parcelas distintas: aderência por adesão química, aderência por atrito e aderência mecânica.

3.1 Aderência por adesão química

A parcela de aderência por adesão química, ilustrada na figura 3.1, é proveniente do processo físico-químico atuante na interface entre o aço e o concreto durante as reações de hidratação do cimento e pode ser entendida como colagem propriamente dita, estando ligada à rugosidade e à limpeza da superfície da armadura. Apenas esse efeito é insuficiente para garantir a ligação, haja vista que ele pode ser eliminado por deslocamentos bastante pequenos da barra. O ACI COMMITTEE 408 (1991) limita os valores de adesão química entre 0,48 e 1,03 MPa, quando se trata de carregamentos monotônicos.

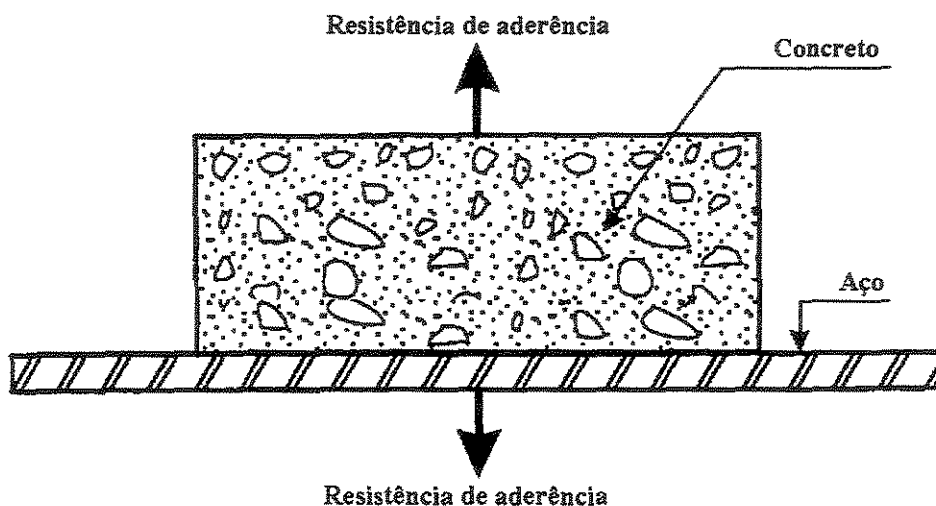


Figura 3.1 Aderência por adesão química; adap. Fusco (1995)

3.2 Aderência por atrito

Esta parcela da aderência é proveniente das forças de atrito entre o concreto e o aço, dependendo do coeficiente de atrito dado em função da condição de rugosidade superficial da barra e da compressão transversal aplicada pelo concreto sobre a mesma. Esta compressão é proveniente de cargas como a oriunda da compressão transversal externa, usualmente encontrada nos apoios diretos das vigas e a proveniente do efeito de retração do concreto durante a cura.

Segundo FUSCO (1995), a presença da barra inibe parcialmente as deformações de retração do concreto, daí surgindo a pressão transversal que provoca o acréscimo de aderência. A força de arrancamento P numa barra parcialmente mergulhada no concreto, devido à parcela de aderência por atrito, é significativamente superior aos limites da aderência por adesão química; a aderência por atrito está ilustrada nos desenhos da figura 3.2. A aderência por atrito pode ser verificada através de ensaios de arrancamento.

O ACI COMMITTEE 408 (1991), limita os valores de aderência por atrito entre 0,41 e 10,0 MPa.

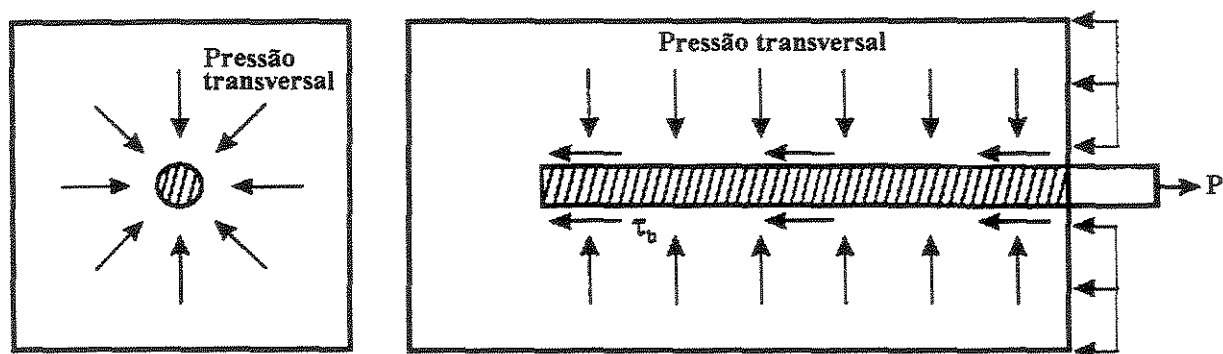


Figura 3.2 Aderência por atrito no ensaio de arrancamento; adap. FUSCO (1995)

3.3 Aderência mecânica

Esta parcela de aderência é decorrente da formação de consoles de concreto entre as nervuras das barras nervuradas. Esta é a parcela que mais contribui na aderência das barras com essa conformação geométrica superficial.

Segundo FUSCO (1995), as nervuras nas barras de alta aderência funcionam como peças de apoio, mobilizando tensões de compressão no concreto.

Os consoles impedem o deslizamento rápido no interior do concreto, transformando esse tipo de aderência na ligação mais efetiva das três relacionadas, traduzindo-se no mecanismo que permite um melhor aproveitamento da resistência dos aços. A figura 3.3 mostra a aderência mecânica decorrente da presença de saliências na superfície das barras.

Nas barras lisas, a aderência depende praticamente da adesão química e do atrito, podendo se considerar um engrenamento mecânico, porém menor que o da barra nervurada, decorrente da sua rugosidade superficial que resultou do processo de laminação.

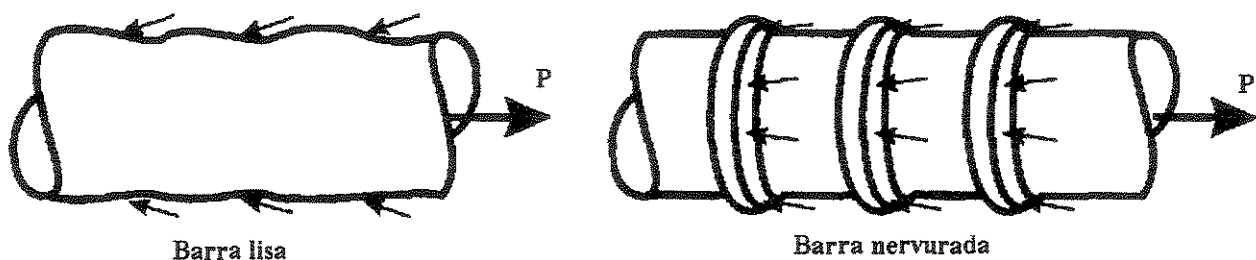


Figura 3.3 Aderência mecânica decorrente das saliências; adap. FUSCO (1995)

Conforme FUSCO (1995), para barras lisas, a aderência mecânica e a aderência por atrito praticamente se confundem. Este mesmo autor cita REHM, que diz que nas barras lisas o

efeito de aderência mecânica também está presente em virtude das irregularidades superficiais inerentes ao processo de laminação, conforme a representação na figura 3.4, adaptada de FUSCO (1995).

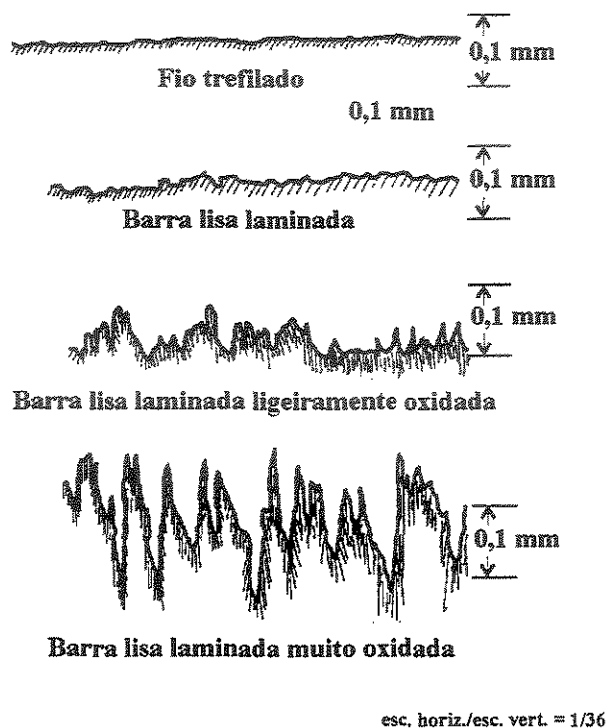


Figura 3.4 As irregularidades superficiais produzem aderência mecânica;
adap. FUSCO (1995)

Conforme FUSCO (1995), a separação da aderência nas três parcelas citadas, é meramente esquemática, não sendo possível determinar cada uma delas isoladamente. A aderência da barra ao concreto tem seu valor influenciado pela retração, pela fluência e pela fissuração deste material. É determinada através de ensaios, valores médios globais de aderência, não havendo em situações práticas necessidade de se fazer um estudo em escala microscópica.

As variáveis que influem na aderência mecânica são o espaçamento, a altura e a inclinação das nervuras, parâmetros que estão associados à denominação “área nervurada relativa”.

HAMAD (1995) propõe um esquema para as forças que influenciam na aderência.

A figura 3.5 (a) esquematiza tais forças aplicadas pela nervura da barra sobre o console de concreto do cobrimento bem como as reações resultantes. A figura 3.5 (b) mostra a denominação destas forças componentes da aderência, adaptado de HAMAD (1995).

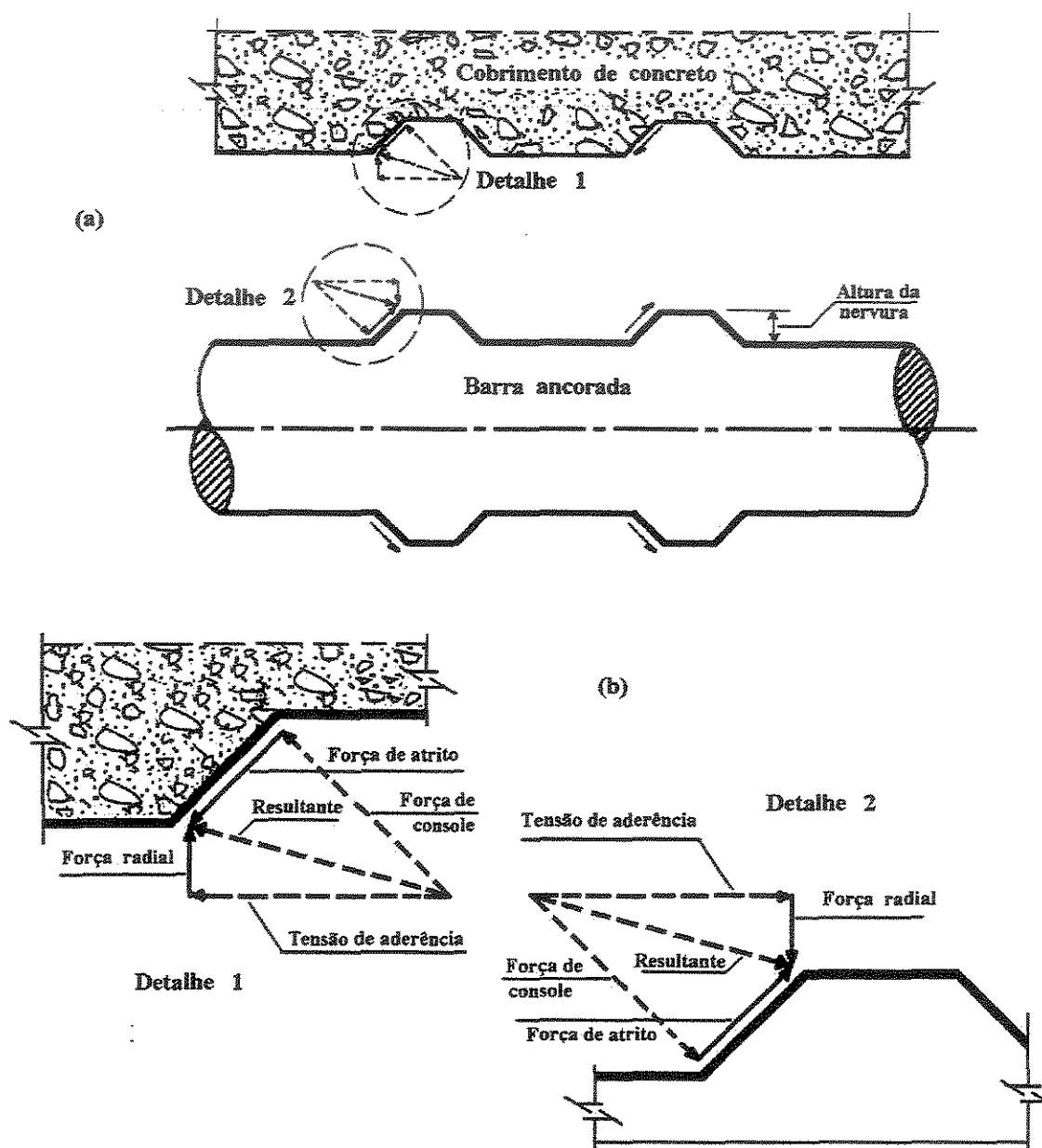


Figura 3.5 Ações e reações entre o console de concreto e a nervura da barra de aço;
adap. HAMAD (1995)

3.4 Comportamento local da aderência-deslizamento conforme o modelo de TASSIOS (1979)

Pode-se definir aderência entre o concreto e o aço como sendo a relação entre a tensão de aderência e o deslizamento, sendo que este é determinado pelo deslocamento relativo entre o aço e o concreto devido à diferença entre as deformações específicas desses dois materiais.

TASSIOS (1979) propõe um modelo teórico que relaciona as tensões de aderência, os deslizamentos e as fissurações em distintas etapas do carregamento. Estas relações, na representação simplificada do diagrama da figura 3.6, permitem entender o mecanismo de aderência entre o aço e o concreto.

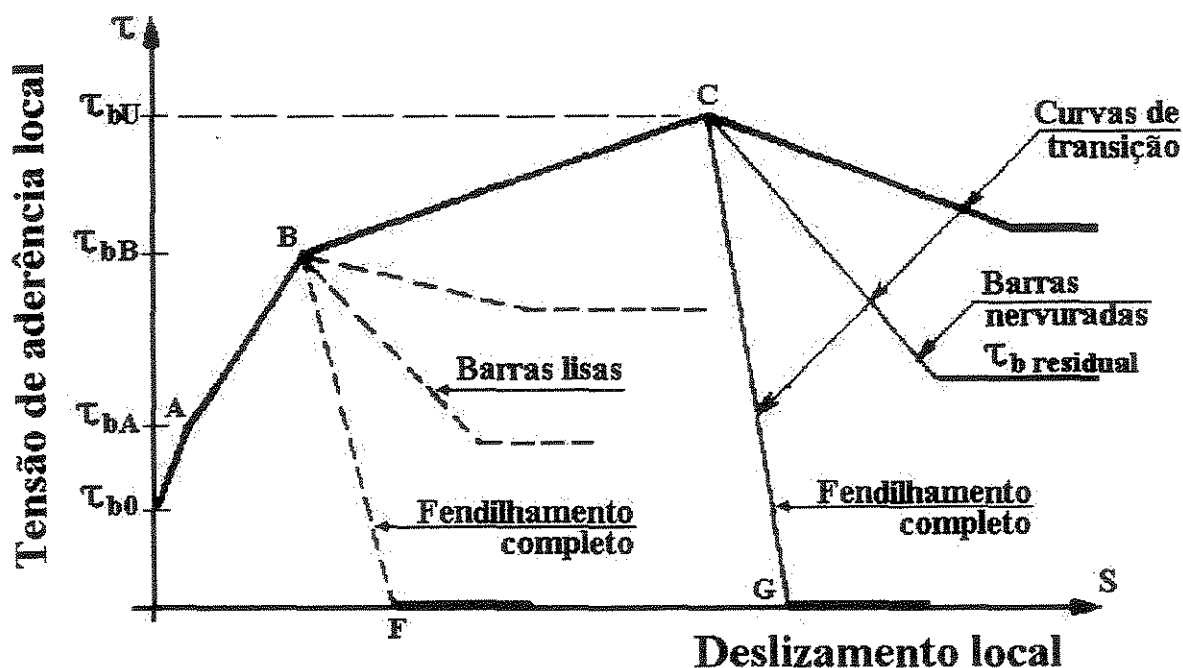


Figura 3.6 Relação entre a tensão de aderência e o deslizamento local. TASSIOS (1979)

Conforme TASSIOS (1979), no início da solicitação, o aço e o concreto permanecem no regime elástico. Como estes dois materiais são diferentes no tocante às propriedades físicas

envolvidas, como por exemplo nas deformações, a armadura tende a se movimentar em relação ao concreto do seu entorno. Até a tensão τ_{b0} , os deslocamentos são da ordem de micrômetros e diz-se que a união entre o concreto e o aço é de natureza química. Conforme aumenta a sollicitação, a tensão de aderência cresce, atingindo τ_{b0} , instante em que é rompida a aderência química. TASSIOS estima a resistência de aderência suportada pela adesão química entre 0,5 e 1,5 MPa; conforme vimos anteriormente, de acordo com o ACI COMMITTEE 408 (1991) esses valores estão entre 0,48 e 1,03 MPa.

De acordo com o modelo de TASSIOS, após o nível de tensão τ_{b0} , com o incremento do carregamento haverá mobilização do engrenamento mecânico da pasta com as barras lisas e da argamassa com as nervuras das barras de alta aderência.

Com o incremento das sollicitações, a tensão de aderência atinge o valor de τ_{bA} , quando aparecem as primeiras fissuras internas, referidas como fissuras transversais ao eixo da barra, que também são chamadas de fissuras diagonais ou de aderência; conforme TASSIOS (1979), as tensões τ_{bA} são estimadas entre 2,0 a 3,0 MPa para um concreto com $f_{cm} = 30,0$ MPa.

Com a diminuição da aderência, a rigidez da ligação é diminuída, o que se nota pela menor inclinação da curva no trecho AB, caracterizando que para menores incrementos de tensão, ocorrem maiores deslizamentos. Na medida em que a tensão passa por τ_{bA} e continua a crescer, pode aparecer logo após ou simultaneamente, as fissuras de fendilhamento longitudinal.

Quando a tensão passa por τ_{bB} , as fissuras de fendilhamento longitudinal, que ocorrem ao longo do concreto de cobertura da armadura, se irrompem totalmente. Nesta situação, as barras lisas são perfeitamente arrancadas de dentro do concreto, deixando um orifício praticamente intacto, situação caracterizada pelas curvas de transição. No caso de barras nervuradas, quando não há confinamento do concreto, acontece a “explosão” do mesmo por fendilhamento, caracterizado pelo ramo BF da curva; ou no caso de haver confinamento tem o seu deslizamento crescendo em taxa muito mais acelerada para tensões crescentes acima de τ_{bB} .

Para valores de tensões entre τ_{bB} e τ_{bC} , as barras nervuradas apresentam uma aceleração crescente do deslizamento, devido à diminuição do confinamento e do esmagamento do concreto à frente das nervuras.

Quando finalmente se atinge o ponto C, fica caracterizada a tensão τ_{bC} também chamada de tensão última de aderência τ_{bU} , podendo acontecer o arrancamento perfeito das barras de alta aderência devido ao ralamento do concreto pelas nervuras, sendo que o seu deslizamento total, conforme as curvas de transição, é impedido somente pelo atrito concreto-concreto até atingir o estágio final de tensão de aderência residual $\tau_{bresidual}$.

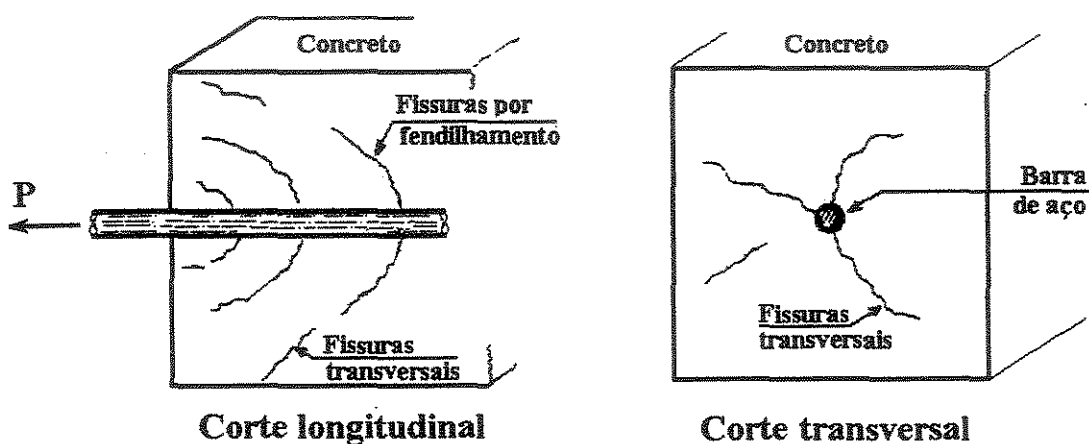


Figura 3.7 Fissuras transversais e de fendilhamento. TASSIOS (1979)

3.4.1 Análise da distribuição das tensões e das fissuras na interface aço-concreto

A análise da provável distribuição de tensões na interface aço-concreto é feita por TASSIOS (1979), conforme figura 3.8.

Tensões longitudinais relativamente grandes de tração σ_x atuam no concreto circundante à barra, quando esta é arrancada; quando a barra é empurrada, estas tensões são de compressão.

O arrancamento propriamente dito produz tensões radiais de compressão σ_y .

A ação conjunta de τ_b , σ_x e σ_y , mais as possíveis tensões radiais e longitudinais externas, como a compressão devido à retração σ_{y0} , produzem grandes tensões diagonais σ_I provocando fissuras diagonais ao longo da barra, denominadas de fissuras transversais. Ao mesmo tempo, tensões tangenciais de tração σ_t , normais à barra, provocam o aparecimento de microfissuras internas, principiando um micro-fendilhamento longitudinal interno. Entretanto, para o nível de tensões atingidas neste estágio de carregamento, os valores de σ_t são bem mais baixos do que os de σ_I , o que provoca a fissuração transversal antes da longitudinal.

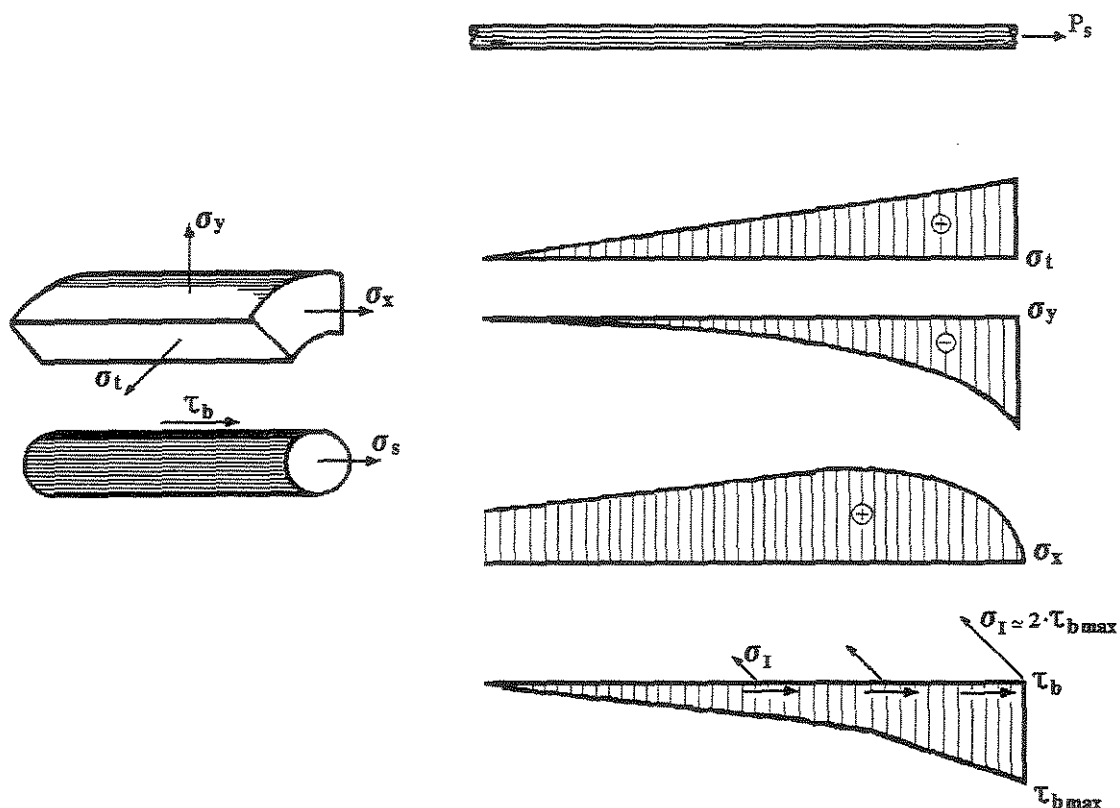


Figura 3. 8 Distribuição das tensões no entorno da barra (na interface aço-concreto), conforme TASSIOS (1979)

Com o incremento do carregamento, o micro-fendilhamento se propaga radial e longitudinalmente ocorrendo a fissuração do concreto, o que justifica uma menor inclinação do trecho AB. O colapso parcial do engrenamento na interface aço-concreto, faz com que as tensões aí existentes sejam de atrito e que tentem restabelecer o equilíbrio.

Daí duas situações podem ocorrer:

Ou arrancamento da armadura devido à resistência de aderência aço-concreto ter sido atingida, formando um buraco de paredes relativamente lisas no concreto circundante, ou então o rompimento do concreto por fissuras de fendilhamento. Essa situação é relativa ao nível de tensão τ_{bB} .

Com armaduras de alta aderência, proporcionando uma tensão de cisalhamento maior devido à existência de nervuras, pode ocorrer o fendilhamento. Entretanto este fendilhamento pode não acontecer por conta do confinamento proporcionado pela existência de armadura transversal ou cobrimento suficiente.

No momento em que se alcança o ponto C no diagrama, caracterizando a tensão de aderência τ_{bC} , acontece a pulverização das saliências do concreto. A tensão de aderência tende a crescer até que os dentes de concreto, ao longo do comprimento aderente, sejam pulverizados por compactação, e quando isso ocorre, o mecanismo resistente é o atrito com a superfície de ruptura relativamente cilíndrica.

3.5 Comportamento da tensão de aderência e o deslizamento proposto pelo Código Modelo CEB-FIP (1990)

No caso de carregamento monotônico, as tensões de aderência entre o concreto e a armadura podem ser calculadas como uma função do deslocamento relativo s , de acordo com as

equações 3.1 a 3.4; a figura 3.9 (CEB-FIP, 1990) representa a relação analítica entre a tensão de aderência e o deslizamento e interpreta graficamente as equações citadas.

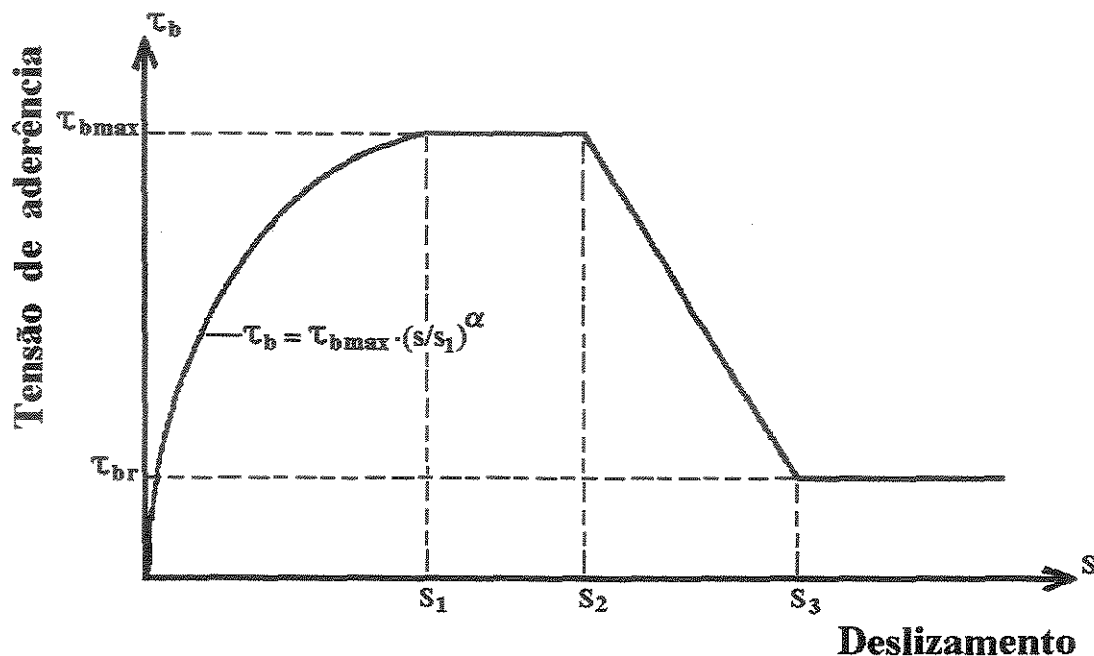


Figura 3.9 Relação analítica entre a resistência de aderência e o deslizamento. CEB-FIP (1990)

O ramo ascendente da figura, representa o estágio em que as nervuras penetram na argamassa do concreto, ocorrendo a microfissuração.

O trecho seguinte do diagrama, representado por um patamar retilíneo, corresponde à ruptura avançada e ao cisalhamento do concreto entre as nervuras; esta situação ocorre somente para o concreto confinado.

A parte descendente do diagrama corresponde a uma redução na tensão de aderência, proveniente das fissuras de fendilhamento ao longo da barra.

O último trecho, correspondendo ao patamar horizontal, representa a capacidade residual de aderência. Aqui é conservado ainda um alto grau de integridade da ligação, situação que é

mantida pelo uso de armadura transversal mínima.

As equações abaixo são interpretadas pelo gráfico da figura 3.9.

$$\tau_b = \tau_{b\max} \left[\frac{s}{s_1} \right]^\alpha \quad \text{para } 0 \leq s \leq s_1 \quad (3.1)$$

$$\tau_b = \tau_{b\max} \quad \text{para } s_1 < s \leq s_2 \quad (3.2)$$

$$\tau_b = \tau_{b\max} - (\tau_{b\max} - \tau_{br}) \left[\frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right] \quad \text{para } s_2 < s \leq s_3 \quad (3.3)$$

$$\tau_b = \tau_{br} \quad \text{para } s_3 < s \quad (3.4)$$

Onde:

τ_b = tensão de aderência

$\tau_{b\max}$ = tensão de aderência máxima

τ_{br} = tensão de aderência de ruptura

s = deslocamento relativo entre o aço e o concreto

α = coeficiente que depende da forma com que a relação tensão de aderência é modelada ($0 \leq \alpha \leq 1$)

($\alpha = 0$) para tensões uniformes

($\alpha = 1$) para relação linear

O CEB/FIP (1990) dita parâmetros para a definição da relação tensão de aderência-deslizamento em barras nervuradas, conforme mostra a tabela 3.1.

Tabela 3.1 Parâmetros da relação tensão de aderência-deslizamento em barras nervuradas.

CEB/FIP (1990)

	2	3	4	5
Valor	Concreto não confinado (*)		Concreto confinado (**)	
	Condições de aderência		Condições de aderência	
	Boas	Demais casos	Boas	Demais casos
S_1	0,6 mm	0,6 mm	1,0 mm	
S_2	0,6 mm	0,6 mm	3,0 mm	
S_3	1,0 mm	2,5 mm	espaço entre nervuras	
α	0,4		0,4	
τ_{bmax}	$2,0 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$1,0 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$2,5 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$1,25 \cdot \sqrt{f_{ck}}$
τ_{br}	$0,15 \cdot \tau_{bmax}$		$0,40 \cdot \tau_{bmax}$	

(*) ruptura por fendilhamento do concreto.

(**) ruptura por cisalhamento do concreto entre as nervuras

Os parâmetros para definição da relação tensão de aderência-deslizamento, constantes da tabela 3.2, segundo o Boletim CEB/FIP (1990), são válidos para barras cuja conformação geométrica superficial é lisa, tendo como principais fatores de influência na tensão de aderência a aspereza superficial da barra, as condições de aderência e a resistência do concreto, tanto para concreto confinado como não confinado.

Tabela 3.2 Parâmetros da relação tensão de aderência-deslizamento para barras lisas.

CEB/FIP (1990)

Valores	Fios treilados à frio		Barras laminadas à quente	
	Condições de aderência		Condições de aderência	
	Boas	Demais casos	Boas	Demais casos
$s_1 = s_2 = s_3$	0,01 mm		0,1 mm	
α	0,5		0,5	
$\tau_{bmax} = \tau_{br}$	$0,1 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$0,05 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$0,30 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$0,15 \cdot \sqrt{f_{ck}}$

Os valores da tabela 3.1 e 3.2 são aplicáveis somente nos estados de carregamento nos quais o concreto não está sujeito à tração lateral.

Os valores dados na tabela 3.1 são válidos para barras que estão a uma distância superior a 5ϕ da fissura, sendo que os valores das colunas 2 e 3 são válidos para concreto com cobrimento $c = 1\phi$ e armadura transversal mínima de:

$$A_{st,min} = 0,25 \cdot n \cdot A_s \quad (3.5)$$

onde:

A_{st} = área dos estribos (dois ramos) no comprimento igual ao de ancoragem

n = número de barras envolvidas pelos estribos

A_s = área de uma barra

Os valores das colunas 4 e 5 da tabela 3.1 são válidos para concreto perfeitamente confinado, ou seja, cobrimento do concreto $c \geq 5\phi$, espaçamento entre barras $> 10\phi$ ou armadura transversal regularmente espaçada com área $A_{st} > n \cdot A_s$ ou ainda sob grande pressão lateral $p \geq 7,5$ MPa atuando como pressão transversal média sob carga de projeto.

Quando a armadura transversal A_{st} for

$$A_{st,min} < A_{st} < n \cdot A_s \quad (3.6)$$

ou a pressão transversal p for

$$0 < p < 7,5 \text{ MPa} \quad (3.7)$$

então os valores de s_1 , s_3 , τ_{bmax} e τ_{br} podem ser interpolados linearmente entre os valores do concreto confinado e não confinado.

Quando uma armadura transversal $A_{st} > A_{st,min}$ e uma pressão lateral p estiverem presentes ao mesmo tempo, os efeitos devem ser somados.

O CEB/FIP (1990) afirma que os parâmetros apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2 são relativos a valores médios, com o coeficiente de variação de tensões para um dado deslizamento podendo chegar à ordem de 30 %, sendo as maiores dispersões aquelas para deslizamentos pequenos. Variações como diferentes tipos de corpos de prova, que originam diferentes estados de tensão no entorno da barra, bem como diferentes técnicas utilizadas para determinação de medidas, ou diferentes velocidades de carregamento e deformação, provocam as citadas dispersões de resultados. Deve ser considerada nas dispersões a influência da heterogeneidade do concreto bem como a geometria das barras no que diz respeito ao seu diâmetro e à área relativa de nervuras.

3.6 Influência da geometria da barra na aderência

O desempenho dos aços de alta aderência no concreto armado é dado pelas nervuras conformadas durante a laminação, sendo de dois tipos conforme sua posição em relação ao eixo da barra: as longitudinais ou longas e as transversais ou curtas. As longitudinais são em número de duas, estando situadas diametralmente opostas e tem a função de impedir o giro das barras por torção. As transversais, mais importantes, promovem a aderência entre o aço e o concreto por intermédio do efeito cisalhamento-aderência.

A NBR 7480 especifica que as nervuras transversais ou oblíquas devem formar, com a direção do eixo da barra, um ângulo igual ou superior a 45° e que as mesmas devem ter pelo menos duas nervuras longitudinais contínuas e diametralmente opostas, exceto no caso em que as nervuras transversais estejam dispostas de modo a se oporem ao giro da barra dentro do concreto.

A altura média das nervuras transversais ou oblíquas, para barras com diâmetros

nominais maiores ou iguais a 10,0 mm, deve ser igual ou superior a 0,04 do diâmetro nominal. Para barras com diâmetros nominais inferiores a 10,0 mm, deve ser igual ou superior a 0,02 do diâmetro nominal.

O espaçamento médio das nervuras transversais ou oblíquas, medido ao longo de uma geratriz, deve estar entre 0,5 e 0,8 do diâmetro nominal.

As nervuras devem abranger pelo menos 85 % do perímetro nominal da seção transversal da barra.

4 ENSAIOS USUAIS NA DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

4.1 Ensaio dos tirantes

Neste ensaio, conforme DUCATTI (1993), pretende-se obter para diversos pontos da barra envolvida pelo concreto, a partir dos resultados experimentais, a distribuição da tensão tangencial de aderência (τ_b) e do deslizamento da armadura (s) em relação ao concreto, ou seja, determinar a lei local $\tau_b \times s$, na interface aço-concreto em diferentes pontos da barra de aço.

São consideradas para este ensaio algumas hipóteses sobre os esforços solicitantes de aderência:

- a) os esforços transversais devidos ao envolvimento do concreto são desprezados;
- b) as ações sobre a armadura são reduzidas a uma tensão tangencial paralela ao eixo da barra.

Os modelos de tirantes utilizados são mostrados na figura 4.1. Na moldagem dos corpos de prova prismáticos, o concreto é lançado na direção normal ao eixo da barra e nos cilíndricos na direção paralela ao eixo da barra. No ensaio dos tirantes, as duas extremidades da barra de aço são tracionadas. O registro das deformações do aço são obtidos pela instrumentação das barras com extensômetros elétricos conforme a figura 4.2 de maneira a gerar dados para a modelização

da relação tensão de cisalhamento-deslizamento na interface aço-concreto.

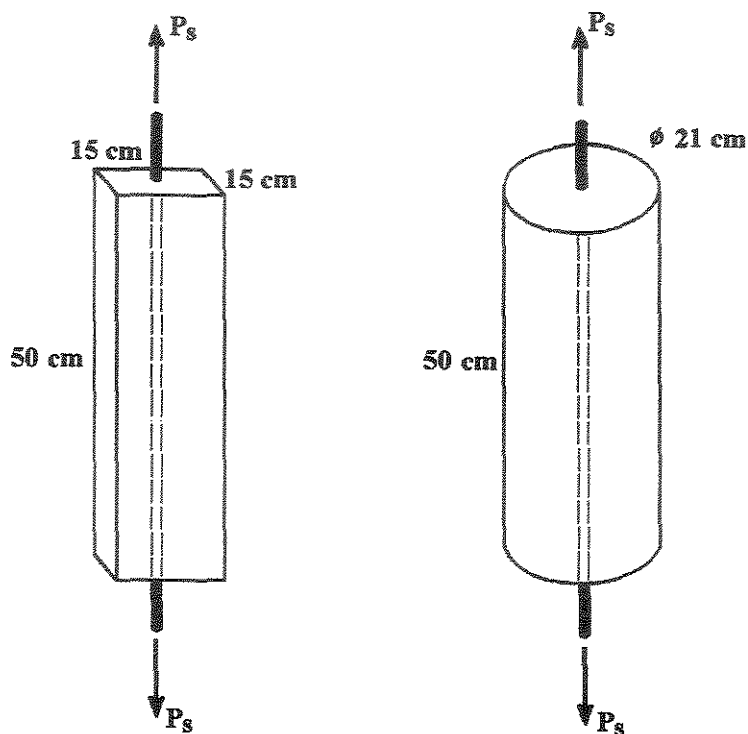


Figura 4.1 Modelo e dimensões de tirantes. DUCATTI (1993).

Este procedimento de ensaio, usado e desenvolvido por LORRAIN e KHÉLAFI (1989), foi utilizado no trabalho de tese desenvolvido por DUCATTI (1993); com o método dos tirantes, devido à limitação no desempenho das máquinas de ensaio utilizadas, somente a parte ascendente da curva tensão de aderência-deslizamento pôde ser obtida, fazendo-se exceção apenas para alguns dos tirantes e assim mesmo somente para o ponto F, na saída da barra de dentro do concreto (fig 4.2). Foi convencionado levar a aplicação de carga nos tirantes até que um dos extensômetros apresentasse problemas de funcionamento, presumindo que com esta carga se dá o início da fissuração do concreto. Este ponto é caracterizado pela tensão $\sigma_{s,máx}$ e pela deformação $\varepsilon_{s,máx}$ do aço (aço nu) utilizado, sendo que os tirantes ensaiados apresentaram coerência quanto a estes valores, significando que o concreto se alongou em um valor próximo deste antes de fissurar.

A tensão τ_b obtida por DUCATTI (1993) nos ensaios dos tirantes foi consideravelmente

menor que as obtidas nos ensaios ASTM C-234 devido ao confinamento provocado pelo atrito da mesa da prensa neste ensaio, o mesmo acontecendo no ensaio das quatro barras devido à presença das três barras perimetrais. Nesse raciocínio deve-se levar em conta que no ensaio dos tirantes as duas extremidades da barra são tracionadas o que proporciona um esforço de tração axial de distribuição mais uniforme. Essa uniformidade é facilitada ainda pelo não confinamento do concreto circunvizinho, o que evita a concentração da compressão das nervuras sobre o consoles de concreto que estão à sua frente impedindo o deslocamento e posterior esmagamento destes.

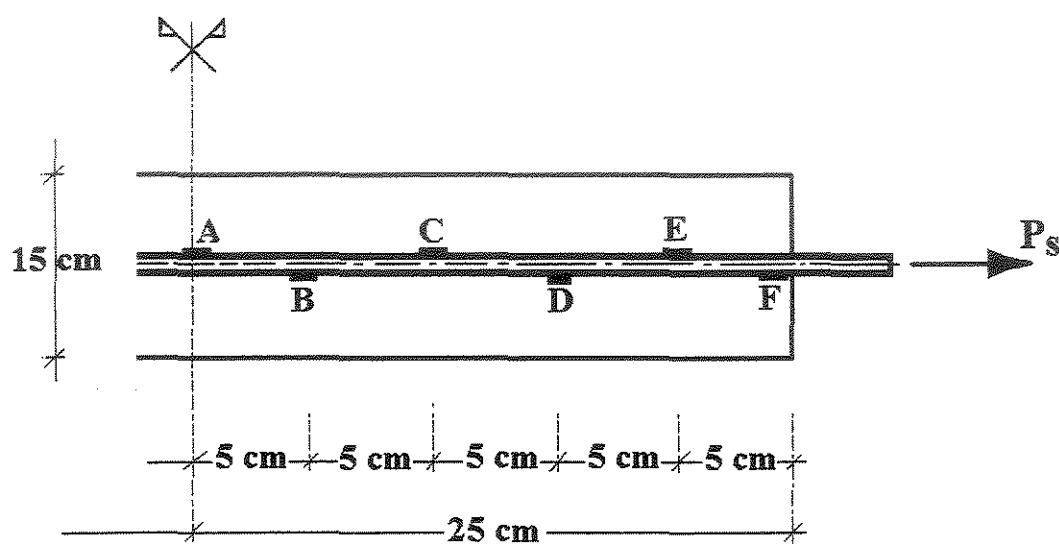


Figura 4.2 Esquema de instrumentação da barra no ensaio do tirante. DUCATTI (1993).

No ensaio dos tirantes, como no das quatro barras, existe grandes tensões de aderência suportada pelos trechos da barra próximos à sua saída do concreto, sendo a tensão de cisalhamento entre o aço e o concreto distribuída em uma pequena área da barra de aço. No ensaio dos tirantes a tensão de aderência apresenta valores menores devido à mecânica do ensaio que proporciona o tracionamento de toda a barra, se comparado com o ensaio das quatro barras, onde a barra central é tracionada por uma extremidade apenas.

O ensaio do tirante não apresenta o esmagamento da argamassa porosa situada em frente à face da nervura, como no ensaio ASTM C-234; o concreto envolvente se deforma com o aço até um certo limite, sofrendo em seguida fissuração transversal, sem apresentar fissuração

longitudinal que normalmente inicia o fendilhamento do concreto, sendo que o invólucro das barras, mostram todos os detalhes de impressão da nervura, sem nenhum vestígio de esmagamento da interface.

4.2 Ensaio de arrancamento ASTM C-234

Este método de ensaio abrange a comparação de desempenho entre concretos com base na aderência desenvolvida com a armadura, sendo utilizado por MONTEIRO (1985), MONTEIRO *et alii* (1985) e BÜRGE (1982) no estudo da aderência de concreto de alta resistência. Segundo DUCATTI (1993), valores de aderência obtidos através deste método não servem para propósito de projeto estrutural, sendo que as dimensões e os tipos de aço utilizados não são as variáveis mais importantes, afirmando ainda que o método é adaptável ao uso em pesquisa, variando-se as condições de acordo com os objetivos de cada estudo.

São necessários corpos de prova de dois tipos para a execução deste tipo de ensaio, um deles contendo uma barra de aço embutida verticalmente e outro contendo uma barra de aço embutida horizontalmente. As fôrmas metálicas para moldagem dos corpos de prova do ensaio ASTM C-234 dão uma idéia das dimensões e formato dos próprios corpos de provas, conforme mostra a figura 4.3 adaptada de DUCATTI (1993).

Os corpos de prova do primeiro tipo têm formato cúbico com 150 mm de aresta, com a barra posicionada verticalmente ao longo do eixo central da fôrma, passando 10 mm abaixo do fundo da mesma e com a extremidade superior de comprimento tal que permita atravessar os dispositivos de apoio ancorando-se nas garras da prensa. A direção da barra no arrancamento fica paralela à direção do lançamento do concreto durante a moldagem.

O molde para os corpos de prova do segundo tipo tem formato prismático, medindo 150 x 150 x 300 mm. O eixo maior do molde fica no momento da moldagem na posição vertical,

posicionando-se na posição horizontal duas barras de aço a 75 e a 225 mm em relação à base, ambas nas mesmas condições de comprimento dos corpos de prova tipo 1. O molde possui uma conformação que cria duas ranhuras paralelas ao eixo das barras e que criam um plano de enfraquecimento na peça moldada, cuja finalidade é promover aí, a ruptura à flexão do mesmo, facilitando a divisão do prisma em dois cubos distintos. Assim, cada um deles, um superior e outro inferior, pode passar pelo ensaio de arrancamento, permitindo que a direção da barra no arrancamento fique perpendicular à direção do lançamento do concreto durante a moldagem.

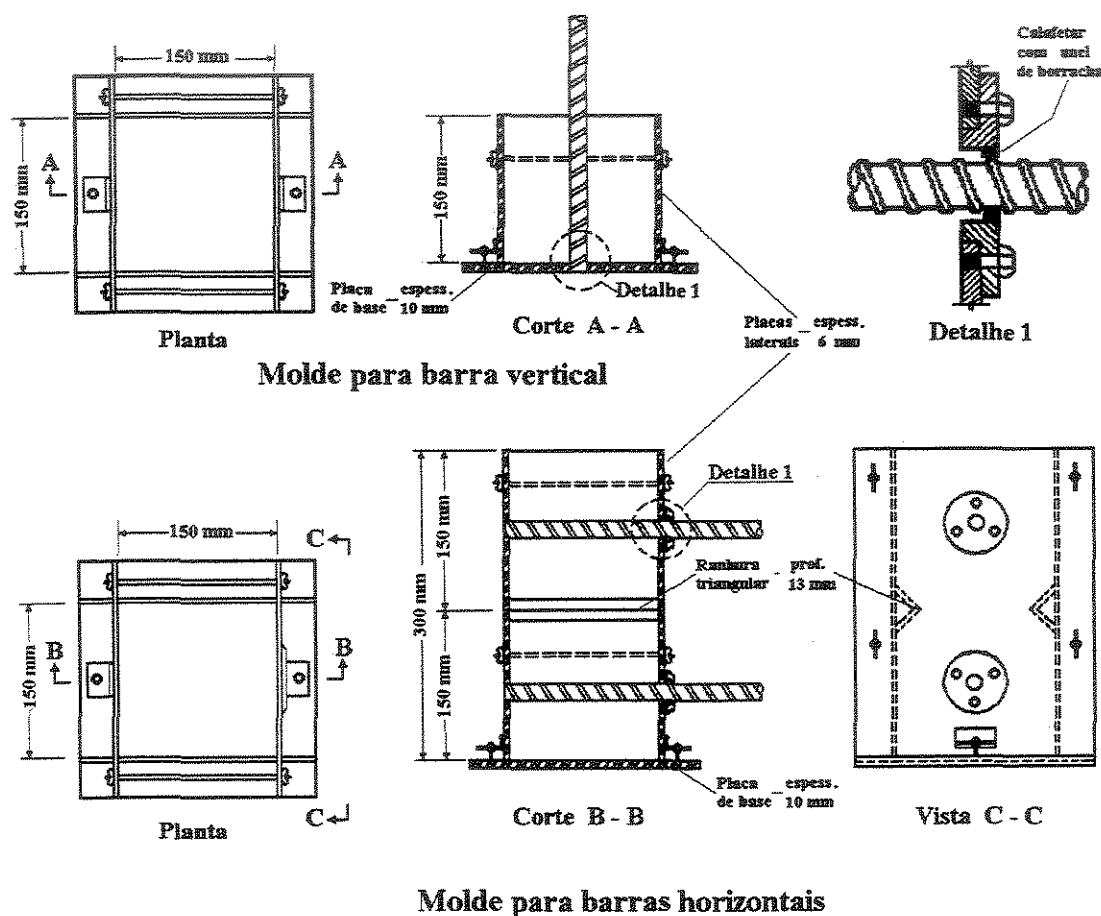


Figura 4.3 Fôrmas metálicas dos corpos de prova do ensaio ASTM C-234.

O ensaio de arrancamento é dado por encerrado quando em uma determinada faixa do carregamento ocorreu uma das seguintes alternativas:

- a) o aço entrou em escoamento;
- b) o concreto que envolve a barra rompe de forma brusca, em duas ou mais partes;
- c) ocorrência de um deslizamento entre o aço e o concreto de pelo menos 2,5 mm, medidos na extremidade carregada da barra.

A exsudação influi bastante na aderência.

No arrancamento das barras moldadas na posição vertical, deve ser considerado que o sentido de aplicação da força é o mesmo do lançamento do concreto durante a moldagem, fato que provoca o acúmulo de argamassa porosa em baixo das nervuras que comprimem o consolo de concreto no ensaio.

No arrancamento das barras moldadas na posição horizontal a exsudação provoca problema idêntico, com deficiência de aderência na metade inferior da superfície cilíndrica das barras.

A retração plástica do concreto também influi na aderência.

Como as barras estão rigidamente fixadas ao molde e não acompanham a sedimentação do concreto devido à retração plástica, fica prejudicado também o contato da metade inferior da superfície das mesmas com o concreto.

A tensão média de aderência (τ_{bm}) é calculada a partir das curvas tensão de aderência-deslizamento, como sendo a média correspondente aos deslizamentos centrados em 0,10 mm (0,06 – 0,08 – 0,10 – 0,12 – 0,14 mm).

As alterações na qualidade do concreto e nas características geométricas das barras provocam variação na aderência, que podem ser avaliadas através de comparações dos valores de τ_{bm} .

A tensão última de aderência ($\tau_{bm\acute{a}x}$), nos ensaios ASTM C-234, ocorre com a ruptura do concreto por fendilhamento.

No trabalho de DUCATTI (1993), as curvas tensão-aderência são traçadas até um nível de carregamento em que é provocado o escoamento do aço, devido à impossibilidade de se fazer leituras além desse ponto nos relógios comparadores utilizados. Contudo, os ensaios tiveram prosseguimento até a ruptura dos corpos de prova, sendo que os valores últimos registrados pela prensa dizem respeito à $\tau_{bm\acute{a}x}$.

No referido trabalho, os corpos de prova apresentaram o mesmo comportamento no estado último de perda de aderência entre o aço e o concreto, ou seja, a ruptura brusca do cubo de concreto em volta da barra de aço em três ou quatro partes, devido à ação de tensões radiais que se originam das saliências das barras quando estas são arrancadas do concreto. Neste caso, temos um exemplo de ruptura frágil, notando-se que na superfície das interfaces nos corpos de prova rompidos, a argamassa foi esmagada na posição à frente das nervuras e do lado da aplicação de carga.

Segundo BAZANT; SENER (1988) *in* DUCATTI (1993), existe duas características de arrancamento de armadura de dentro do concreto: a ruptura frágil, onde a carga decresce bruscamente após ter alcançado o ápice, e a ruptura dúctil, na qual a carga permanece constante sob a deformação crescente após ter alcançado o estado último.

Os resultados experimentais obtidos por DUCATTI (1993) no programa de ensaios ASTM C-234 levaram-no a adotar para o concreto de elevado desempenho as mesmas propriedades de aderência do concreto comum, para o caso de carregamento monotônico de curta duração ou carga mantida.

4.2.1 Influência na aderência devido à variação dos materiais utilizados

LORRAIN; KHÉLAFI (1988), estudando a aderência entre o concreto de alta resistência e a armadura, investigaram a influência da idade do concreto, do teor de microssilica, da relação água/aglomerante, da rugosidade do aço e do comprimento de aderência, chegando a algumas conclusões:

- a) a resistência última da ligação por aderência se correlaciona diretamente com a resistência mecânica do concreto;
- b) a resistência à aparição e à propagação da ruína da ligação por aderência resulta da resistência mecânica e da microestrutura do concreto circundante;
- c) os efeitos do teor de aglomerante, da relação a/c, do comprimento de aderência, da rugosidade da superfície da barra são benéficos, ao passo que a influência da dosagem de microssilica não permitiu interpretações nem conclusões satisfatórias.

GJORV; MONTEIRO e MEHTA (1990), utilizando-se do ensaio ASTM C-234, notaram um efeito crescente na resistência ao arrancamento na mesma medida em que se aumenta o teor de microssilica (0 a 16 %). O motivo disto são as mudanças ocorridas na morfologia e na microestrutura, com a redução da porosidade e da espessura da zona de transição entre a pasta de cimento e o aço. Isto se explica pelo menor acúmulo de água livre na interface durante a moldagem dos corpos de prova, a uma menor orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição, bem como a uma densificação desta com a reação pozolânica entre o Ca(OH)_2 e a microssilica.

BURGE (1982), utilizando-se também do método de ensaio ASTM C-234, estudando concretos com consumo de cimento mais microssilica na ordem de 450 kg/m^3 , ($a/c = 0,35$, $\text{SP/c+ms} = 0,03$ e $\text{ms/c} = 0$ a $0,40$) notou um crescimento com variação linear da tensão de aderência na medida em que ele substituiu parte do cimento por igual teor de microssilica.

Conforme BURGE, medindo a porosidade em pastas de cimento e microsilica, a aderência com a armadura aumenta numa razão similar à diminuição da porosidade.

DUCATTI (1993), no programa de sua tese, utilizando-se do ensaio de arrancamento ASTM C-234, procurou evidenciar as influências do volume de pasta, da posição das barras durante a moldagem e do teor de microsilica, no fenômeno da aderência. Fazendo uso de três consumos de cimento (400, 500 e 600 kg/m³), observa-se uma tendência à otimização do teor de microsilica em torno de 10 %, para o qual notam-se os maiores valores para as tensões máximas de aderência ($\tau_{bm\acute{x}}$); da mesma forma, à medida que a resistência do concreto cresce (f_{c28}), a influência da posição das barras (moldadas na posição vertical, horizontal superior e horizontal inferior) tende a desaparecer, notando-se convergência dos valores das tensões de aderência principalmente para teores de 10 % de microsilica. Conclui este pesquisador que o teor de 10 % de microsilica otimiza a resistência de aderência entre o aço e o concreto.

4.2.2 Influência na aderência devido a posição das barras durante a concretagem

REHM (1961) diz que o desempenho da aderência é melhor em barras moldadas verticalmente, quando a carga é aplicada na direção contrária da sedimentação do concreto no molde. Quando a carga é aplicada na mesma direção do lançamento do concreto, os valores de aderência podem ser mais baixos do que para barras moldadas horizontalmente na parte superior do molde. Este pesquisador explica que a queda de aderência nestes casos se dá pelo acúmulo de argamassa porosa em baixo das nervuras das barras verticais e na metade inferior das barras horizontais.

WELCH; PATTEN (1965) utilizando o ensaio ASTM C-234, estudando o arrancamento de barras horizontais de topo, tanto para lisas como para nervuradas, verificaram a influência da exsudação e do assentamento, características da sedimentação do concreto. Foi observado, como

tendência geral, que o crescente assentamento do concreto leva à uma redução na aderência, mesmo com pequenas camadas de concreto plástico abaixo das barras.

JIRSA et al (1982) relacionaram que quanto maior o abatimento do concreto plástico menor é a capacidade de aderência, fato que se acentua quanto maior for também a altura da camada; entretanto o CEB (1982) considera estes resultados discutíveis.

HAYAKAWA; ITOH (1982) afirmaram que a depender da ordem de colocação dos materiais na mistura e dos tempos parciais de mistura haverá diminuição da exsudação e do teor de ar incorporado nas pastas, argamassas e concretos. Afirmam ainda que o concreto SEC (Sand Enveloped with Cement), apresenta alto desempenho na aderência e na compressão para os diversos níveis da concretagem vertical.

CARRASQUILLO (1988), trabalhando com o ensaio de arrancamento e concreto pré misturado, estudou a influência dos tipos de superplastificantes e do abatimento antes e depois da adição, bem como da camada de concreto superplastificado debaixo das barras, não tendo notado diferença na resistência ao arrancamento dos concretos com ou sem aditivos.

As experiências acima foram realizadas utilizando concretos normais, de resistência abaixo de 40 MPa.

MONTEIRO (1985) verificou o efeito do posicionamento das barras durante a concretagem sobre a aderência, utilizando o ensaio ASTM C-234 em concretos de resistência variável com três teores diferentes microssilica, verificou a tendência das barras horizontais superiores apresentarem uma menor resistência ao arrancamento, fato que foi atribuído ao fenômeno da exsudação, mesmo em se tratando de concretos ricos em finos.

DUCATTI (1993), utilizando também o ensaio ASTM C-234, percebeu uma maior aderência para as barras horizontais concretadas na posição inferior do que na posição superior; no mesmo trabalho nota-se que a pior condição de aderência são para barras concretadas na posição vertical, pois para estas o sentido das forças de arrancamento e o de sedimentação do

concreto nos moldes é o mesmo. Este pesquisador notou que, para deslizamentos da ordem de 0,1 mm, as tensões de aderência correspondentes tendem a se igualar para os três tipos de barras, para concretos de resistência à compressão em torno de 80 MPa. Foi observado ainda que as diferenças entre as tensões de aderência para os três tipos de barras no concreto de alta resistência por ele utilizado são pequenas se comparadas às relativas aos concretos de resistência normal utilizado por REHM (1961).

4.2.3 Influência na aderência devido à resistência à tração do concreto

Segundo DUCATTI (1993), no caso da ruptura por fendilhamento de concretos normais com resistência à compressão de até 40 MPa, a resistência à tração do concreto seria o fator determinante do estado último de carregamento na ancoragem da armadura.

A tração no concreto é gerada, após o aparecimento das primeiras fissuras de aderência, pela componente radial da tensão de aderência $\tau \cdot \tan \alpha$, que é perpendicular ao eixo da barra e carrega o concreto com uma pressão interna que induz um arco de tensões de tração que causam as fissuras de cisalhamento ao longo da barra tracionada. O modelo de Goto (1971), conforme figura 4.4 adaptada de Fusco (1995) e DUCATTI (1993), mostra as forças entre a barra nervurada e o concreto.

A ruptura ocorre quando essas tensões atingem valores maiores ou iguais à resistência de tração do concreto.

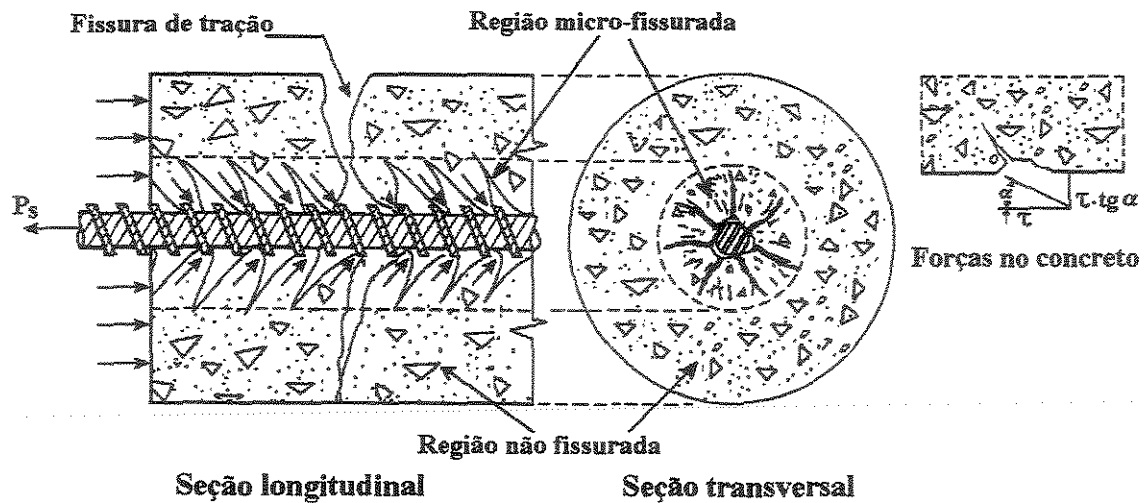


Figura 4.4 Modelo de Goto (1971), que mostra as forças entre a barra nervurada e o concreto; adap. de DUCATTI (1993), e FUSCO (1995).

O relatório sobre o estado da arte do concreto de alta resistência do CEB (1982) *in* DUCATTI (1993) indica que, sob carga de tração, acontece uma certa plastificação ou “amaciamento” do concreto, caracterizado pela não linearidade da relação carga-deformação, efeito causado pela formação de microfissuras. Daí, TEPFERS (1979), (1980) criou a sua teoria dos anéis de tração na zona de ancoragem das armaduras, levando em consideração a capacidade do concreto de redistribuir tensões de tração de zonas altamente tensionadas para as zonas menos tensionadas através da progressiva plastificação por microfissuração.

Seguido da formação das fissuras internas transversais provocadas pela aderência, a direção da tensão τ entre o concreto e a barra da armadura tracionada forma um ângulo α com o eixo da barra (vide figura 4.4). Pelo modelo de TEPFERS, a componente radial desta tensão, $\tau_{br} = \tau \cdot \tan \alpha$, atua como se fosse uma pressão hidráulica interna sobre a parede espessa de um cilindro de concreto, sendo que a espessura deste anel de concreto corresponde à menor dimensão possível da camada de concreto em volta da barra, caracterizado pelo cobrimento de concreto nas peças de concreto armado. TEPFERS mostra três alternativas para analisar a distribuição das tensões do concreto nesta região da peça de concreto armado, com o intuito de determinar a resistência à fissuração do cobrimento de concreto na zona de ancoragem da armadura, conforme

ilustrado na figura 4.5 adaptada de DUCATTI (1993).

Pode-se fazer uma comparação da ação da aderência nos três estágios, considerando que o critério para a ocorrência da carga última no anel de concreto circundante obedece o exposto a seguir.

a) Estágio elástico não fissurado

O pico máximo da tensão de tração tangencial no concreto em torno da barra de arrancamento $\sigma_{\text{máx}}$ excede a tensão última de tração (resistência à tração) para o concreto f_t . O estágio elástico dá a carga referente ao início da fissuração, a partir da superfície de aderência entre o concreto e a barra da armadura.

b) Estágio elástico parcialmente fissurado

O pico máximo da tensão de tração tangencial no concreto, em torno da barra de arrancamento $\sigma_{\text{máx}}$, excede a tensão última de tração (resistência à tração) para o concreto f_t quando a capacidade de suporte de força de aderência do anel de concreto não fissurado é exaurida. O estágio elástico parcialmente fissurado dá a carga de quando a fissura longitudinal atravessa completamente o cobrimento de concreto; a carga última pode ser um pouco maior quando a fissura longitudinal atravessa o concreto, considerando que o concreto tem alguma deformação plástica.

c) Estágio plástico

A tensão de tração tangencial do concreto, uniformemente distribuída por todo o cobrimento de concreto excede a tensão última de tração para o concreto f_t .

A comparação da aderência nos três estágios é feita considerando que o ângulo α entre o eixo da barra e as forças de aderência seja o mesmo, e igual a 45° .

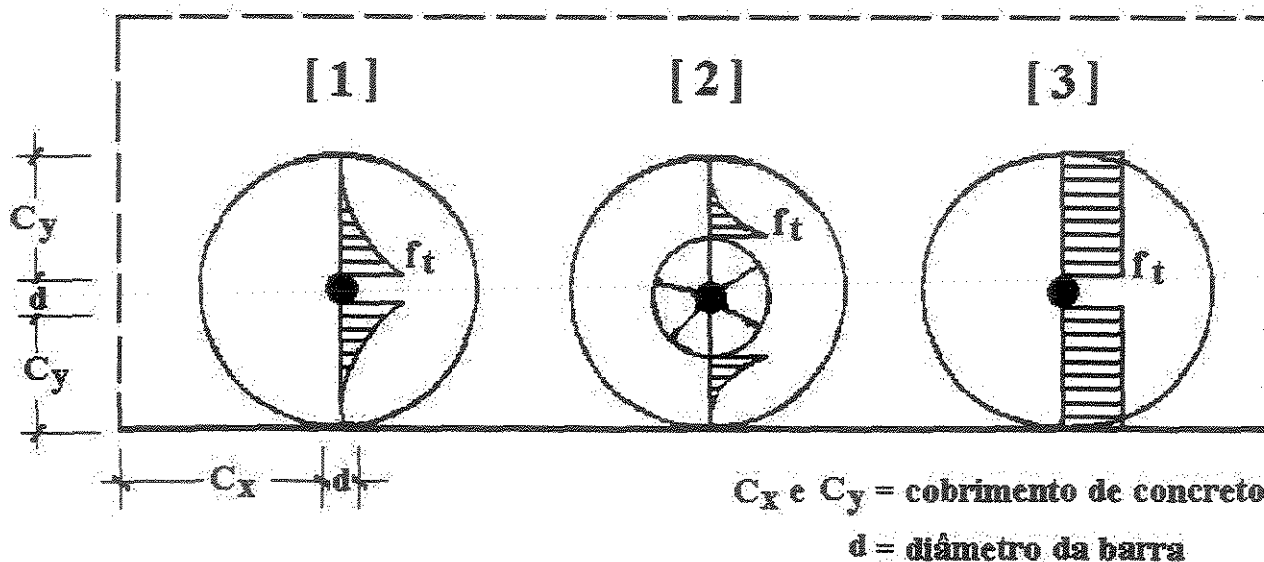


Figura 4.5 Estágios elástico [1], elástico parcialmente fissurado [2] e plástico [3].
TEPFERS (1980); adap. de DUCATTI (1993).

Os valores da teoria do anel de TEPFERS, utilizados na comparação dos resultados dos ensaios de arrancamento de TEPFERS (1979), TILANTERA; RECHARDT apud CEB (1982) e de URBAN (1980) apud CEB (1982), quando lançada graficamente, a relação entre a tensão de aderência e a resistência à tração do concreto f_{bo}/f_t contra a relação entre a espessura do cobrimento de concreto e o diâmetro das barras c_y/d , mostra que os valores experimentais estão agrupados entre os estágios elástico parcialmente fissurado e o plástico.

O gráfico da figura 4.6, de TEPFERS (1979), adaptado de DUCATTI (1993), mostra o efeito da espessura de concreto na capacidade de aderência, medido em corpos de prova de ensaio de arrancamento, por ocasião da fissuração longitudinal do cobrimento de concreto.

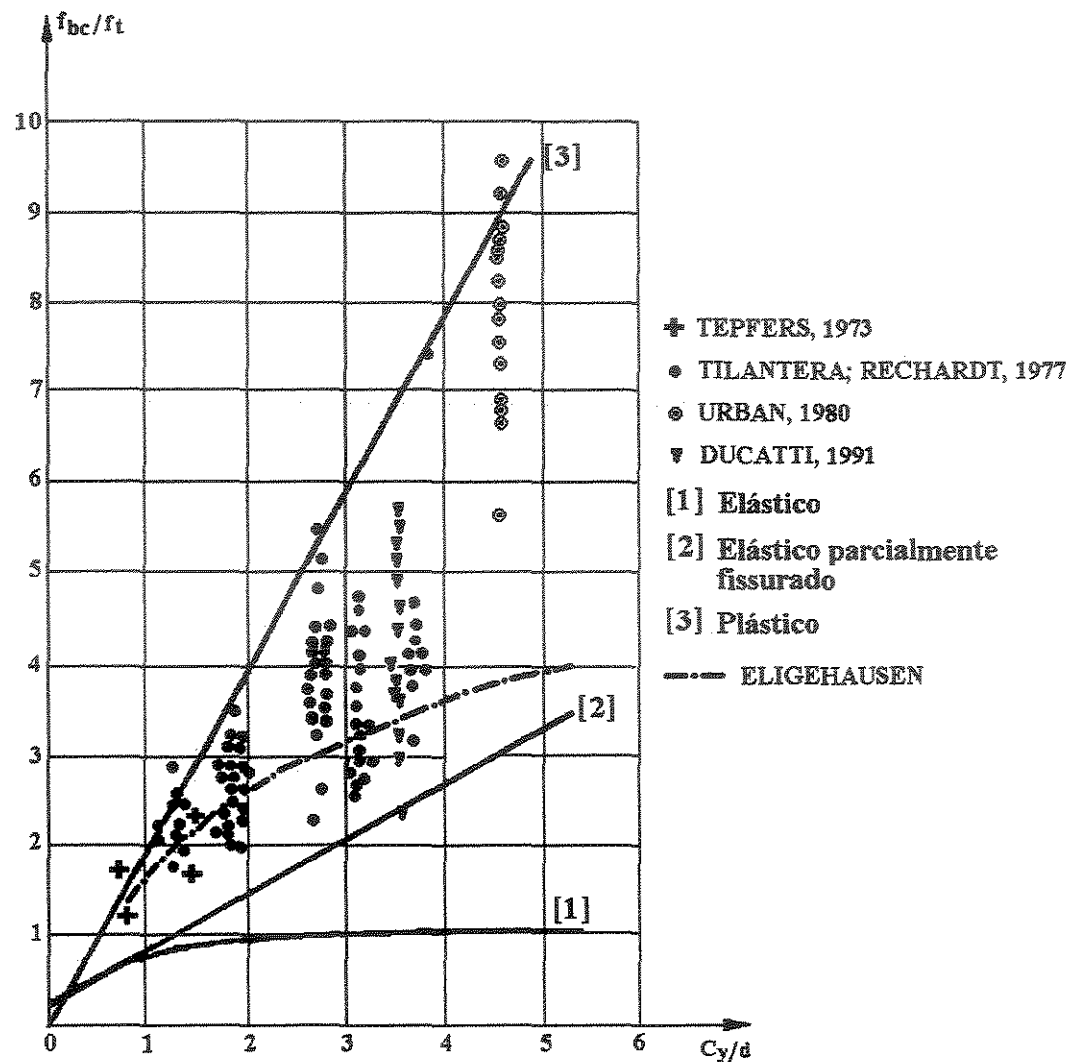


Figura 4.6 Efeito da espessura de concreto na capacidade de aderência; adap.de DUCATTI (1993).

Para o concreto convencional, para baixos valores de c_y/d , os resultados se situam próximos da linha do estágio plástico; para valores crescentes de c_y/d os resultados se aproximam do estágio elástico parcialmente fissurado.

Para o concreto de elevado desempenho, no trabalho de DUCATTI (1991), para uma relação c_y/d igual a 3,45, o valor médio da relação entre a tensão de aderência e a resistência à tração do concreto f_{bc}/f_t é igual a 4,30, situando-se acima da mediana entre o ângulo formado pelas linhas do estágio elástico parcialmente fissurado e o plástico.

DUCATTI (1993) utilizando o ensaio ASTM C-234, na realização do seu trabalho de tese encontrou valores que se agrupam na região compreendida pelos limites fixados pelos estágios de fissuração, ressaltando que utilizou comprimento de aderência grande, cobrimento exagerado e confinamento do concreto provocado pelo apoio do corpo de prova durante o ensaio.

Os resultados de DUCATTI também estão apresentados no gráfico da figura 4.6.

4.2.4 Influência na aderência devido à resistência à compressão do concreto

Segundo DUCATTI (1993), a resistência à compressão do concreto tem a sua importância no sentido de suportar as tensões concentradas geradas nas nervuras do aço, devendo ser levado em consideração que a resistência à tração do concreto limita a sua resistência à compressão num campo multi-dimensional de tensão. Quando a ruptura é causada pelo início das fissuras de cisalhamento nos consolos de concreto (figura 4.4) a resistência de aderência é proporcional à resistência média de compressão do concreto elevada a um coeficiente que depende do campo triaxial de tensões em torno da barra de arrancamento (f_{cm}^{ζ} com ζ variado entre 0,5 e 1,0).

EZELDIN e BALAGURU (1989) trabalhando com concretos de resistência normal e de alta resistência reforçado com fibras notaram que a presença de microsilica melhorou a resistência de aderência que se conservou ainda proporcional a $f_c^{0,5}$; o valor médio do coeficiente obtido por DUCATTI (1993), com concretos de resistência entre 50 e 90 MPa foi acima do valor obtido para concretos correntes.

Segundo DUCATTI (1993), a ruptura causada por forças de fendilhamento pode ser atrasada se houver forças de compressão atuando transversalmente à armadura ancorada, sendo que essas forças são somadas àquelas de tração, de mesma direção, e se compensam entre si. Diz ainda este pesquisador que essas forças aumentam também a resistência máxima de aderência,

ou seja, aumentam a tensão de arrancamento.

Segundo SOROUSHIAN et al (1991), a resistência última de aderência aumenta quase que proporcionalmente com a raiz quadrada da resistência à compressão, fato que é confirmado por DUCATTI (1993), de acordo com os dados obtidos para tensão de aderência média τ_{bm} e tensão de aderência máxima (tensão de fendilhamento) τ_{bmax} , como ilustra as figuras 4.7 [1] e 4.7 [2].

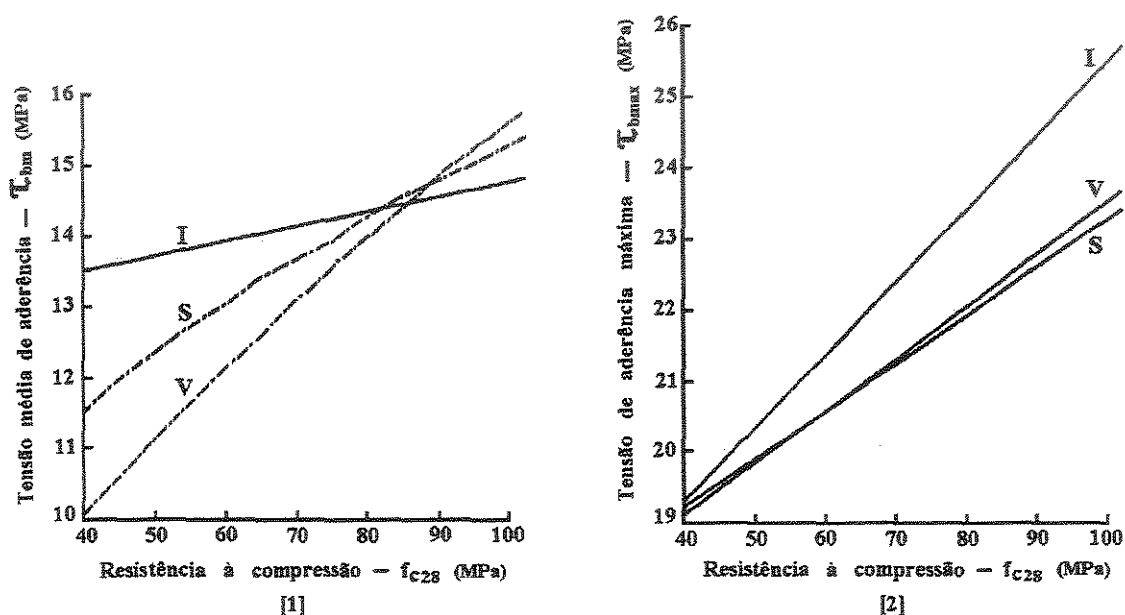


Figura 4.7 Influência da resistência à compressão na aderência; adap de DUCATTI (1993).

Os valores obtidos para tensão de aderência média τ_{bm} , relativo aos concretos de resistência à compressão entre 80 e 90 MPa, caracterizam o completo anulamento do efeito de posicionamento das barras em relação à direção do lançamento do concreto nos moldes.

Em relação à tensão de aderência máxima τ_{bmax} , percebe-se um melhor desempenho das barras moldadas na posição horizontal inferior (I), em relação às superiores (S) e às moldadas verticalmente (V). DUCATTI afirma que o diagrama obtido nesta condição representa o estágio

de carregamento após a ocorrência da tensão de escoamento do aço ($f_y = 605$ MPa, correspondente a $\tau_{bmax} \cong 19,2$ MPa, aço CA 50 A, $\phi = 19$ mm), concluindo que o ensaio por ele utilizado, ASTM C-234, com barra de aço de 19 mm e corpo de prova cúbico de aresta igual a 15 cm, tem a sua aplicação limitada a concretos de resistência à compressão de até 40 MPa.

DUCATTI aponta alguns fatores perturbadores do ensaio de arrancamento por ele utilizado, sendo o primeiro o comprimento excessivo de aderência da barra em relação a outros ensaios de arrancamento utilizados para se determinar curvas de aderência, dizendo que normalmente esta dimensão deve ser menor que 5ϕ , para que se considere a distribuição de tensão de cisalhamento no perímetro da barra ancorada, como sendo uniforme. O segundo fator é o atrito da base de apoio do corpo de prova com o prato da prensa, que provoca o confinamento do concreto circundante à barra, podendo se considerar, no caso do ensaio ASTM C-234, o concreto confinado para efeito de modelar a curva de tensão de aderência em função do deslizamento.

Conforme ISA (1997), uma das restrições ao ensaio é decorrente da reação da placa de apoio da máquina de ensaios, através do impedimento à deformação transversal e da compressão por efeito de arco, que acarretam um aumento na compressão transversal sobre a barra, provocando uma aderência por atrito adicional, conforme é ilustrado na figura 4.8 [2] de LEONHARDT e MÖNNING (1977). É dito ainda que esse efeito inibe o fendilhamento, justificando o comentário de que os ensaios de arrancamento superestimam os valores de aderência.

Conforme mostra a figura 4.8 [1] de LEONHARDT e MÖNNING (1977), a força de tração P responsável pelo arrancamento é aplicada diretamente sobre a barra, que tem as duas extremidades projetadas para fora do corpo de prova. Mede-se a força aplicada em um dos extremos enquanto no outro mede-se o deslizamento.

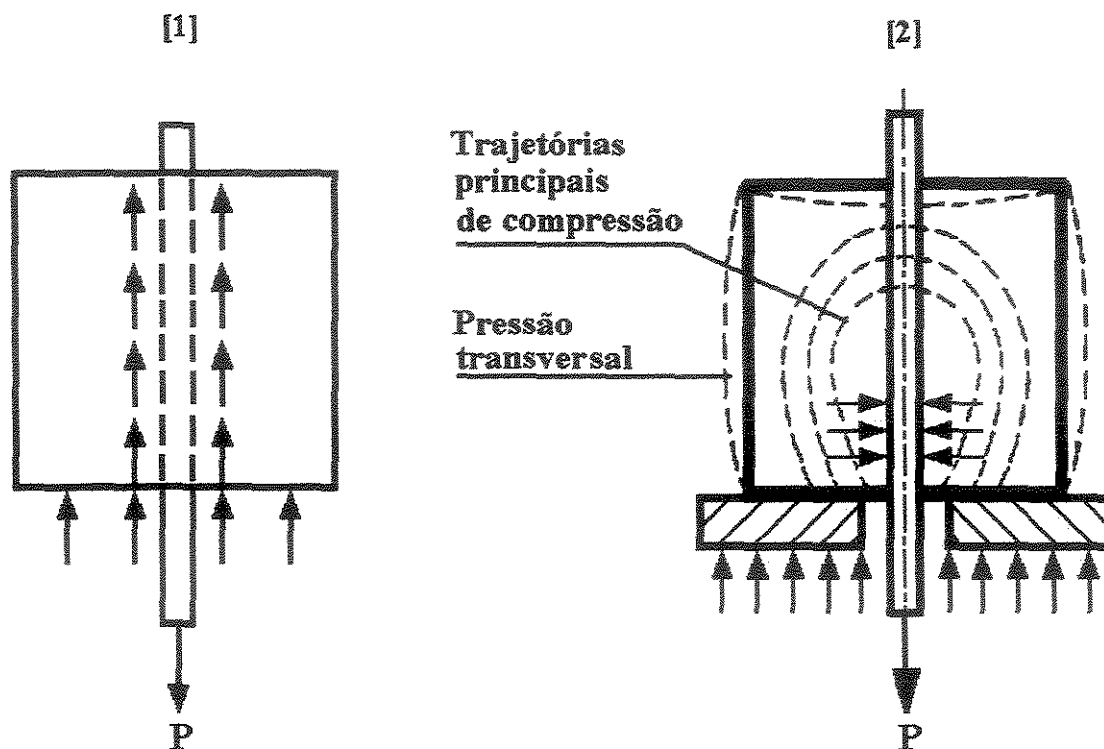


Figura 4.8 Esquemas, da execução do ensaio de tração (4.8 [1]), e da compressão transversal e compressão por efeito de arco (4.8 [2]). LEONHARDT e MÖNNING (1977).

REHM (1986), citado em ISA (1997), com a finalidade de eliminar os fatores que acarretam a aderência por atrito, tornou o comprimento de aderência o menor possível, ou seja, com a mesma dimensão do diâmetro da barra, como ilustrado na figura 4.9.

No ensaio proposto por REHM, embora a diminuição do comprimento aderente minimizasse o efeito parasita, o ensaio apresentava uma grande dispersão de resultados devido a eventuais falhas na região ancorada da barra.

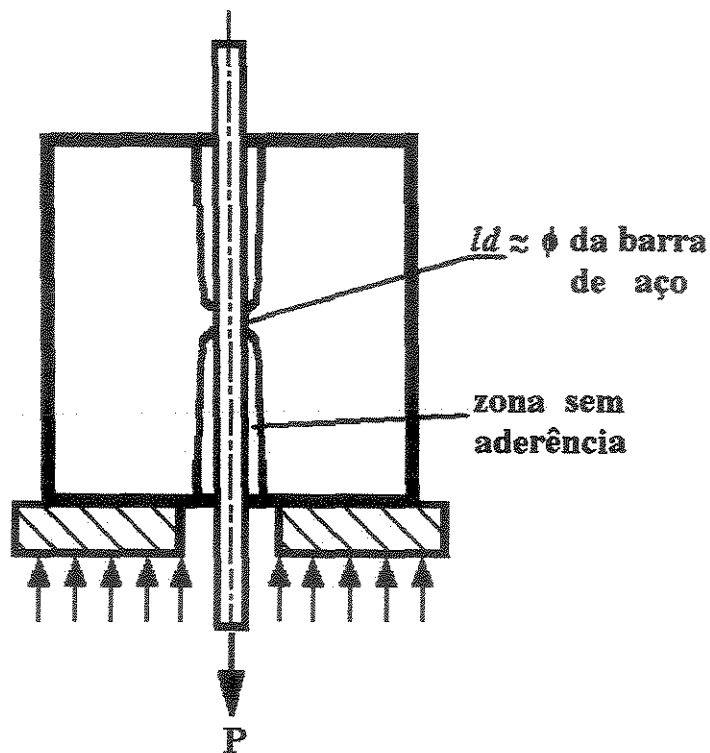


Figura 4.9 Ensaio de arrancamento proposto por REHM (1986).

4.3 Ensaio das quatro barras

É um ensaio de arrancamento do aço no concreto, onde a barra central, situada em um dos lados do corpo de prova, é tracionada enquanto o mesmo é mantido imóvel pela força reativa distribuída pelas outras três barras situadas no lado oposto e dispostas no vértice de um triângulo imaginário, conforme a figura 4.10 adaptada de DUCATTI (1993). Este ensaio foi concebido com o intuito de se eliminar a interferência da força de compressão provocada pelo confinamento do concreto, como é no caso do ensaio ASTM C-234.

Neste tipo de ensaio, busca-se obter a curva da tensão de aderência em função do deslizamento, permitindo comparar os valores deste ensaio com aqueles em que há o confinamento do concreto, levando em consideração fatores de influência como distância da

barra central, que será arrancada, em relação àquelas que servem de suporte ao corpo de prova, bem como os diâmetros das barras envolvidas que estão relacionadas com a área de influência das mesmas e, por último, da resistência do concreto.

O ensaio é feito utilizando-se corpos de prova cilíndricos, de 210 e 300 mm de diâmetro, onde a altura é fixada pelo comprimento de aderência das barras utilizadas, restrito à abertura entre as mesas da máquina de tração usada no ensaio. As três barras perimetrais, são fixadas através de porcas em um disco de 400 mm de diâmetro e 40 mm de espessura que funciona como um vínculo de transição, transferindo os esforços que recebe das três barras para um parafuso rosqueado de 60 mm de diâmetro que por sua vez descarrega a tensão na mesa superior da máquina de ensaio. Qualquer possível desnivelamento ou excentricidade que haja nas barras tracionadas é compensado por bolachas cilíndricas de aço, uma côncava e outra convexa, ajustadas e lubrificadas, situadas entre o disco e as porcas rosqueadas das três barras. As barras são mantidas fixas durante a moldagem, através de gabarito com orifícios, onde se posicionam verticalmente as quatro barras.

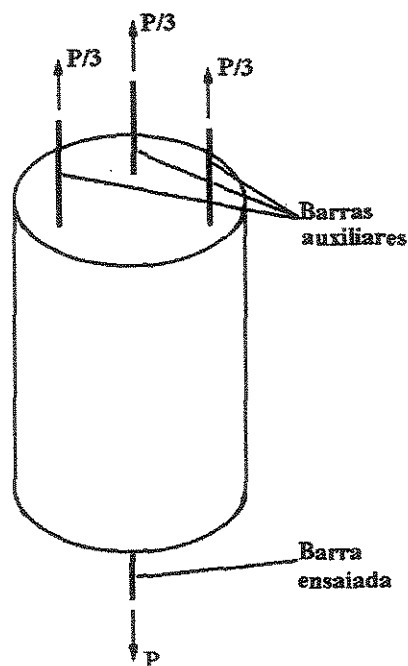


Figura 4.10 Esquema do corpo de prova do ensaio das quatro barras. DUCATTI (1993).

A medida do deslocamento relativo entre o aço e o concreto é feito de modo similar ao do ensaio ASTM C-234; numa cinta de aço fixada no corpo de prova são assentadas bases magnéticas para o posicionamento diametralmente oposto de dois relógios comparadores cujas hastes de medida são apoiadas em uma barra transversal fixada na barra a ser arrancada. A medida dos deslocamentos da barra central são executadas através de extensômetros elétricos colados ao longo do seu comprimento, conforme um dos exemplos possíveis, de acordo com a figura 4.11 adaptada de DUCATTI (1993).

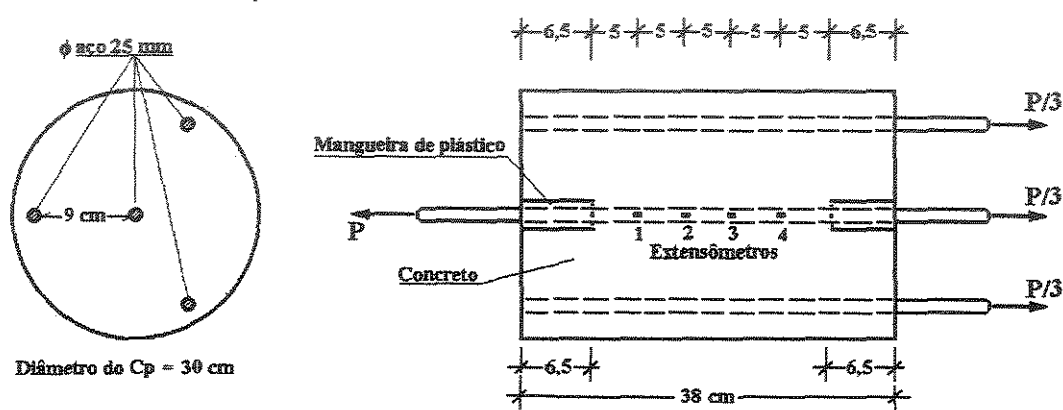


Figura 4. 11 Posicionamento dos extensômetros no ensaio realizado por DUCATTI (1993).

DUCATTI (1993) moldou corpos de prova de várias dimensões utilizando barras de ϕ igual a 25, 19 e 12,5 mm, variando as dimensões dos corpos de prova, a distância entre as barras e o comprimento de aderência. Foi visada a obtenção de concretos com resistências de 40 e 80 MPa. Os corpos de prova foram curados em água até a véspera do ensaio, quando foram pintados de branco para melhor visualização de fissuras. O ensaio foi realizado com incremento de carga de 10 kN para barras de 25 mm e de 5 kN para barras de 19 e 12,5 mm. Entre um incremento e outro, a aplicação de carga foi paralisada, mantendo-se a tensão com a finalidade de fazer o registro das deformações; marca-se também no concreto as fissuras observadas.

Todos os corpos de prova foram concretados de maneira que a barra central a ser arrancada permanecesse paralela à direção do lançamento do concreto, o que provoca o acúmulo de argamassa porosa embaixo das nervuras, prejudicando a aderência. O deslizamento é medido na extremidade carregada da barra central. A grande maioria dos corpos de prova tiveram o concreto rompido segundo os três planos verticais que contém a barra central e uma das barras periféricas. Alguns modelos apresentaram o perfeito arrancamento da barra central, deixando intacto o concreto circundante e um invólucro perfeito onde a mesma estava alojada, sendo que os espaços entre as nervuras saíram completamente cheios de pasta, caracterizando um cisalhamento perfeito do material na interface aço-concreto.

Muitos extensômetros elétricos foram danificados durante a concretagem, o que prejudicou parte do trabalho de obtenção da curva da tensão de aderência τ_b em função do deslizamento entre o aço e o concreto, conforme o método de LORRAIN e KHÉLAFI (1989) adotado por DUCATTI (1993).

DUCATTI notou que a tensão de aderência, calculada através da medida mecânica do deslocamento da barra central a partir da extremidade carregada, é menor que a tensão medida através da instrumentação, para um mesmo valor de deslizamento. Isso devido ao fato de que neste caso a tensão de cisalhamento τ_b é estimada pela divisão da carga de tração aplicada na barra, por toda a área de envolvimento desta pelo concreto, relativa a um comprimento de aderência de 10ϕ utilizado em seu trabalho, e, em contrapartida, a tensão calculada através da instrumentação é relativa a pequenos trechos entre os pontos de aplicação dos extensômetros.

No seu trabalho, DUCATTI (1993) mediu a rigidez da ligação aço-concreto na aderência, através do módulo de deslizamento, que é calculado como o módulo de elasticidade, tangente ou secante, a partir da curva tensão-deformação, conforme fez TEPFERS (1979) que trabalhou com concreto de resistência de até 50 MPa.

4.3.1 Influência na aderência devido a resistência à compressão do concreto

A influência da resistência à compressão na aderência pode ser notada observando-se as inclinações das curvas correspondentes às duas classes de resistência estudadas por DUCATTI; o concreto de maior resistência tem uma curva mais ajustada à equação do tipo potência $\tau_b = A.s^\alpha$, o de menor resistência apresenta essa relação mais próxima da linear e curva de menor coeficiente angular. O caso se explica pelo fato do concreto de alta resistência possuir microestrutura menos porosa devido à presença da microssilica e do baixo fator água/aglomerante conseguido com o uso de superplastificante (0,287 contra 0,420 para o concreto menos resistente, sendo que para os dois concretos, foram utilizados o mesmo consumo de material aglomerante de 460 kg/m³).

DUCATTI destaca a utilidade prática e a importância do módulo de deslizamento, não só na medida do desempenho da aderência aço-concreto como também no cálculo de tensões e abertura de fissuras na ancoragem da armadura escalonada, no cálculo de emendas por transpasse e ancoragem das armaduras.

Para os modelos ensaiados apresentados, nas curvas de aderência da figura 4.12, adaptadas de DUCATTI (1993), estão os seguintes valores para o módulo secante, correspondentes ao deslizamento de 0,1 mm:

Modelo T9/S $f_{cm} = 88,0 \text{ MPa}$ $K_{s0,1} \cong 132 \text{ MPa/mm}$

Modelo T9 $f_{cm} = 46,5 \text{ MPa}$ $K_{s0,1} \cong 61 \text{ MPa/mm}$

Modelo U9/S $f_{cm} = 89,2 \text{ MPa}$ $K_{s0,1} \cong 111 \text{ MPa/mm}$

Modelo U9 $f_{cm} = 48,7 \text{ MPa}$ $K_{s0,1} \cong 50 \text{ MPa/mm}$

Nota-se coerência nos valores acima, na medida em que se dobra o valor da resistência, dobra-se também o valor do módulo.

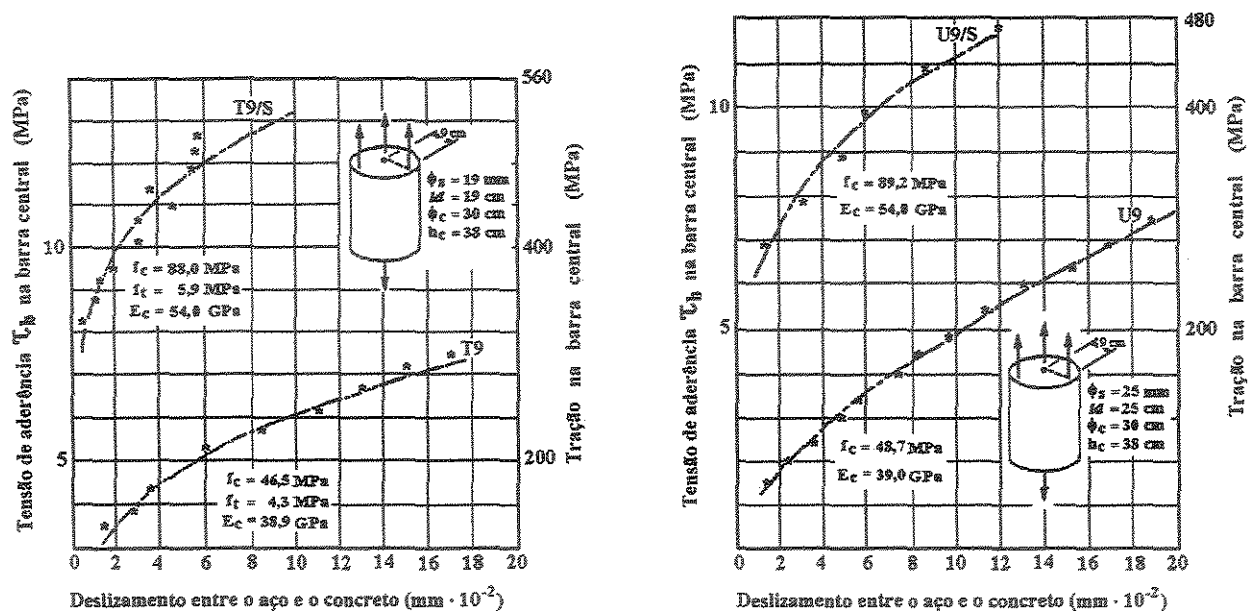


Figura 4.12 Curvas de aderência para os modelos T9, T9/S, U9 e U9/S. DUCATTI (1993).

TEPFERS (1979) obteve módulos secantes para o mesmo valor de deslizamento (0,1 mm) entre 50 e 200 MPa/mm para concreto de resistência à compressão de 25 MPa e entre 100 e 500 MPa/mm para concretos da ordem de 50 MPa de resistência à compressão; a diferença dos valores em comparação com os obtidos por DUCATTI (1993) se explicam pelas diferenças no comprimento de aderência e no diâmetro das barras utilizadas pelos dois pesquisadores. TEPFERS utilizou comprimento de aderência de 50 mm e barras nervuradas de $\phi = 12 \text{ mm}$, DUCATTI comprimento de aderência igual a 10ϕ e barras de 25, 19 e 12,5 mm.

4.3.2 Influência na aderência devido ao diâmetro das barras

Tanto para o concreto comum como para o CED, observa-se uma maior aderência aço-concreto para barras de diâmetro menor conforme o gráfico da figura 4.13, obtido por DUCATTI (1993) para os modelos T9 com barra central de 19 mm, comparando com os modelos U9 com barra central de 25 mm.

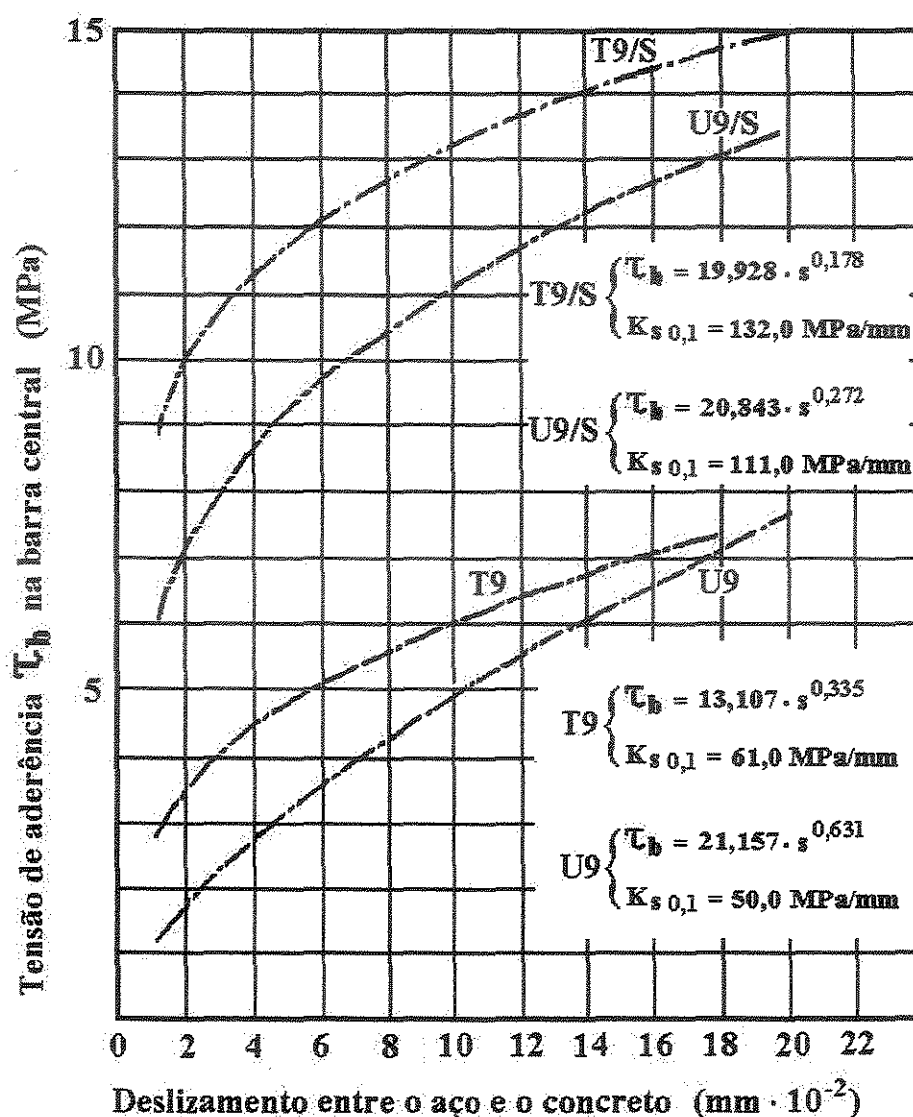


Figura 4.13 Comparação entre curvas de aderência; adap. de DUCATTI (1993).

SOROUSHAN; CHOI (1989) observaram uma queda linear na tensão última de aderência em função do aumento do diâmetro das barras em ensaios de arrancamento quando utilizaram barras nervuradas e concreto confinado. O maior volume de material poroso na interface concreto-aço para barras de maior diâmetro parece ser a explicação para este fato.

O modelo de TEPFERS (1979) leva em consideração, no estágio plástico fissurado, a seguinte equação:

$$f_{bc} = f_t \cdot \frac{2 \cdot c_y}{d} \quad (4.1)$$

f_{bc} = tensão de aderência quando o cobrimento fissura;

d = diâmetro da barra da armadura;

c_y = espessura de cobrimento do concreto;

f_t = resistência à tração do concreto.

Portanto, pela equação pode-se se justificar uma maior tensão de aderência para barras de diâmetro menor. Contando com as nervuras as barras de DUCATTI (1993) passam de um diâmetro de 19 para 22 mm e de 25 para 27 mm, valores que aplicados na equação de TEPFERS dão 20 % a mais de tensão de aderência para as barras de 19 mm (modelos T) do que para as barras de 25mm (modelos U).

ISA (1997) cita que há necessidade de se admitir as limitações dos ensaios de arrancamento, pois o momento fletor e o esforço cortante, que podem influir nos resultados, estão ausentes nesta metodologia; em função dessas limitações este tipo de ensaio tem sido utilizado em pesquisas apenas para o estudo de parâmetros no comportamento da aderência, como a área nervurada relativa, características do traço e materiais constituintes do concreto, direção de concretagem, carregamento monotônico ou cíclico de curta duração, de longa duração e comprimento aderente da armadura.

4.4 Ensaios de flexão

Os ensaios de flexão, normalmente, utilizam-se de uma barra de aço moldada em uma viga de concreto, e por isso mesmo são comumente chamados de ensaios tipo viga. O objetivo é o de avaliar o comportamento da ligação aço-concreto.

ISA (1997) faz referência a SILVA (1986), que por sua vez cita um ensaio de flexão

proposto pela Universidade do Texas em 1908, conforme a figura 4.14, onde uma viga isostática de concreto, com um dos apoios afastado do seu extremo para que um trecho ficasse em balanço, continha uma barra no centro de sua seção transversal, com o comprimento aderente na região de momento negativo. Isto proporcionava que, quando submetida a duas cargas concentradas, apresentasse um dos seus extremos ancorados exatamente no ponto de momento fletor nulo, tendo como consequência uma força de tração nula atuante na barra, já que no outro extremo da barra a força de tração também é nula.

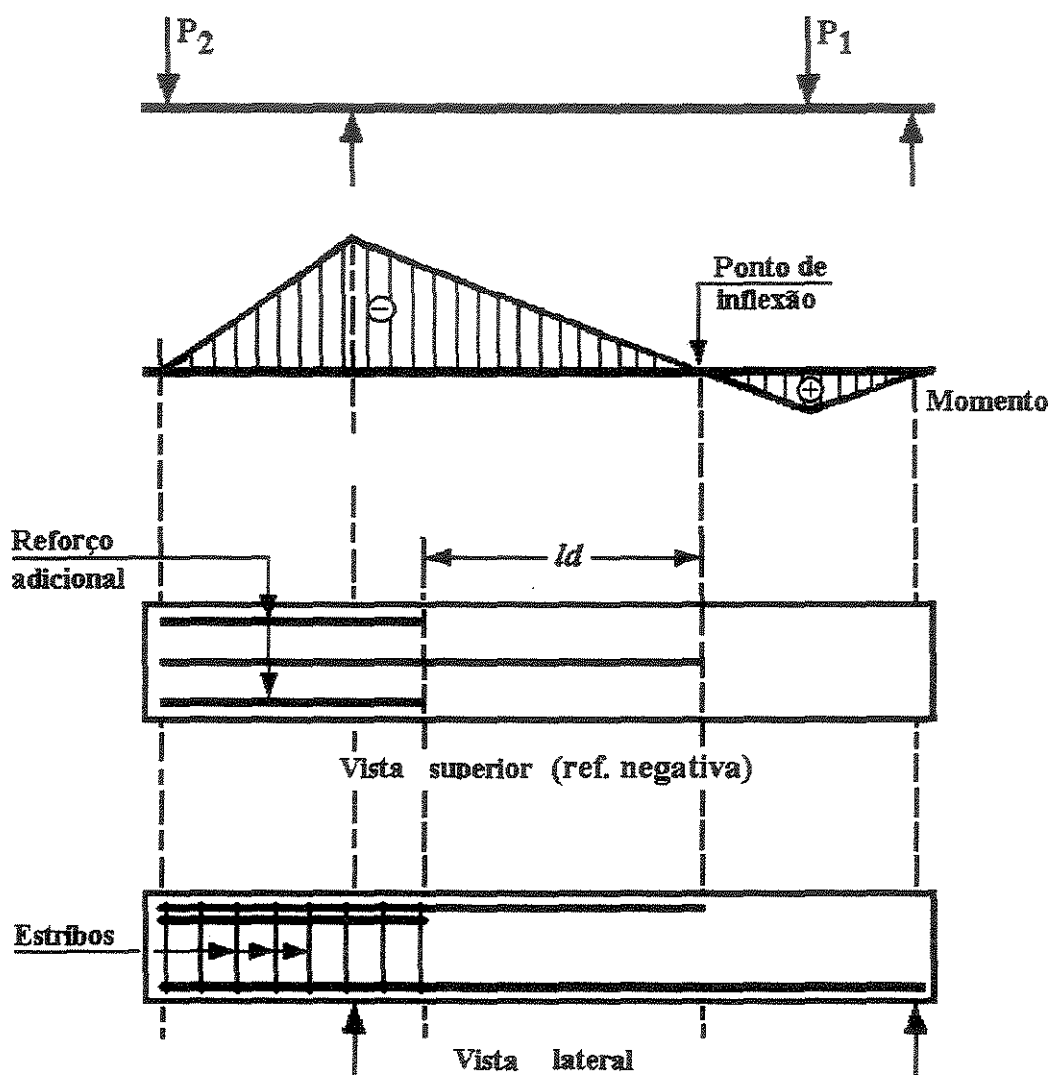


Figura 4.14 Ensaio de flexão proposto pela Universidade do Texas (1908); adap. ISA (1997).

Como aconteceu com os ensaios de arrancamento, os de flexão também sofreram adaptações para eliminar efeitos parasitas, como por exemplo, a influência das reações de apoio que provocam uma parcela de aderência adicional proveniente do aumento de atrito ao longo do comprimento aderente, bem como da fissuração provocada pelas tensões de corte e de flexão, que diminuem o confinamento da parte aderente da barra e por último a dificuldade de se conhecer com precisão o braço de alavanca da força de tração; fatores estes que traziam dificuldades na determinação com precisão, dos valores da tensão de aderência.

CHENG e MIRZA (1969) propuseram uma evolução, cujas diferenças de metodologia em relação ao método da Universidade do Texas é a simetria de carregamento, a geometria do corpo de prova e o comprimento aderente da armadura.

BAUS, na década de 60, um dos pesquisadores da Universidade de Liège da Bélgica, propôs uma metodologia, que após aperfeiçoamentos se constituiu no ensaio de flexão indicado na recomendação RILEM/CEB/FIP – RC 5/1978.

Neste ensaio, a viga, conforme a figura 4.15, é constituída de dois blocos paralelepípedicos de concreto armado, conectados na parte superior por uma rótula metálica e ligados na parte inferior pela barra a ser ensaiada, sendo que a viga é solicitada à flexão simples por duas forças iguais e dispostas simetricamente em relação ao seu centro de gravidade.

No ensaio da RILEM/CEB/FIP, em cada uma das semi-vigas é criado um comprimento aderente de 10ϕ (diâmetros), através do isolamento da barra com o uso de mangueiras plásticas. A barra a ser ensaiada apresenta as suas extremidades aparentes, situadas cada uma de um lado da viga sujeita à flexão; nestas extremidades são fixados dispositivos para medir os deslizamentos em relação ao concreto, na medida em que ocorre o incremento do módulo da força P , até que se atinja a ruptura total da aderência em ambos os lados da viga. O ensaio fornece duas curvas de deslizamento em relação à força aplicada.

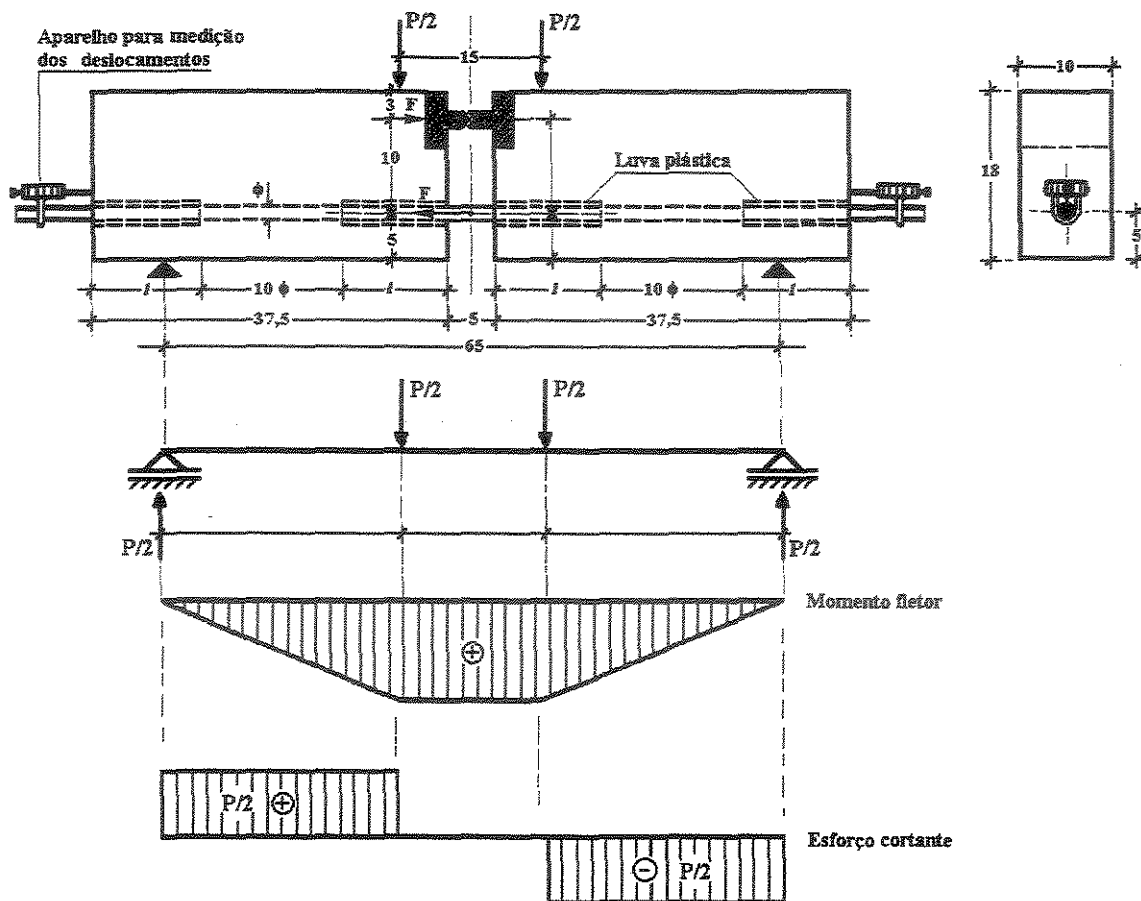


Figura 4.15 Ensaio de viga, para $\phi < 16$ mm, recomendação RILEM/CEB/FIP - RC 5 (1978).

Neste tipo de ensaio, devido a rótula metálica, ao isolamento da barra nas extremidades de cada semi-viga e aos apoios, advém o anulamento do efeito local dos mesmos (apoios), eliminando-se o atrito adicional proveniente da ação da compressão transversal sobre o trecho aderente. Além disso, sabe-se com precisão o valor do braço de alavanca z , caracterizado pela distância entre os eixos da rótula e o da barra, permitindo assim calcular com precisão a força de tração atuante na barra, lembrando ainda que, como temos duas semi-vigas, constituintes do corpo de prova, obtemos dois valores de aderência por ensaio.

O ensaio de flexão elimina os efeitos danosos dos ensaios corriqueiros e representa as condições reais devido a atuação de momento fletor e esforço cortante. Além disso, ele foi utilizado para o estabelecimento de critérios para comprimento de aderência da norma

CEB-FIP (1978), critérios esses, responsáveis por modificações na NBR 6118/1978.

Conforme ISA (1997), os ensaios tipo viga nos leva a resultados absolutos e são indicados para a determinação das influências do diâmetro das barras, cobrimento, espaçamento, armaduras auxiliares e interação entre a aderência e o cisalhamento.

Este ensaio, normalizado por uma associação transnacional como a RILEM, juntamente com suas variações, tem servido de base para a normalização em vários países e sido utilizado em muitas pesquisas, se destacando as realizadas por SORETZ (1972), LARANJEIRAS (1973), LOSBERG e OLSSON (1979), SOUZA (1983), SILVA (1986), TREECE e JIRSA (1989), SOROUSHLIAN et al (1991) e PAYÁ et al (1993).

4.5 Comparação entre os ensaios de arrancamento e o de flexão

Os pesquisadores consultados neste trabalho concordam que o ensaio de arrancamento não reproduz as condições reais de solicitação, como ocorre em peças fletidas, criticando ainda o efeito do atrito adicional, que aumenta os valores de resistência de aderência.

Muito embora tenha havido evolução na metodologia dos ensaios de arrancamento, com a eliminação dos efeitos indesejáveis, ISA (1997) cita SILVA (1986), que levantou em suas pesquisas, resultados que deixam a desejar, face às dispersões de resultados que variam entre 10 e 15 %, além da discordância existente entre vários pesquisadores. Alguns afirmam que os valores de tensão de aderência obtidos em ensaios de arrancamento são superiores aos obtidos em ensaios de flexão; outros dizem exatamente o contrário.

Segundo o ACI COMMITTEE 408 (1979), as vantagens do ensaio de arrancamento sobre o de flexão se resume a uma visualização objetiva do conceito de comprimento de aderência e impõe a idéia básica de ancoragem por simples aderência, como sendo o comprimento que deve exceder o ponto de resistência máxima, ainda que em zonas sem esforço

de corte ou momento fletor.

Atualmente há consenso entre os pesquisadores que os ensaios de flexão são mais indicados que os de arrancamento por estarem mais próximos da realidade a que está sujeita a armadura inserida dentro do concreto.

A RILEM/CEB/FIP RC 5 (1979) mostra nas curvas características da figura 4.16, para ensaios de arrancamento e de flexão, relativas aos deslizamentos de 10 μm , 100 μm e 1000 μm que os valores de tensão de aderência se equivalem quando os deslizamentos são da ordem de 100 μm , para ambos os ensaios. Para deslizamentos inferiores a 100 μm , obtém-se tensões maiores para os ensaios de flexão. Para deslizamentos superiores a 100 μm , os valores de tensões de aderência são maiores, para o ensaio de arrancamento.

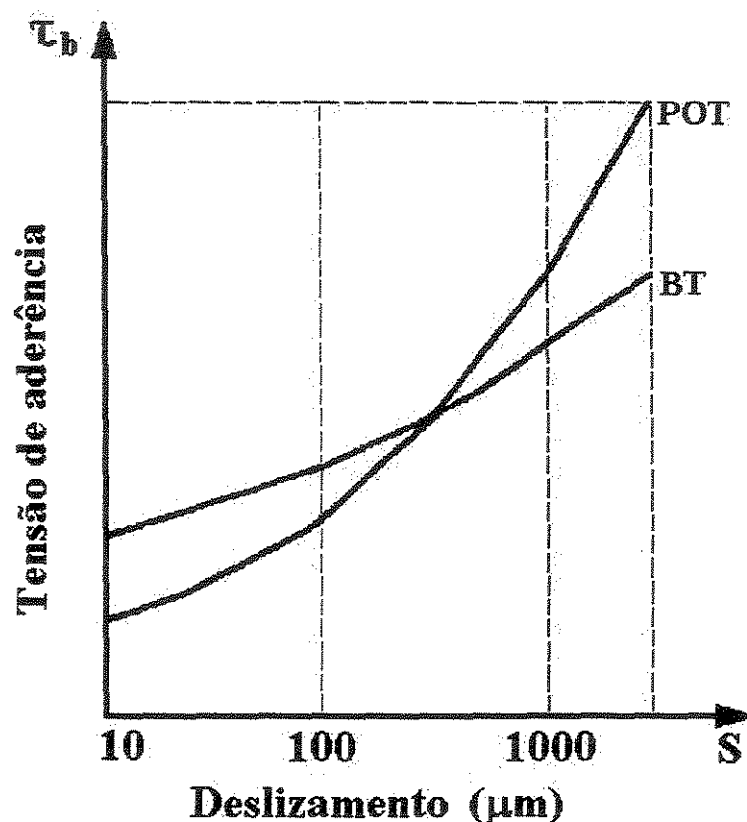


Figura 4.16 Curvas de tensão de aderência em relação ao deslizamento. RILEM/CEB/FIP (1979).

SORETZ (1972) e BONY, CLAUDE e SORETZ (1975), ensaiando barras nervuradas de 8, 16 e 30 mm, compararam resultados de arrancamento e de flexão normalizados pelo RILEM, onde a tensão média de aderência, τ_{bm} , é determinada pela média aritmética das resistências τ_{b10} , τ_{b100} e τ_{b1000} relativos aos deslizamentos de 10 μ m, 100 μ m e 1000 μ m. Os resultados obtidos por esses pesquisadores encontram-se na tabela 4.1 proposto pela RILEM e adaptado de SORETZ , BONY, CLAUDE, (1972 e 1975).

Tabela 4.1 Tensões de aderência obtidas em ensaio de flexão e de arrancamento. RILEM

ϕ (mm)	lote	Beam test (BT) τ_b (MPa)					Pull-out-test (POT) τ_b (MPa)				
		τ_{b10}	τ_{b100}	τ_{b1000}	τ_{bm}	τ_{br}	τ_{b10}	τ_{b100}	τ_{b1000}	τ_{bm}	τ_{br}
8	1	5,7	8,2	16,1	10,0	19,9	2,2	5,6	17,2	8,3	20,8
	2	3,9	5,6	11,2	6,9	17,8	2,9	5,4	13,5	7,3	19,7
16	1	5,8	8,9	12,9	9,3	16,3	4,2	9,1	17,8	10,3	22,1
	2	3,8	5,7	10,3	6,6	13,2	1,9	3,8	9,5	5,1	14,9
30	1	4,2	5,9	9,5	6,5	12,3	3,5	6,0	14,1	7,9	18,4
	2	3,7	4,9	8,2	5,6	10,6	2,4	4,2	11,6	6,1	16,9

Segundo SORETZ, o boletim 73 do CEB (1972) estabelece uma tensão mínima de aderência média de 7,04 MPa, sendo que um dos objetivos de SORETZ foi o de estabelecer se a armadura era ou não de alta aderência. Os resultados mostraram que principalmente o aço de diâmetro 30 mm não atendeu o requisito, mas aponta o pesquisador que os valores de tensão de ruptura superam em até 85 % o estabelecido por essa especificação.

Podemos notar também que quanto maior o diâmetro da barra, menor é a tensão média de aderência e a tensão de ruptura.

Quanto maior o diâmetro da barra, maior a tensão de aderência no ensaio de arrancamento em relação ao ensaio de flexão (POT/BT).

A partir dos valores da tabela 4.1 foi construído o gráfico da figura 4.17, adaptado de SORETZ, BONY, CLAUDE (1972 e 1975).

São comparadas as tensões de aderência τ_{b10} , τ_{bm} e τ_{br} , na forma da relação entre os valores obtidos no ensaio de arrancamento e de flexão (POT/BT), em função do diâmetro da barra.

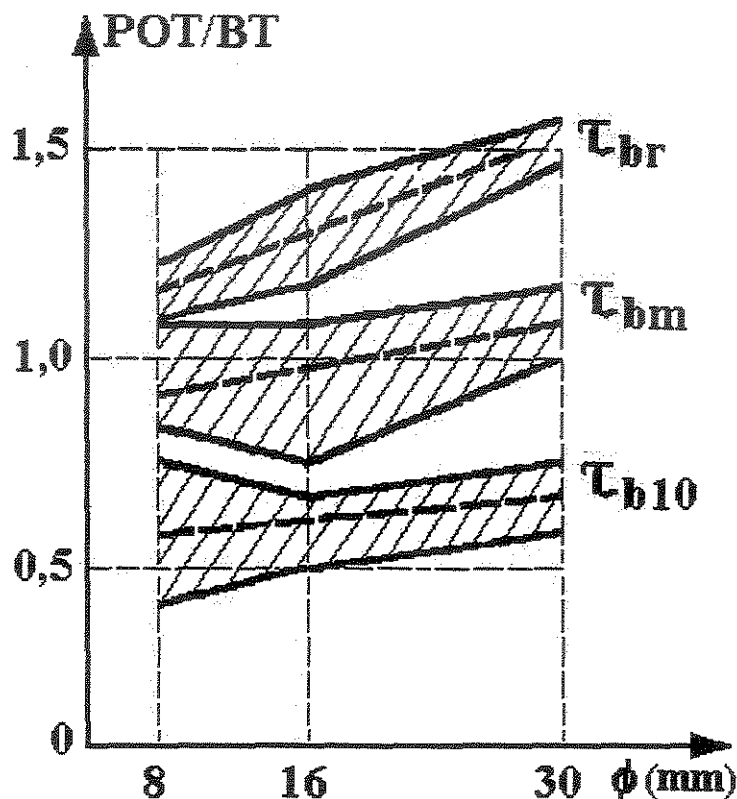


Figura 4.17 Relação (POT/BT) em função do diâmetro da barra. SORETZ et al (1972 e 1975).

Segundo SORETZ et al (1972 e 1975) citados em ISA (1997), a curva representativa do comportamento da aderência, obtida em ensaios de arrancamento é mais inclinada, ou seja, cresce mais rapidamente na medida em que aumenta a tensão de aderência (de τ_{b10} para τ_{br}); estes pesquisadores afirmam ainda que a curva é mais inclinada para grandes deslocamentos. Também citam que, para pequenos deslizamentos, as tensões de aderência obtidas nos ensaios de arrancamento são consideravelmente menores que os valores determinados em ensaios de flexão,

sendo que a situação se inverte para deslizamentos maiores, quando as tensões de aderência em ensaios de arrancamento são maiores que os valores que são observados nos ensaios de flexão.

Os valores de tensão de aderência na ruptura, τ_{br} , é maior no ensaio de arrancamento do que no ensaio de flexão, confirmando, segundo ISA, a afirmação de que os ensaios de arrancamento produzem maiores valores de ruptura, em decorrência da aderência adicional de atrito.

Outra observação que se pode fazer é que, para a tensão de aderência média, τ_{bm} , obtém-se uma relação $POT/BT = 1$, podendo-se dizer que, na faixa $POT/BT = 1 \pm 0,2$, considerando um desvio de 20 %, os valores para os ensaios de arrancamento e de flexão são praticamente iguais. Portanto, um valor a ser usado por toda essa área, a favor da segurança, é $POT/BT \geq 0,8$, mostrando que os valores de tensão média de aderência, τ_{bm} , obtidos em ensaios de arrancamento, são provavelmente até 20 % menores que os obtidos em ensaios de flexão.

É citado ainda que, para ambos os métodos, a dispersão de resultados é maior para pequenos deslizamentos do que para deslizamentos ocorridos próximos à ruptura de ligação.

A dispersão dos valores individuais, medidos ao redor dos valores médios das séries, decresce com o aumento do diâmetro da barra, para a área coberta pelos ensaios.

5 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS REALIZADAS UTILIZANDO O ENSAIO DE VIGA, PADRÃO RILEM/CEB/FIP - RC 5

5.1 ISA, M. M. (1997). Aderência concreto – armadura: Influência da corrosão e da proteção catódica

Este trabalho para a obtenção do título de doutor em engenharia estuda o comportamento da aderência entre o concreto e a armadura, com esta apresentando condições superficiais decorrentes da corrosão (obras novas) atmosférica urbana por 90 dias (antes da concretagem) e submetidas à corrosão acelerada com o uso de cloreto de cálcio di-hidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) nos teores de 0,17 % e 0,42 % em relação ao consumo de cimento, com aplicação de corrente elétrica de $1,5 \text{ mA/cm}^2$. Nesta pesquisa, considera-se como referência para efeito de comparações, a armadura com carepa de laminação. Na fase final do trabalho o autor estuda o comportamento da aderência na presença de proteção catódica tipo galvânica (obras reparadas) para a armadura, utilizando revestimentos ricos em zinco, usando como referência para efeito de comparações a armadura jateada com areia.

Deste modo foi estudada a influência dos produtos da corrosão da armadura gerados antes da concretagem (corrosão atmosférica) e depois da concretagem (corrosão acelerada) sendo o comportamento da aderência determinado através de ensaios de arrancamento (“pull-out-test”) e de flexão (“beam test”) propostos pela recomendação da RILEM/CEB/FIP, 1978”.

O interesse no trabalho de ISA é o uso comum do método de ensaio (“beam test”) da

recomendação RILEM/CEB/FIP (1978), usado nesta pesquisa. Tem ainda interesse, a metodologia adotada pelo autor bem como os ensinamentos advindos dos resultados e comparações, que podem ter aplicação no contexto deste próprio trabalho.

5.1.1 Corpos de prova e ensaio

Conforme já se sabe os corpos de prova são constituídos de duas semi-vigas de concreto armado, de forma paralelepípedica, unidas na parte inferior pela barra de aço cuja aderência ao concreto se pretende estudar e na sua parte superior por uma rótula de aço.

O ensaio foi executado com algumas modificações em relação à recomendação da RILEM.

A força foi aplicada de forma monotônica e crescente com valores de P igual a 0, 10, 20, 30,... kN, até a ruptura da aderência (P_r). A variação da carga é de 10 kN em 30 s, mantendo-se a carga por 2 minutos para que ocorra o deslizamento que é medido nos dois deflectômetros ajustados nas extremidades das semi-vigas 1 e 2.

Utilizou-se dois apoios móveis (segundo ISA a RILEM não informa o tipo de apoio a ser utilizado) constituídos por um rolete apoiado sobre uma placa que por sua vez é apoiada em três roletes colocados sobre uma placa fixa na máquina de ensaio; todas as peças são constituídas de aço duro e indeformável para as condições de carregamento a serem utilizadas. O contato entre a semi-viga e o rolete se dá através de uma das geratrizes deste, minimizando o atrito. Assim, devido ao atrito minimizado e a inércia entre os roletes e as placas, todo o sistema permanece praticamente em equilíbrio durante a realização do ensaio.

ISA utilizou 4 corpos de prova para cada situação de superfície da barra, medindo os deslizamentos e os deslizamentos médios para cada valor de carga, para toda semi-viga 1 e 2,

convencionando semi-viga 1 como sendo aquela que rompe primeiro.

Os deslizamentos foram medidos por extensômetros mecânicos analógicos. Na prática é impossível o controle perfeito de todas as variáveis envolvidas no ensaio; isso acarreta deslizamentos diferentes nas duas semi-vigas para um mesmo valor de força P ; como também a ruptura não ocorre simultaneamente nas duas metades do corpo de prova, um dispositivo trava a extremidade que sofreu a ruptura primeiro, possibilitando a continuidade do ensaio para a outra metade.

5.1.2 Resultados obtidos

Foi registrada as curvas força-deslizamento para as duas semi-vigas, o que permite determinar o valor da resistência de aderência para qualquer valor de deslizamento. Foi calculado então, como valores característicos da resistência de aderência, a tensão média τ_{bm} e a tensão última de aderência τ_{br} .

A tensão média τ_{bm} é calculada através da média aritmética das tensões de aderência, τ_{b10} , τ_{b100} e τ_{b1000} , correspondentes aos deslizamentos de 10, 100 e 1000 μm , observando-se que, caso a ruptura ocorra antes do deslizamento de 1000 μm , a tensão de aderência τ_{br} será o terceiro valor a ser utilizado no cálculo de τ_{bm} .

Foi calculado também para cada semi-viga, e situação de superfície da barra, os respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação.

Os valores de carga e deslizamento (média de 4 corpos de prova) para armaduras com carepa de laminação, submetidas à corrosão atmosférica e corrosão acelerada usando 0,17 % e 0,42 % de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, medidos em ensaios de flexão, são dados na tabela 5.1 adaptada de ISA (1997).

Tabela 5.1 Valores de carga e deslizamento em ensaios de flexão; adap. ISA (1997)

P (kN)	Deslizamento médio (μm)							
	Carepa de laminação		Corrosão atmosférica.		CaCl ₂ .2H ₂ O 0,17 %		CaCl ₂ .2H ₂ O 0,42 %	
	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	8	5	21	15
20	29	22	37	23	75	53	145	102
30	140	82	173	107	252	203	-	-
40	252	177	285	220	-	-	-	-
50	-	275	-	415	-	-	-	-

Com os valores da tabela 5.1, constroem-se as curvas de carga pelo deslizamento das semi-vigas 1 e 2 para as condições superficiais em estudo, conforme figuras 5.1 e 5.2.

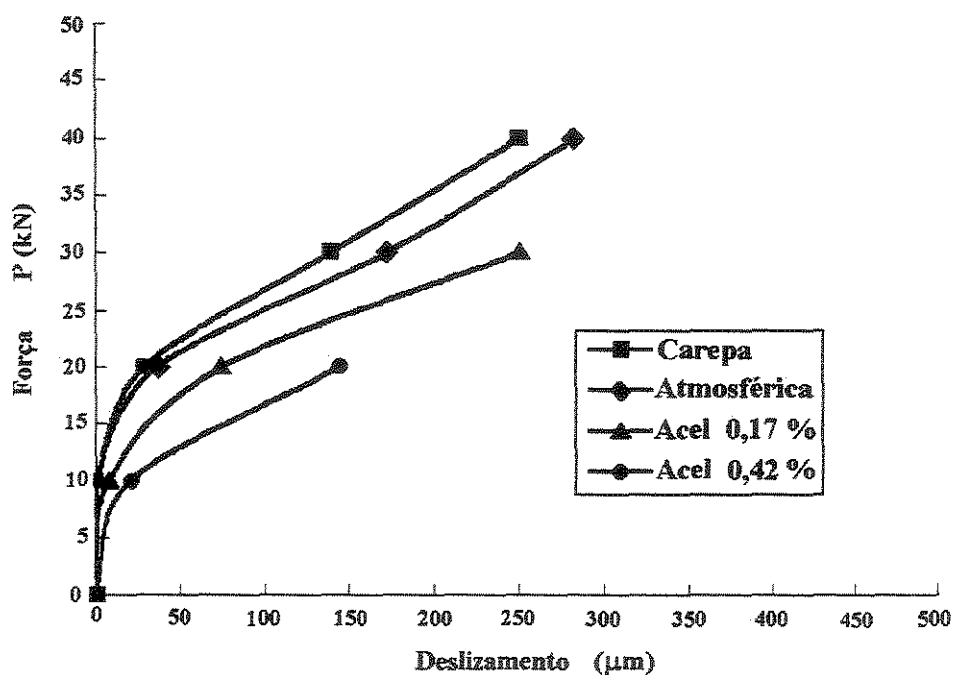


Figura 5.1. Comportamento da aderência para o aço para as semi vigas 1; adap. ISA (1997)

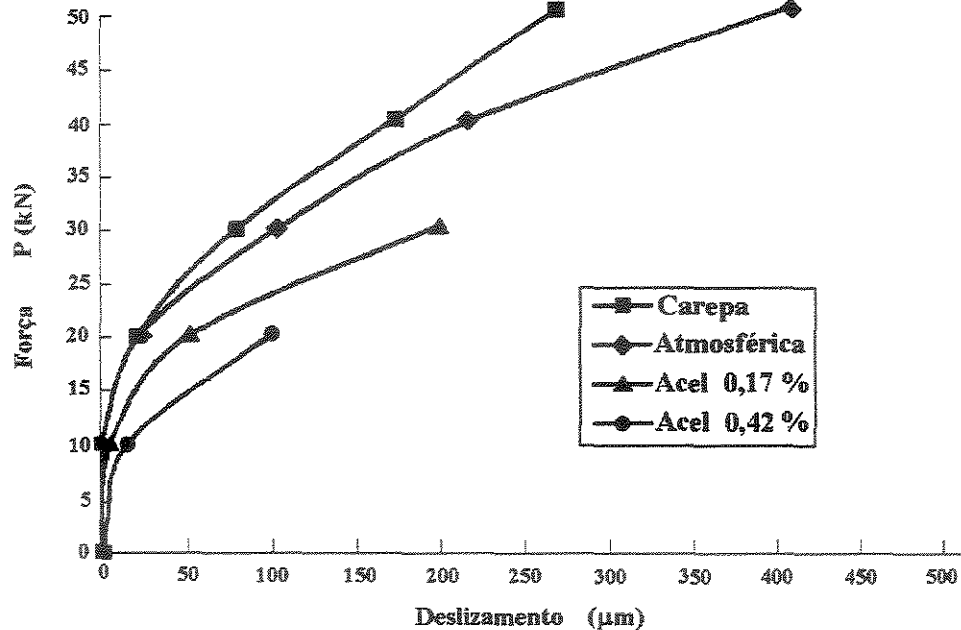


Figura 5.2 Comportamento da aderência para o aço para as semi vigas 2; adap. ISA (1997)

5.1.3 Análise dos resultados e conclusões

Em seguida algumas considerações de ISA em relação aos resultados obtidos no seu trabalho.

A semi-viga 1, convencionada como a que rompe primeiro, apresenta deslizamentos superiores aos da semi-viga 2 de um mesmo corpo de prova, para forças de mesma intensidade.

A armadura com carepa de laminação, constituída de uma camada dura e firmemente aderida ao metal base, mas porosa, permite a reação dos produtos de hidratação do cimento com os elementos do aço, formando compostos aderentes responsáveis pela aderência por adesão química, não havendo deslizamento até a carga de 10 kN.

A carepa de laminação não altera as características da área nervurada relativa e estando aderida ao metal base, atua como ponte de aderência entre este e os consoles de argamassa da

zona de transição que são formados entre as nervuras; fatos que são responsáveis pela aderência mecânica que é o maior impedimento ao deslizamento entre o aço e a armadura.

A aderência por atrito entre a argamassa da zona de transição concreto-aço e as superfícies formadas pela argamassa dos consoles cisalhados e das regiões de topo das nervuras são as últimas barreiras ao deslizamento.

As armaduras submetidas à corrosão atmosférica apresentam praticamente o mesmo comportamento da armadura com carepa de laminação, com deslizamentos apenas ligeiramente superiores. Até a carga atingir 10 kN não há deslizamento entre o aço e o concreto. Os compostos desta corrosão, denominada como sendo química por HELENE (1986), formados de compostos consistentes e firmemente aderidos ao metal base, reagem com os produtos da hidratação do cimento contribuindo para a parcela de aderência química. SOUZA (1983) e MASLEUDDIN et al (1990), afirmam que não há influência no comportamento da aderência devido a este tipo de corrosão, se comparado com a situação de referência, ou seja, do aço com carepa de laminação.

A carepa de laminação e os produtos da corrosão atmosférica modificam de forma semelhante ou compensatória as características geométricas das nervuras, conforme dizem SOUZA (1983) e MASLEUDDIN et al (1990), se referindo à aderência mecânica, já que o comportamento é o mesmo para as duas situações.

Conforme AL-SULAIMANI et al (1990), os produtos da corrosão atmosférica apresentam efeito lubrificante; por isso, o último mecanismo resistente, aderência por atrito, fica prejudicado, justificando os deslizamentos maiores apresentados, se comparado com a situação de referência.

Conforme ANDRADE (1988), na corrosão acelerada os produtos gerados não emigram pelos poros e segundo TUUTI (1982), são mais volumosos provocando a fissuração do concreto de cobrimento. Tais produtos provocam efeito lubrificante conforme AL-SULAIMANI (1990), diminuindo a aderência segundo CABRERA (1992) e SANTIAGO et al (1993).

Os compostos da corrosão eletroquímica reagem com os produtos da hidratação do cimento, mas como não estão firmemente aderidos ao metal base, a parcela de aderência química neste caso, não contribui com nenhuma resistência ao deslizamento relativo.

Na corrosão acelerada por cloretos, formam-se pites que deterioram as características das nervuras, modificando também a geometria dos consoles de argamassa entre elas, na zona de transição. Este fato prejudica a aderência destes consoles ao metal base.

No ensaio de flexão constata-se que a armadura secundária controla a fissuração ocasionada pela corrosão, o que foi medido após 7 dias de ensaio acelerado. Essa fissuração é mais contundente para o teor de 0,42 % do que para o teor de 0,17 % de cloreto de cálcio. Conclui-se, portanto, que este tipo de corrosão compromete a aderência mecânica, apesar de os valores obtidos para a aderência serem superiores aos dos ensaios de arrancamento, que não trabalham com armadura de confinamento.

A parcela de aderência por atrito fica bastante prejudicada devido à diminuição do confinamento e do coeficiente de atrito que depende do contato entre o metal base e as camadas dos produtos da corrosão eletrolítica; isso a despeito da armadura auxiliar diminuir a fissuração garantindo ainda um certo confinamento que provoca pressão radial correspondente.

AL SULAIMANI et al (1990), CABRERA (1992), e SANTIAGO et al (1993), dizem segundo ISA (1997), que maiores aberturas de fissuras no concreto de cobrimento acarretam menor confinamento da armadura, tendo como consequência menores valores de aderência; fato que é comprovado neste trabalho de ISA em ensaios de flexão.

Nos ensaios de flexão a ruptura de aderência apresenta valores superiores aos obtidos em ensaios de arrancamento por conta destes não possuírem armadura secundária.

A corrosão acelerada utilizando um teor de 0,42 % provocou maiores deslizamentos para um mesmo valor de carga, se comparado com os ensaios onde se utilizou 0,17 % de cloreto de cálcio.

ISA usou na sua pesquisa barras de 12,5 mm de diâmetro. Portanto corpos de prova tipo A, conforme recomendação da RILEM, sendo que as resistências média e de ruptura podem ser quantificadas pela expressão:

$$\tau_b = 0,254648 \cdot P \quad (\text{MPa}) \quad (5.1)$$

A tabela 5.2 apresenta os valores médios obtidos por ISA (1997) em ensaios de flexão, para as cargas P_{10} , P_{100} e P_r (média de 4 corpos de prova), correspondentes aos deslizamentos de 10 μm , 100 μm e de ruptura para a armadura com carepa de laminação, submetida a corrosão atmosférica e corrosão acelerada com teores de 0,17 % e 0,42 % de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Tabela 5.2 Valores de P_{10} , P_{100} e P_r para deslizamentos de 10 μm , 100 μm e de ruptura.

Deslizamento (μm)	Carga média para as situações – P (kN)							
	Carepa de laminação		Corrosão atmosférica.		$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,17 %		$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,42 %	
	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2
10	14,55	17,15	16,00	18,15	11,20	14,80	5,10	7,20
100	27,38	32,69	27,38	29,88	24,25	25,20	16,20	19,25
Ruptura	53,05	51,88	49,35	56,00	31,20	33,70	21,50	26,20

Aplicando os valores da tabela 5.2, na expressão 5.1, obtém-se os valores das tensões médias τ_{bm} e de ruptura τ_{br} , que são apresentadas na tabela 5.3 adaptada de ISA (1997).

Os valores são obtidos em ensaios de flexão para armaduras com carepa de laminação, submetidas à corrosão atmosférica e corrosão acelerada com 0,17 % e 0,42 % de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Tabela 5.3 Valores de τ_{bm} e τ_{br} em ensaios de flexão; adap ISA (1997)

Deslizamento (μm)	Valores médios para as situações (MPa)							
	Carepa de laminação		Corrosão atmosférica.		CaCl ₂ .2H ₂ O 0,17 %		CaCl ₂ .2H ₂ O 0,42 %	
	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2	s. v.1	s.v.2
τ_{bm}	8,07	8,64	7,90	8,80	5,66	6,30	3,63	4,47
τ_{br}	13,52	13,22	12,57	14,27	7,95	8,59	5,48	6,68

A tensão média de aderência τ_{bm} é relativa à média aritmética das cargas para os deslizamentos de 10 μm , 100 μm e de ruptura.

Com os valores de τ_{bm} e τ_{br} da tabela 5.3 construiu-se os gráficos da figura 5.3 e 5.4 para o aço com carepa de laminação, submetido à corrosão atmosférica e acelerada, respectivamente, para as semi vigas 1 e 2 (adap. ISA, 1997)

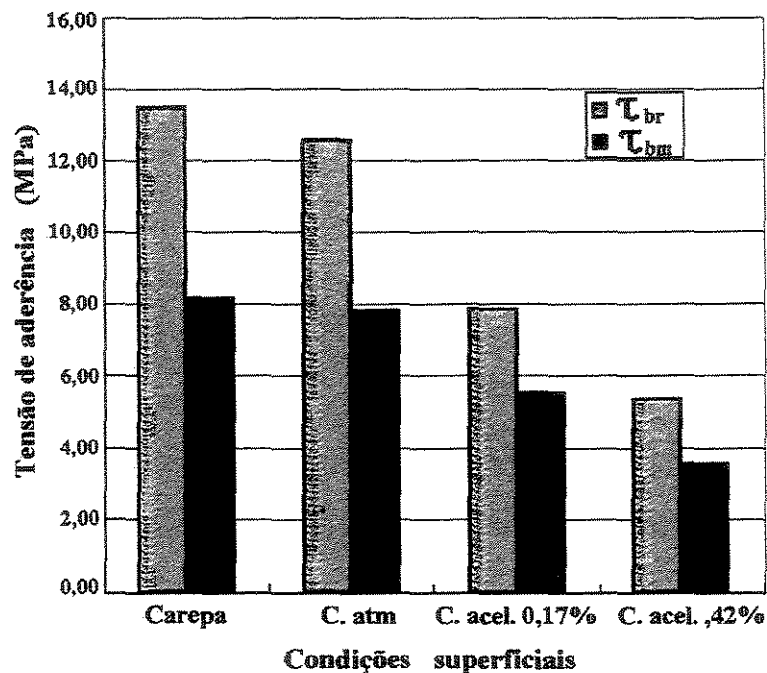


Figura 5.3 Valores de τ_{bm} e τ_{br} para as semi vigas 1; adap. ISA (1997)

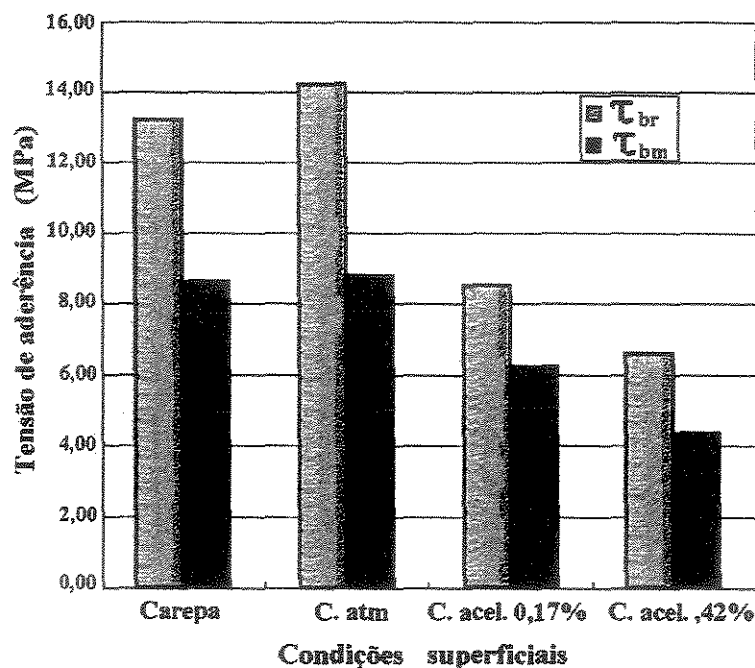


Figura 5.4 Valores de τ_{bm} e τ_{br} para as semi vigas 2; adap. ISA (1997)

Em seguida, algumas considerações de ISA em relação aos resultados obtidos para as resistências de aderência e de ruptura.

Considerando a magnitude das dispersões destes ensaios, a tensão de aderência média para a armadura sujeita à corrosão atmosférica apresenta a mesma ordem de grandeza para a armadura com carepa de laminação.

Para a tensão de ruptura, a armadura de referência apresenta um valor 7% maior do que a submetida à corrosão atmosférica. Isto referenda as afirmações de SOUZA (1983) e MASLEUDDIN et al (1990), que afirmam que os produtos da corrosão atmosférica não interferem no comportamento da aderência, a não ser em relação à ruptura, pois conforme ALSULAIMANI et al (1990), a corrosão apresenta um certo efeito lubrificante.

Na corrosão acelerada, as resistências média e de ruptura para condições superficiais com teor de 0,17 % são superiores às com teor de 0,42 % de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

As fissuras nas vigas para o teor de 0,17 % são de aberturas menores que para os teores de 0,42 % de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; isto confirma AL-SULAIMANI et al (1990), CABRERA (1992) e SANTIAGO et al (1993), que dizem que maiores aberturas de fissuras no cobrimento da armadura acarretam menor confinamento e como consequência, menores valores de tensão de aderência.

A ruptura para condições superficiais decorrentes da corrosão se dá por fendilhamento, ou seja, fissuração longitudinal do concreto de cobrimento, o que explica os valores de tensão de aderência média e de ruptura para condição de corrosão acelerada para ambos os teores de cloreto de cálcio serem bastante inferiores aos apresentados pela armadura de referência.

Muito embora as semi-vigas 2 apresentem menores valores de deslizamento para um mesmo valor de força P , ou seja, maiores valores de P para deslizamentos de 10 μm , 100 μm e de ruptura (quando se compara com as semi-vigas 1), pela análise dos gráficos chega-se às mesmas conclusões obtidas para as semi-vigas 1.

ISA estudou ainda a aderência de armaduras protegidas com revestimentos catódicos tipo galvânica, tendo como referência, considerando a técnica de reparos localizados, a armadura tratada com jato de areia até o metal branco.

A armadura jateada apresentou melhores resultados do que as protegidas pelos revestimentos, pois a superfície do metal jateado fica mais reativa com os produtos da hidratação, que são responsáveis pela adesão química.

O jato de areia, aplicado perpendicularmente à superfície da armadura remove a carepa de laminação e diminui a altura das nervuras, implicando no menor desempenho desta condição em relação à armadura com carepa, mas com maior desempenho do que as armadura protegidas pelos revestimentos catódicos.

O jateamento provoca maior rugosidade superficial da armadura aumentando o coeficiente de atrito. Logo, a aderência por atrito nesta condição é superior ao das armaduras

protegidas pelos revestimentos catódicos.

Os revestimentos catódicos usados são ricos em zinco, sendo que um deles cujo veículo é o etil silicato conferiu melhor desempenho à aderência, pois apresenta certa rugosidade, facilitando as reações do zinco com os produtos da hidratação do cimento. Os outros dois tem como veículo o epóxi, que evita quase que totalmente, devido a sua impermeabilidade, as reações do zinco com os produtos da hidratação, tornando o atrito praticamente desprezível como é mostrado por TREECE e JIRSA, 1989 quando esquematizam os esforços atuantes na armadura revestida com este material.

5.2 DE LARRARD, F.; SCHALLER, I.; FUCHS, J. (1993). Efeito do diâmetro da barra na resistência de aderência da armadura em concreto de alto desempenho

Tendo como princípio o fato de que a tensão de aderência entre o aço e o concreto cresce com a resistência à tração do concreto, crescendo a uma taxa mais alta com armadura de diâmetros menores, os pesquisadores estudam neste trabalho a resistência de aderência entre um concreto de alto desempenho e barras de aço para concreto armado. As medições realizadas em uma série de vigas tiveram como variáveis a resistência do concreto aos 28 dias, sendo o CAD com 95 MPa e um concreto de referência de resistência 42 MPa, também as barras de aço para concreto armado com diâmetro variando entre 10 e 25 mm e por fim as condições superficiais da armadura constituídas de barras lisas e nervuradas.

Os autores deste trabalho concluíram que poucos trabalhos lidam com CAD ou resistências próximas de 100 MPa, havendo interesse sobre a possível fragilidade de aderência entre o aço e o CAD; a influência do diâmetro da barra na aderência não tem sido investigado; e o comportamento da aderência não tem sido testado em condições representativas para viga de concreto armado, na presença de armadura transversal.

5.2.1 Componentes do Concreto

Os dois tipos de concreto utilizados em todos os testes contém um cimento Tipo I-II ASTM (com uma resistência de 55 MPa); três classes de agregado britado proveniente de pedra calcária (0 a 5 mm, 5 a 12,5 mm e 12,5 a 20 mm); e areia sílico calcária. Um superplastificante (naftaleno-sulfonado) e uma sílica ativa condensada na mistura do CAD. As proporções usadas na mistura bem como as propriedades mecânicas e do concreto fresco estão na tabela 5.4.

Para cada lote de concreto ensaios de resistência à compressão e à tração e módulo de Young (módulo de deformação longitudinal do concreto) foram realizados em corpos de prova de 16 x 32-cm. Os resultados médios obtidos estão resumidos na tabela 5.4.

Ensaio com o cone de Abrams e ensaios de trabalhabilidade LCL, referenciados em BARON e LESAGE (1973), também foram realizados no concreto fresco para caracterizar sua trabalhabilidade (vide tabela 5.4). Observe que, para um tempo de fluxo essencialmente igual medido pelo LCL, o CAD apresenta um valor de Slump muito maior do que o concreto comum. Foi observado que o CAD com sílica ativa é muito estável na condição fresca, não apresentando nenhuma exsudação.

5.2.2 Armadura

Dois tipos de barras foram comparadas nos ensaios. O primeiro tipo constituído de barras nervuradas de aço de dureza natural (laminado à quente), (DEF) com diâmetro de 10, 16 e 25 mm, padrão de deformação de acordo com o padrão francês NFA 35-016. O segundo tipo, constituído de barras lisas de 25 mm de diâmetro. O aço utilizado foi o Tipo E 40, com resistência de escoamento à tração acima de 400 MPa.

Tabela 5.4 Composição e propriedades dos concretos usados (LARRARD et al,1993)

Tipo de Concreto	CAD	Concreto controle
Cimento (kg/m^3)	421	410
Agregado 12,5 a 20 mm (kg/m^3)	854	826
Agregado 5 a 12,5 mm (kg/m^3)	411	398
Agregado 0 a 5 mm (kg/m^3)	326	315
Areia de rio 0 a 5 mm (kg/m^3)	326	315
Água (kg/m^3)	112	181
Superplastificante (pó seco) (kg/m^3)	7,59	-
Sílica ativa (kg/m^3)	42,1	-
Água/(cimento + sílica ativa) (kg/m^3)	0,24	0,44
Slump (mm)	180	70
Tempo (flowing) (seg)	19	20
Resistência à compressão - f_{c28} (MPa)	95	42
Resistência à tração - f_{t28} (MPa)	5	3,5
Módulo de elasticidade - E_{i28} (GPa)	51,2	41,3

5.2.3 Método experimental

O ensaio de vigas consiste em dois blocos retangulares de concreto armado, ligados no topo por uma articulação de aço e na parte inferior pela barra a ser testada por aderência com o concreto, conforme o método RILEM/CEB/FIP – RC 5.

As dimensões dos conjuntos para ensaio variam de acordo com o diâmetro da barra (corpo de prova A ou B). Estas dimensões estão indicadas no capítulo 6. Apenas uma parte da barra é ancorada em cada bloco; o restante é isolado do concreto por luvas plásticas. O comprimento de aderência l_d depende do diâmetro da barra. A RILEM recomenda um

comprimento de aderência igual a 10 vezes o diâmetro da barra ϕ , mas este comprimento teve que ser reduzido para o CAD ou teria ocorrido o escoamento do aço antes da falha de aderência, como foi estabelecido nos ensaios preliminares. Os comprimentos de aderência finalmente escolhidos estão indicados na tabela 5.5.

Tabela 5.5 Comprimento de aderência para os vários diâmetros de barras.

Aço	DEF 10	DEF 16	DEF 25	d _p 25 liso
Comprimento de aderência	3 ϕ	3 ϕ	2,5 ϕ	3 ϕ e 5 ϕ
Comprimento, mm	30	48	62,5	75 e 125

As vigas foram carregadas à flexão por duas cargas de forças iguais aplicadas simetricamente de cada lado da articulação. O carregamento foi sucessivo até completar a falência da aderência em cada uma das duas metades da viga. Os deslizamentos nas duas extremidades da barra foram medidos a cada estágio de carregamento. Extensômetros elétricos foram colados na parte central da barra (entre as duas zonas de ancoragem) para monitorar o alongamento do aço durante os ensaios; assim foi possível checar em todos os ensaios que o aço permaneceu dentro do seu domínio elástico.

Devido ao concreto ser confinado por armadura transversal, na zona de contato entre o concreto e a barra, foi possível avaliar o comportamento último da zona de transição aço-concreto nos ensaios (por comportamento último pode-se entender uma situação definida da ruptura, por exemplo, no ensaio da RILEM um deslizamento de 3 mm e uma $\tau_{\text{última de aderência}}$). Contudo, na avaliação de elevados valores de deslizamento entre a barra principal e o concreto os pesquisadores notaram que ocorreu uma substancial flexão no meio da barra, que é então comprimida contra a parte de cima da luva plástica e pode causar atrito nesta região. Este é o motivo pelo qual, apenas dados obtidos com deslizamentos abaixo de 100 μm , foram considerados representativos.

As vigas foram desmoldadas 24 h depois da moldagem, depois curadas ao ar antes do ensaio, à idade de 28 dias. A tabela 5.6 dá o número de ensaios realizados com cada concreto e cada tipo de barra de aço. Como a dispersão de resultados neste tipo de experimento é usualmente muito alta, a maioria dos ensaios foram repetidos três vezes.

Tabela 5.6 Número de ensaios realizados. LARRARD et al (1993).

Aço	DEF 10	DEF 16	DEF 25	d _B 25 liso
CAD	3	3	2	2
Concreto controle	3	3	3	3

5.2.4 Resultados do ensaio

Como relatado anteriormente, foi determinado em ensaios preliminares que o comprimento de aderência de 10 ϕ recomendado pela RILEM, ou mesmo 5 ϕ no caso do CAD, seria muito grande para se atingir a carga de deslizamento entre o aço e o concreto antes do escoamento da armadura sob tensão. Esta averiguação mostra que há uma substancial superioridade na aderência armadura-concreto no concreto de alto desempenho comparando-se com concreto comum, como mostra as medidas feitas durante os ensaios.

5.2.4.1 Curvas carga-deslizamento

Em cada ensaio, o deslizamento das duas extremidades da armadura contra a carga aplicada na viga foi gravado automaticamente. As curvas da figura 5.5 até a 5.8 descrevem essa evolução para cada ensaio.

As curvas do aço de 10 mm de diâmetro mostram uma clara diferença de comportamento entre os dois concretos: a eficiência da aderência do aço-CAD no princípio do ensaio é muito grande, ao passo que a armadura em contato com o concreto comum desliza desde o começo do carregamento.

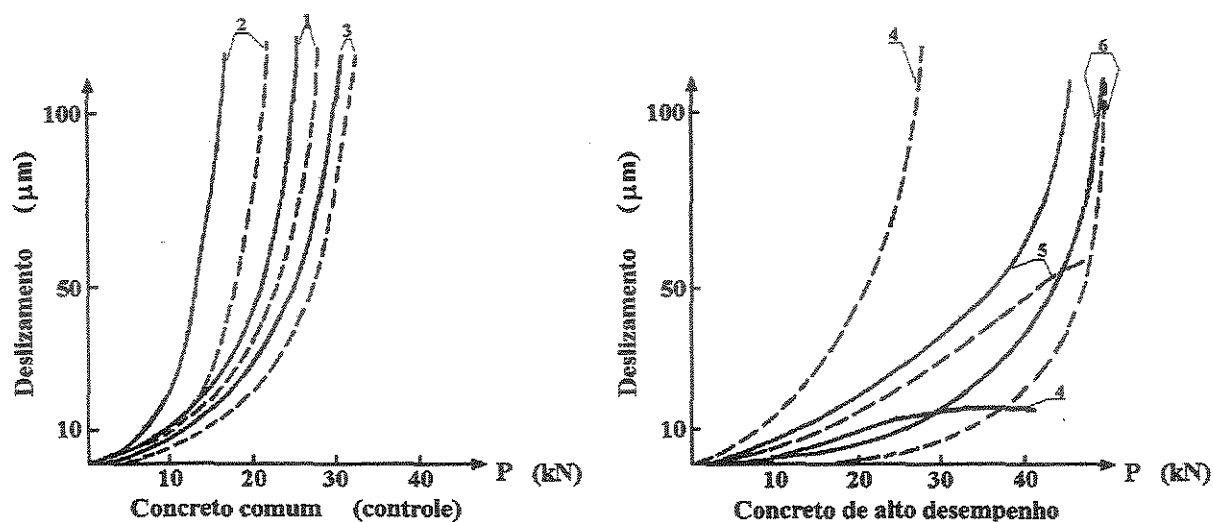


Figura 5.5 Curvas carga-deslizamento para barras nervuradas, $\phi = 10$ mm (O número indicado para cada par de curvas, aponta os dois resultados de cada corpo de prova ensaiado); adap. de LARRARD et al (1993).

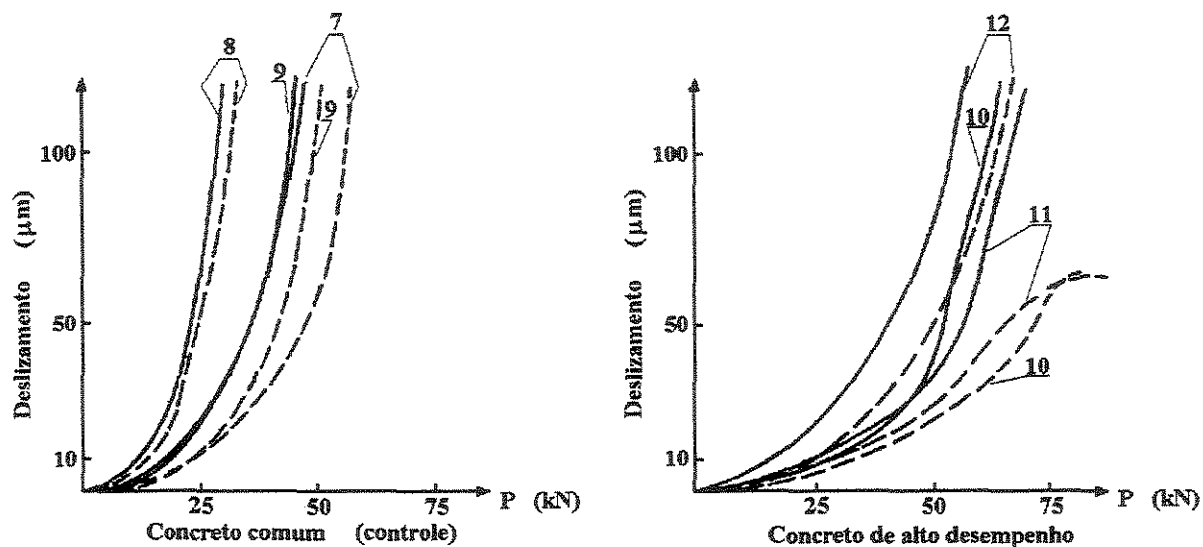


Figura 5.6 Curvas carga-deslizamento para barras nervuradas, $\phi = 16$ mm (O número indicado para cada par de curvas, aponta os dois resultados de cada corpo de prova ensaiado); adap. LARRARD et al (1993).

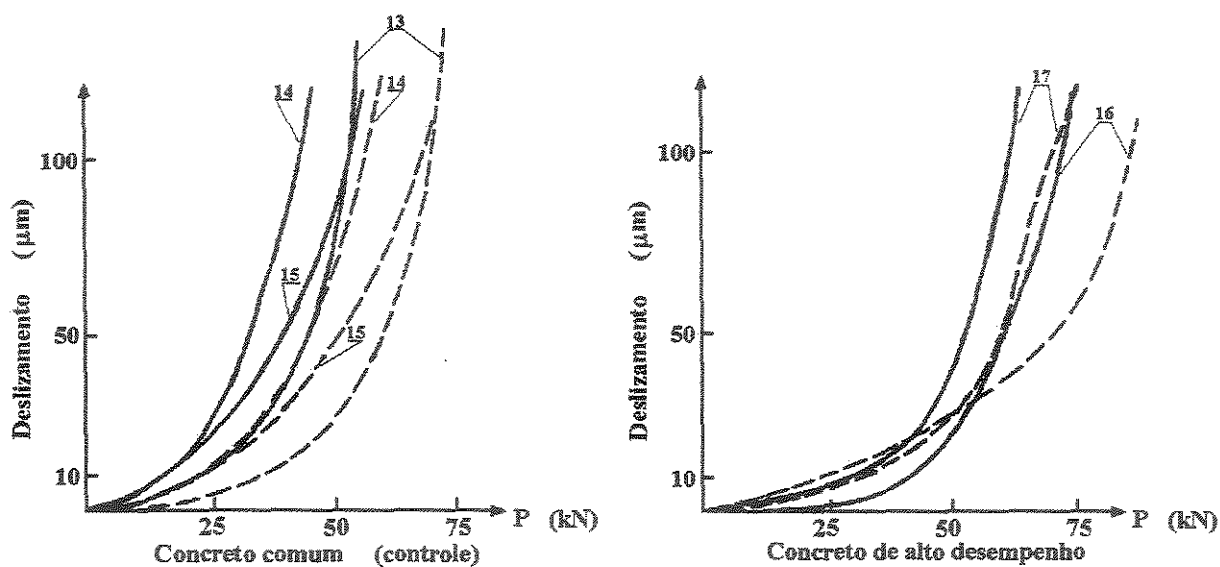


Figura 5.7 Curvas carga-deslizamento para barras nervuradas, $\phi = 25$ mm (O número indicado para cada par de curvas, aponta os dois resultados de cada corpo de prova ensaiado); adap. LARRARD et al (1993).

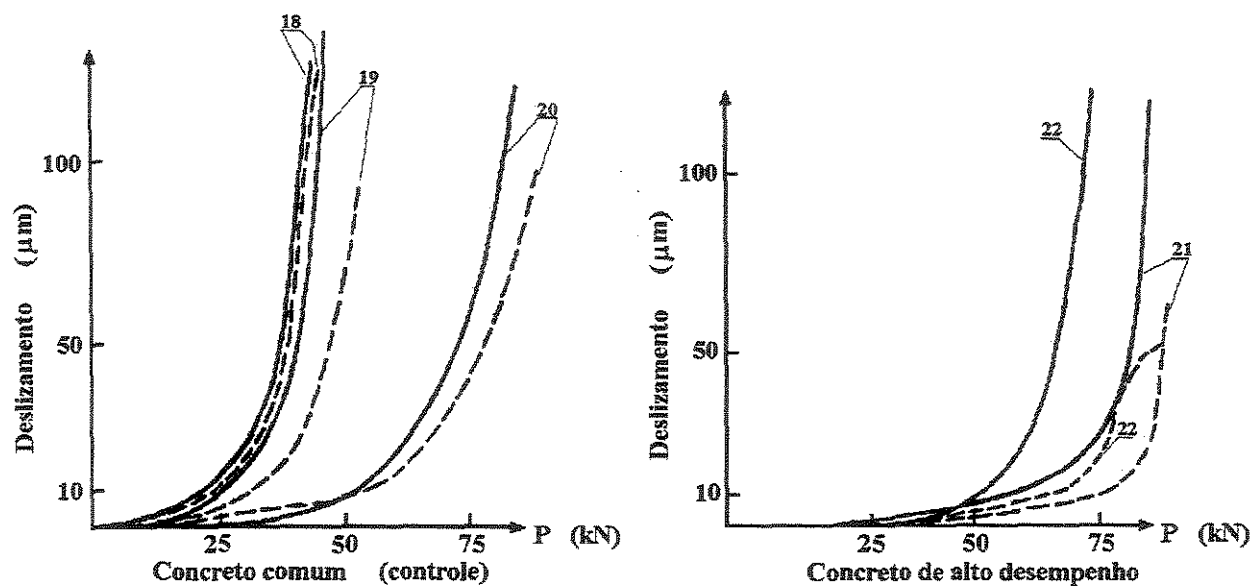


Figura 5.8 Curvas carga-deslizamento para barras lisas, $\phi = 25$ mm (O número indicado para cada par de curvas, aponta os dois resultados de cada corpo de prova ensaiado); adap. LARRARD et al (1993).

5.2.4.2 Tensões de aderência

Os critérios considerados nas recomendações da RILEM para quantificar a aderência entre aço-concreto foram aplicados para valores de carga correspondentes aos deslizamentos de 10 µm e 100 µm de cada extremidade da barra, sendo possível calcular a média da tensão de aderência τ , para estes valores de deslizamento, usando a fórmula

$$\tau = \frac{A_s \cdot \sigma_s}{\pi \cdot \phi \cdot l_d} \quad (5.2)$$

onde σ_s é a tensão no aço; A_s é a área da seção transversal do aço; ϕ é o diâmetro do aço; e l_d é o comprimento de aderência da barra.

Da recomendação da RILEM, as seguintes fórmulas são usadas para calcular a tensão no aço:

$$\sigma_s = \frac{1,25 \cdot P}{A_s} \quad \text{para corpos de prova Tipo A,} \quad (5.3)$$

e

$$\sigma_s = \frac{1,50 \cdot P}{A_s} \quad \text{para corpos de prova Tipo B.} \quad (5.4)$$

Os resultados dos ensaios das vigas são dados na tabela 5.7, que apresenta os valores médios da tensão de aderência para deslizamentos de 10 µm e 100 µm. Estes resultados mostram um claro melhoramento da aderência do aço-concreto quando o CAD é usado, e também que, para um dado concreto, há um aumento da tensão de aderência conforme o diâmetro da barra é reduzido. Estes dados originaram o gráfico da figura 5.9, adaptada de LARRARD et al (1993), que relaciona para barras nervuradas, os valores médios da tensão de aderência em função do diâmetro das barras, para diferentes valores de deslizamento.

Tabela 5.7 Tensões médias de aderência, MPa. LARRARD et al (1993).

Deslizamento μm	Concreto de alto desempenho				Concreto comum			
	10		100		10		100	
Sensor	1	2	1	2	1	2	1	2
DEF 10	20,4	29,7	53,6	64,9	12,7	15,5	30,7	35,2
DEF 16	13,6	17,4	37,4	39,8	10,7	13,1	24,3	28,2
DEF 25	10,8	8,5	20,5	24,8	5,7	8,2	15,3	20,1
$d_B = 25$ liso	8,5	11,0	12,1	13,7	6,3	6,7	10,2	12,5

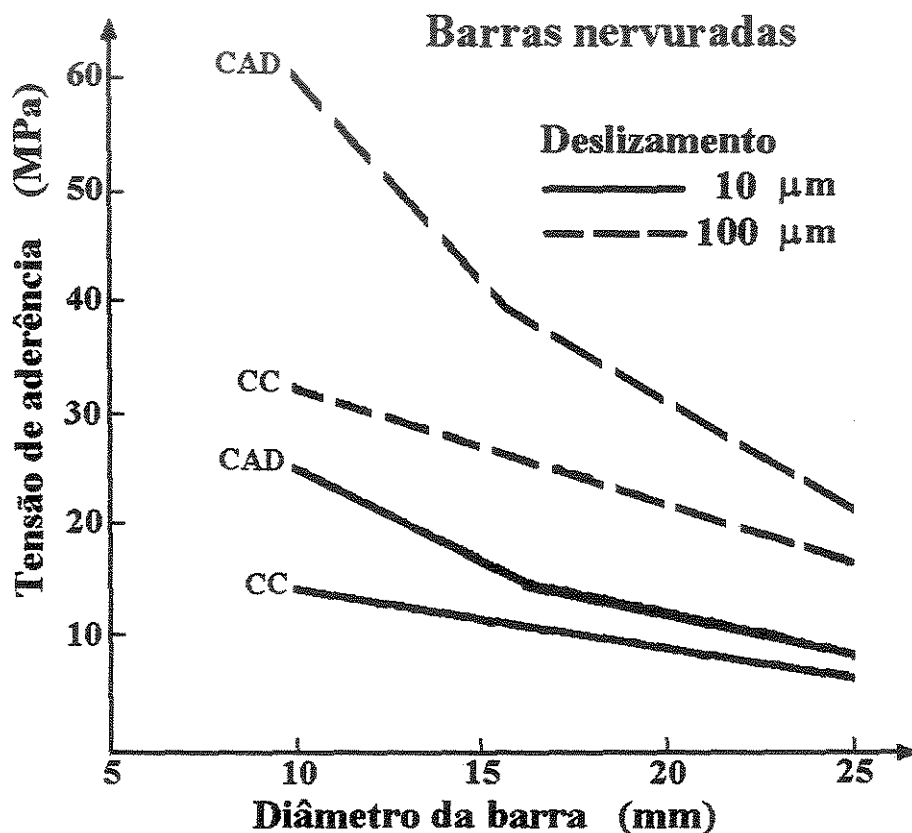


Figura 5.9 Tensão de aderência-diâmetro das barras para diferentes deslizamentos.

LARRARD et al (1993).

Os autores do trabalho, para explicar qualitativamente os resultados observados, primeiro consideram o caso de uma barra envolta em uma grande peça de concreto (distante dos cantos da estrutura), pois é o caso representativo dos ensaios das barras de 10 mm de diâmetro.

O seguinte cálculo foi efetuado usando as equações clássicas de elasticidade linear. Devido a retração do concreto, restringida pelo aço, algumas tensões internas aparecem ao redor da barra (vide figura 5.10). No plano perpendicular ao eixo da barra, as principais tensões são iguais em valores absolutos e são de sinais opostos. A tensão radial é uma tensão de compressão, enquanto a ortoradial é uma tensão de tração. O valor máximo é dado por:

$$\sigma_M = \frac{E_c \cdot E_s}{(1 - 2\nu_s) \cdot E_c + \frac{(1 + \nu_c)}{(1 + \nu_s)} \cdot E_s} \cdot \varepsilon^* \quad (5.5)$$

onde E_c, E_s, ν_c, ν_s e ε^* são os módulos de deformação do concreto e do aço, o coeficiente de Poisson do concreto e do aço, e a retração autógena do concreto, respectivamente. Estes valores não dependem do diâmetro da barra.

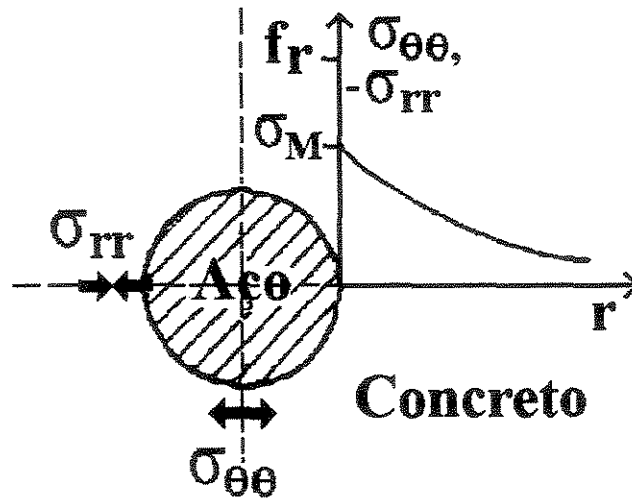


Figura 5.10 Estado de tensão no concreto ao redor da barra; adap. LARRARD et al (1993).

Usando as características dos materiais, medidas previamente no trabalho de LARRARD e MALIER (1989), σ_M foi calculado para os dois concretos (vide tabela 5.8). Os módulos incorporam os efeitos de fissuração após os 28 dias. A retração autógena foi levada em consideração por causa do tamanho dos corpos de prova, para os quais a ação de secagem (cura) pode ter sido negligenciada. Deste modo, o seguinte pode ser observado:

1. As tensões internas de tração devido à retração são muito menores que a resistência do material (para cada concreto), se o módulo de ruptura à tração (f_R) for considerado. Como consequência, a presença de um gradiente de altas tensões em volta da barra produz um padrão comparável com aquele do ensaio de tração na flexão. Nesta situação ideal, não haveria fissuras, ou então haveria um número reduzido delas.

2. O confinamento da barra é criado pelas tensões internas de compressão. Este confinamento é muito mais alto em CAD do que no concreto comum.

Nos casos onde a interface entre o aço e o concreto é submetida a cisalhamento, falhas de aderência ocorrerá por intermédio de ruptura no concreto, já que deslizamentos na zona de transição é impossível devido à presença das nervuras. Esta ruptura é claramente de tração; entretanto, devido a um melhor confinamento, o incremento da máxima tensão de cisalhamento (no dente de concreto, entre as nervuras) é logicamente muito maior que o incremento da tensão de tração para o CAD, comparado com o concreto comum.

Tabela 5.8 Cálculo da tensão interna máxima nos concretos

Concreto	Concreto de alto desempenho	Concreto controle
Módulo** E_c , GPa	37	23
Coefficiente de Poisson ν_c , GPa	0,2	0,2
Retração autógena ε^* , $\mu\text{m/m}$	150	100
Tensão de confinamento σ_M , MPa	5,6	2,4
Módulo de ruptura ⁺ f_R , MPa	7,5	4,5

Aço, $E_s=200$ Gpa e $\nu_s=0,3$. ⁺Módulo de ruptura foi estimado como 1,5 vezes a resistência à tração dada na tabela 5.4. **Módulo de deformação que inclui os efeitos de fissuração aos 28 dias.

Nos casos em que a taxa de armadura aumenta (barras de 25 mm de diâmetro), pode ser mostrado que a tensão de compressão de confinamento decresce enquanto a tensão de tração aumenta. Desta maneira, fissuras aparecem, e, tão logo ocorra o processo de cisalhamento, o confinamento não mais ajudará a aderência entre o aço e o concreto. Para grandes deslizamentos,

o sistema age como se os dentes de concreto fossem ligados pela armadura transversal, e estivessem atritando contra a barra. A força de atrito e o carregamento último de tração da barra são dependentes principalmente da taxa da armadura transversal. Isto é o porque dos carregamentos últimos, relacionados para barras de 16 e 25 mm de diâmetro, serem comparáveis, independentemente da natureza do concreto ou do diâmetro da barra.

Finalmente, as explicações dadas aqui são de natureza essencialmente mecânica. Pode-se argumentar que elas não refletem o papel específico da sílica ativa, a qual tem sido indicada para aumentar a resistência de aderência para um dado nível de resistência à compressão (e tração), GJØRV, MONTEIRO, MEHTA (1990). Mas tem sido mostrado em outros trabalhos, como no de LARRARD e Le ROY (1993), que a sílica ativa conduz a um aumento na retração autógena e a uma redução na deformação por fluência, LARRARD (1990).

Outrossim, é bem sabido que, para um dado aglomerante, a grandeza da retração decresce da pasta para a argamassa e da argamassa para o concreto. Isto poderia explicar a constatação de BÜRGE (1987) concernente a diferentes níveis de melhoramento de aderência na pasta, argamassa e concreto, devido à sílica ativa.

Deste modo, como mencionado na literatura, o papel da sílica ativa é consistente com a tese desenvolvida neste artigo, de que a resistência à tração e as tensões internas de confinamento são os dois fatores principais, controlando a aderência entre o concreto e o aço.

5.2.5 Conclusões dos autores deste trabalho

As investigações da aderência entre o concreto de alto desempenho (contendo sílica ativa e $f_c = 95$ MPa) e a armadura foram conduzidas por meio dos ensaios de viga, padronizado pela RILEM. Ensaios de controle foram realizados em concreto comum ($f_c = 42$ MPa).

O efeito do diâmetro da barra foi enfatizado. A grande influência do efeito de escala no ganho de resistência de aderência obtida com o uso do CAD foi constatado; o ganho é de aproximadamente 80 % com barras nervuradas de 10 mm e 30 % com barras nervuradas de 25 mm.

O melhoramento da aderência pode ser explicado pelo aumento da resistência à tração do concreto, e, em caso de baixa taxa de aço, pelo confinamento devido à retração do concreto.

Influenciado pela presença da armadura transversal, nenhum comportamento frágil foi observado, mesmo para barras de grande diâmetro.

Como continuidade dos estudos os autores sugerem verificar as consequências, do incremento de aderência obtido com o CAD de sílica ativa na fissuração dos grandes elementos estruturais, promovendo estudo de comprimento de aderência, largura e espaçamento na abertura de fissuras. Sugerem também a investigação de casos de fios pré-tensionados.

5.3 USUDA, F. E.; PEIXOTO, A. S. P.; BATELOCHI, R. (1998). Estudo da aderência do aço em concreto de alta resistência (ensaio)

Baseado no ensaio de aderência de aço em concreto comum, conforme recomendações do RC 5, da RILEM/CEB/FIP, foi realizado nos Laboratórios da UNICAMP uma adaptação do ensaio de aderência de aço em concreto de alta resistência. Neste ensaio, tenta-se simular o panorama de tensões que ocorre na região de ancoragem da barra em uma viga de concreto armado, numa situação prática. Torna-se evidente, devido à utilização do concreto de alta resistência, os problemas encontrados neste ensaio. O concreto de maior resistência resultou no incremento da aderência, gerando dificuldades para determinação dos valores de deslizamento entre o aço e o concreto, considerando o ensaio padrão RILEM/CEB/FIP. Esta situação motivou a continuidade dos estudos que redundou na elaboração deste próprio trabalho.

5.3.1 Corpo de prova

Conforme o RC5, o corpo de prova constituiu-se de uma viga formada por dois blocos paralelepípedicos, tendo, na sua parte superior a ser comprimida no ensaio, uma articulação. Na parte inferior da viga, a ser tracionada durante o ensaio, foi moldado com o concreto uma barra de aço de 3/4" (20 mm) de diâmetro.

Cada dimensão do bloco paralelepípedo que compõe a viga é dada em função da dimensão da barra a ser ensaiada. Segundo o ensaio RILEM, o comprimento de aderência deve ser de 10 diâmetros, para barras de diâmetro maior que 16 mm.

Como os trabalhos foram desenvolvidos para concreto de alta resistência, onde a aderência é muito maior que para o concreto comum, foi utilizado um comprimento de aderência igual a 5 diâmetros, o que corresponde no caso, a 100 mm.

A viga de ensaio recebeu a armadura de confinamento para reduzir influências externas, como por exemplo abertura de fissuras, consistindo em armadura de pele e estribos, conforme recomendações da RILEM.

A barra testada foi usada nas mesmas condições em que foi fabricada, sendo cuidadosamente desgordurada e limpa sem haver perda da rugosidade.

Para impor um comprimento de aderência de 5 vezes o diâmetro (100 mm), foram inseridos na barra a ser ensaiada dois tubos plásticos cuja finalidade é limitar a aderência no espaço existente entre eles. Este procedimento foi feito em cada um dos dois lados constituintes do corpo de prova. As extremidades da barra foram torneadas e preparadas com dispositivos para possibilitar o travamento quando se alcançasse o deslizamento de 3 mm, previsto em norma.

5.3.2 Material utilizado e composição do concreto para moldar os corpos de prova

Pedra britada 19 mm: 21kg

Pedrisco: 27 kg

Areia natural 0 – 2 (vide faixa granulométrica da RILEM): 42 kg

Cimento de Alta Resistência Inicial: 24 kg ($C = 475 \text{ kg/m}^3$)

Sílica Ativa: 2,4 kg

Superplastificante: 1,36 litros

a/c: 0,28

Os componentes do concreto foram misturados em uma betoneira de eixo inclinado, de mistura por gravidade (A RILEM recomenda betoneira de eixo vertical, de mistura forçada). Primeiro misturou-se os componentes secos, adicionando-se depois a água e o superplastificante, conforme recomendação da norma. O concreto foi lançado na fôrma de madeira e adensado com o auxílio de um vibrador de bastão. A cura foi executada à temperatura ambiente. O corpo de prova foi coberto com uma capa plástica com a finalidade de prevenir a evaporação da água, mantendo-se esta cobertura até a desforma. O tempo decorrido desde a concretagem até a desforma e o ensaio foram de 20 dias. Instalou-se na parte aparente da barra, entre os dois blocos, dois extensômetros elétricos com a finalidade de se obter a deformação média durante o ensaio.

Com a finalidade de se determinar a resistência do concreto utilizado, foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos, curados pelo mesmo tempo e nas mesmas condições da viga a ser ensaiada. A resistência à compressão obtida para o concreto foi de 88,1 MPa e 86,8 MPa. Neste ensaio foi utilizado uma barra de aço nervurado, CA-50 A, de diâmetro nominal 3/4" (20 mm) e área $A = 285,023 \text{ mm}^2$ (área nominal). Utilizando extensômetros mecânicos, com base de medida igual a 100 mm e precisão de 0,01 mm, realizou-se um ensaio prévio de tração do aço para obtenção do valor da tensão de escoamento e do gráfico tensão-deformação. O escoamento

do aço aconteceu com uma força $F = 150 \text{ kN}$, uma tensão de escoamento $\sigma = 526,3 \text{ MPa}$ e uma deformação específica no escoamento $\epsilon = 0,00280$.

5.3.3 Ensaio

A viga foi colocada sobre apoios articulados, de roletes e carregada também através de roletes por duas cargas iguais, dispostas simetricamente considerando o meio do vão. O carregamento foi aplicado com aumentos sucessivos de cargas iguais a 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, ...kN. A cada aumento, a carga foi mantida por um tempo necessário para que ocorresse a estabilização do deslizamento. Observou-se que a partir de uma certa carga não houve estabilização do deslizamento; as leituras foram, então, feitas dentro do intervalo de acréscimo de carga, no tempo de 2 minutos conforme recomendações da RILEM. Os deslizamentos foram medidos nas duas extremidades da viga com relógio comparador com precisão de 1/100 mm, fixados através de uma base imantada, em chapas coladas na viga. O embolo do relógio comparador ficou conectado na extremidade da barra de aço. Para cada aumento na carga aplicada o total da tensão no aço é dada pela expressão 5.4, conforme as recomendações da RILEM para vigas desta dimensão.

Não ocorreu falha de aderência neste ensaio e o mesmo prosseguiu até escoamento do aço da barra testada.

5.3.4 Resultados

Tendo por base a expressão da RILEM - RC 5 a tensão de aderência foi calculada pela equação 5.2, adaptada para o comprimento de aderência utilizado. A tabela 5.9 apresenta os resultados do ensaio de aderência realizado por USUDA et al (1998).

Tabela 5.9 Resultados do ensaio de aderência. USUDA et al (1998).

P (kN)	ϵ (‰)	Leitura A (mm)	Leitura B (mm)	σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
0	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0
5	0,285	0,000	0,000	26,3	1,3
10	0,385	0,000	0,000	52,6	2,6
15	0,510	0,000	0,000	78,9	3,9
20	0,575	0,000	0,000	105,3	5,3
25	0,680	0,000	0,000	131,6	6,6
30	0,785	0,000	0,000	157,9	7,9
35	0,865	0,000	0,000	184,2	9,2
40	0,960	0,000	0,000	210,5	10,5
45	1,125	0,000	0,000	236,8	11,8
50	1,240	0,000	0,000	263,1	13,2
55	1,350	0,000	0,000	289,5	14,5
60	1,465	0,000	0,030	315,8	15,9
65	1,565	0,000	0,040	342,1	17,1
70	1,725	0,000	0,050	368,4	18,4
75	1,805	0,000	0,060	394,7	19,7
80	1,925	0,030	0,080	421,0	21,1
85	2,025	0,070	0,110	447,3	22,4
90	2,135	0,100	0,130	473,6	23,7
95	2,185	0,130	0,140	499,9	25,0
100	2,305	0,160	0,150	526,3	26,3
105	10,185	0,220	0,190	552,6	27,6
110	10,785	0,250	0,200	578,9	28,9
115	11,785	0,280	0,210	605,2	30,3
120	12,285	0,300	0,215	631,5	31,6
125	13,685	0,360	0,215	657,8	32,9
130	15,185	0,440	0,215	684,2	34,2

Relativo à tabela 5.9, temos:

P = Carregamento Aplicado

ε = Deformação Específica do Aço

Leitura A = Deslizamento Medido no Relógio Comparador A

Leitura B = Deslizamento Medido no Relógio Comparador B

σ_a = Tensão no Aço

τ_b = Tensão de Aderência no Aço

5.3.5 Análise dos resultados

Com os resultados obtidos traçaram-se os gráficos da figura 5.11 adaptado de USUDA et al (1998), onde se observa a proporcionalidade entre a tensão de aderência e o deslizamento, caracterizado pelas retas obtidas nos gráficos, indicando que a barra não perdeu a aderência; se tivesse havido perda da aderência o diagrama teria apresentado um comportamento não linear.

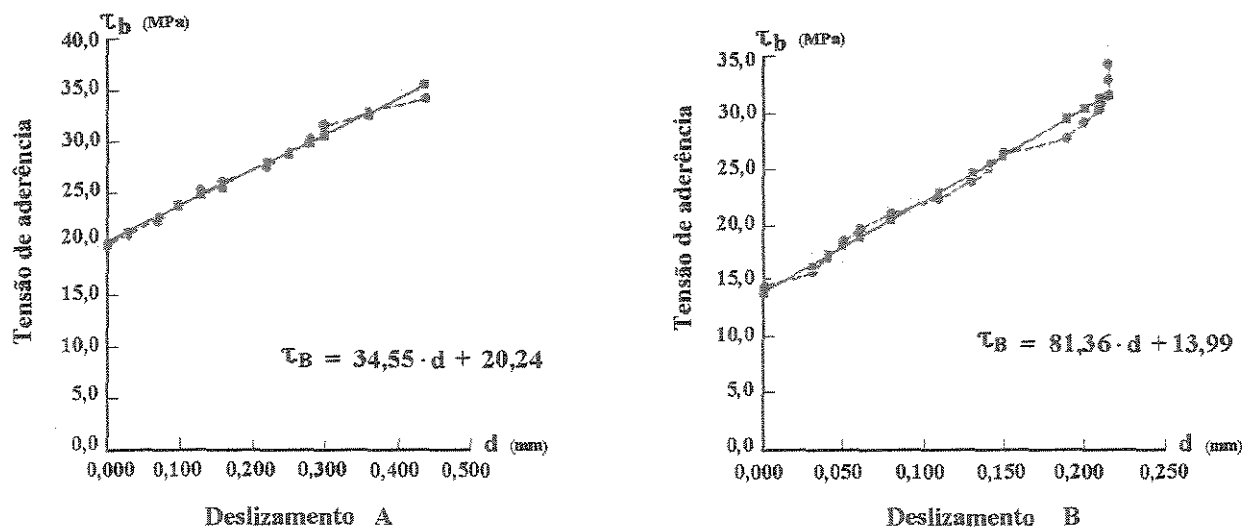


Figura 5.11 Tensão de aderência - deslizamento para o lado A e lado B da viga.

Nota-se que o deslizamento relativo em B não foi mais observado a partir da tensão de aderência 31,6 MPa. Isto pode ser atribuído ao fato de o comprimento de aderência estar super dimensionado e o aço ter entrado em escoamento na região livre no meio do vão.

Considerou-se tentar realizar este ensaio com um comprimento de aderência menor.

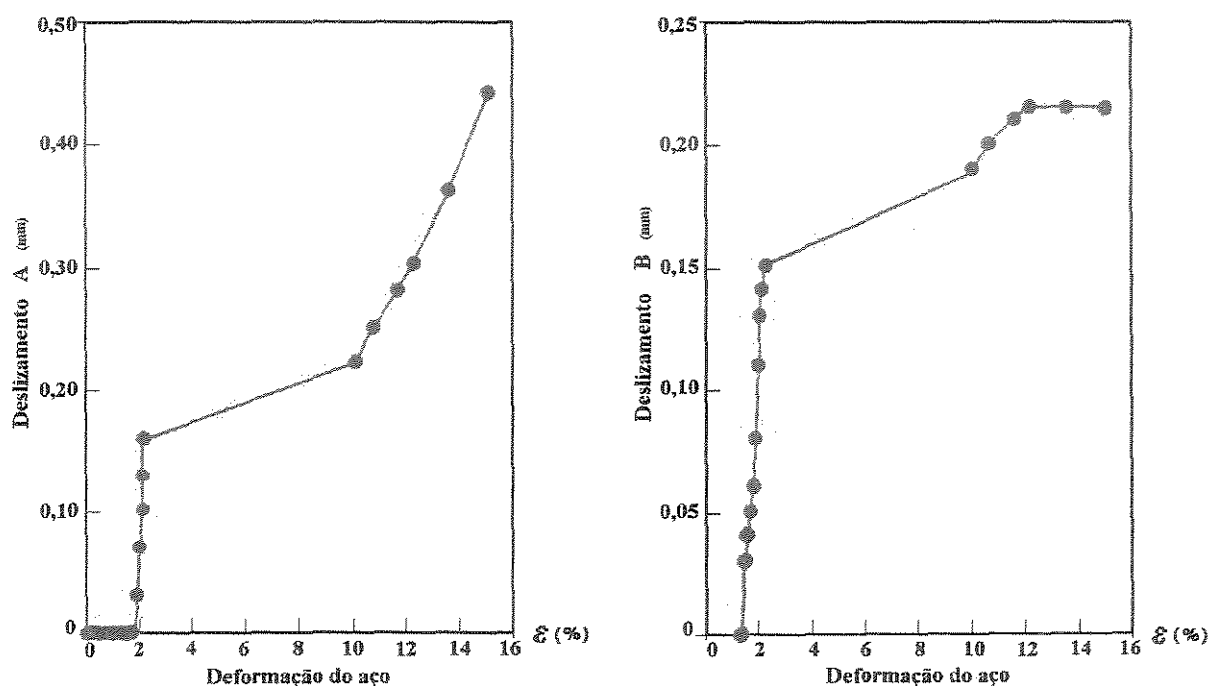


Figura 5.12 Deformação do aço em função do deslizamento para o lado A e lado B da viga.

Nos gráficos da figura 5.12, para o lado A e B da viga, adaptado de USUDA et al (1998), nota-se que o objetivo principal do ensaio não foi alcançado, ou seja, a barra entrou em escoamento antes que o limite convencional de deslizamento (3 mm) fosse atingido.

5.3.6 Considerações sobre o ensaio realizado por USUDA e outros

Baseado no trabalho de USUDA, chega-se às conclusões abaixo relacionadas.

Conclui-se, analisando os resultados deste ensaio, que a barra de aço entrou em escoamento antes que o limite convencional de aderência (3 mm) fosse atingido. Para este concreto de 88 MPa e barra de aço CA 50 A de 3/4" (20 mm), foi utilizado um comprimento de aderência de $5 \phi = 100 \text{ mm}$.

A tensão de aderência é diretamente proporcional ao tipo de concreto utilizado.

O procedimento padrão recomendado pela RILEM, para determinação da aderência de aço para concreto, não pode ser repetido quando a resistência à compressão do concreto utilizado for muito superior à resistência padrão especificada (22,5 a 27,5 MPa).

A alteração do comprimento de aderência analisada, de 10ϕ para 5ϕ , sugerida como única modificação no procedimento padrão da RILEM, não alcançou resultados satisfatórios, uma vez que ocorreu o escoamento da armadura antes do deslizamento convencional padrão.

Pode-se recomendar o abaixo relacionado para continuação do trabalho de USUDA et al, 1998.

Recomenda-se a repetição deste ensaio com um comprimento de aderência em torno de 3ϕ na tentativa de se obter um deslizamento de 3 mm, antes do escoamento da armadura, exigido na norma RC 5/RILEM.

Deve ser considerado que, diminuindo o l_a (comprimento de aderência), potencializa-se todas as outras influências ou interferências externas ao ensaio, como por exemplo, a ocorrência de um vazio de concretagem ou agregados que permaneçam tangentes à barra, ou ainda

impurezas contidas no próprio agregado.

Diminuindo-se o comprimento de aderência, deve-se fazer um estudo do agregado a ser utilizado, que com certeza deve ter o seu tamanho também diminuído.

6 METODOLOGIA E PROGRAMA EXPERIMENTAL

A investigação experimental aqui descrita foi baseada no ensaio de aderência de aço em concreto comum, conforme recomendações do RC 5, da RILEM/CEB/FIP/1978. Para a realização dos ensaios no Laboratório da UNICAMP, algumas modificações foram feitas com o intuito de adaptar o ensaio para a resistência pretendida neste estudo, que está acima da faixa prevista no método da RILEM (resistência média entre 22,5 a 27,5 MPa, medida em corpos de prova cilíndricos).

Entende-se, baseado nos estudos anteriores e também na pesquisa bibliográfica, que a resistência de aderência aumenta proporcionalmente com o aumento da resistência mecânica do concreto. Este fato impossibilita a ocorrência do limite convencional de deslizamento (3 mm) antes do escoamento do aço, quando se utilizam concretos de resistência maior, mantendo-se os comprimentos de aderência determinados pela RILEM. As modificações impostas no estudo dizem respeito à mudança do comprimento de aderência para que se possa estabelecer uma viabilidade de ensaio para concretos em uma faixa de resistência à compressão aos 28 dias que se situa entre 25 MPa e 85 MPa.

O corpo de prova tipo viga consiste em dois blocos paralelepípedicos de concreto armado, interconectados na sua parte inferior pela barra de aço cuja aderência será estudada e na sua parte superior por uma articulação de aço que pode ser observada em detalhe na figura 6.1. Apenas uma parte da barra, objeto do estudo, é ancorada em cada bloco; o restante é isolado do concreto por luvas plásticas, determinando-se o comprimento de aderência l_d que por sua vez depende do diâmetro da barra.

Conforme a RILEM, o comprimento de aderência para barras de diâmetro maior que 16 mm deve ser de 10 vezes este diâmetro. Pelas razões já expostas trabalhamos com três comprimentos de aderência diferentes, 3, 5 e 10 diâmetros, e, como o aço estudado possui 20 mm de diâmetro, os comprimentos de aderência l_d serão de 60, 100 e 200 mm, respectivamente.

O sistema é carregado em flexão simples por duas forças de igual magnitude as quais são dispostas simetricamente, tendo como referência a metade da distância entre os dois apoios da viga. O esquema representativo do ensaio pode ser observado na figura 6.1.

O método da RILEM prescreve que o carregamento deverá ser continuado até que a completa falência da aderência da barra ocorra em ambas as metades da viga; o deslizamento nas duas extremidades da barra deve ser medido. Desta maneira, cada ensaio fornece dois resultados, obtendo-se duas curvas representando o deslizamento da barra de aço em função da carga aplicada na viga.

Como a falha de aderência geralmente não ocorre simultaneamente nas duas metades da viga, é recomendado que sejam colocados dispositivos de travamento junto ao concreto que permita um deslizamento da barra de, no máximo, 3 mm, o qual, ao ser atingido em um dos lados, deve permitir a ocorrência da mesma situação no lado oposto. LARRARD et al (1993), afirmam que, quando o deslizamento entre a barra e o concreto torna-se elevado, ocorre uma flexão substancial, a qual, aplicada no meio da barra, pode causar atrito no topo da mesma com a bainha de plástico, sendo esta a razão pela qual foi considerado, no estudo destes pesquisadores, somente deslizamentos até a ordem de 100 μm .

6.1 Detalhes e dimensões das vigas utilizadas

As dimensões das vigas de ensaio, ou corpos de prova, conforme recomendação da RILEM, variam de acordo com o diâmetro da barra de aço analisada. Esta pesquisa foi realizada

com corpos de prova do tipo B, utilizados para barras de aço de diâmetro maior ou igual a 16 mm. A tabela 6.1 e figura 6.1 dão as dimensões do corpo de prova utilizado nos experimentos, bem como o espaçamento das cargas e pontos de apoio, detalhes da articulação e dimensões da luva plástica utilizada.

Tabela 6.1 Dimensões dos corpos de prova (RILEM)

Corpos de prova	Tipo B
Barras de aço(ϕ em mm)	≥ 16
Comprimento de aderência – l_d (RILEM)	10ϕ
Largura dos blocos de concreto (cm)	15
Altura dos blocos de concreto (cm)	24
Comprimento dos blocos de concreto (cm)	60
Distância entre os blocos de concreto (cm)	6
Comprimento total das vigas (cm)	126
Comprimento das barras de ensaio (cm)	150
Distância entre a linha de centro da barra e a linha de centro da articulação (cm)	15
Distância entre a linha de centro da barra e o lado de baixo da viga (cm)	5
Espaçamento das cargas (cm)	20
Espaçamento dos apoios (cm)	110
Dimensões da articulação de aço (mm)	fig. 6.1

6.1.1 Armadura auxiliar dos corpos de prova

A armadura auxiliar ou de confinamento dos corpos de prova tipo viga se constituiu de barras de aço comum CA 50. A figura 6.2 dá detalhes da armadura de confinamento para vigas tipo B utilizadas na pesquisa, conforme a RILEM RC 5 (1978).

6.1.2 Preparação da barra de aço a ser ensaiada

Os ensaios das barras foram realizados nas condições em que elas são fabricadas, sem a eliminação das nervuras, inteiramente livres de oxidação, e cuidadosamente desengraxadas com acetona líquida. Eventualmente, fotografias da superfície das barras foram tiradas. A limpeza de cada barra ocorreu de modo que não foi provocada mudança na sua conformação geométrica superficial.

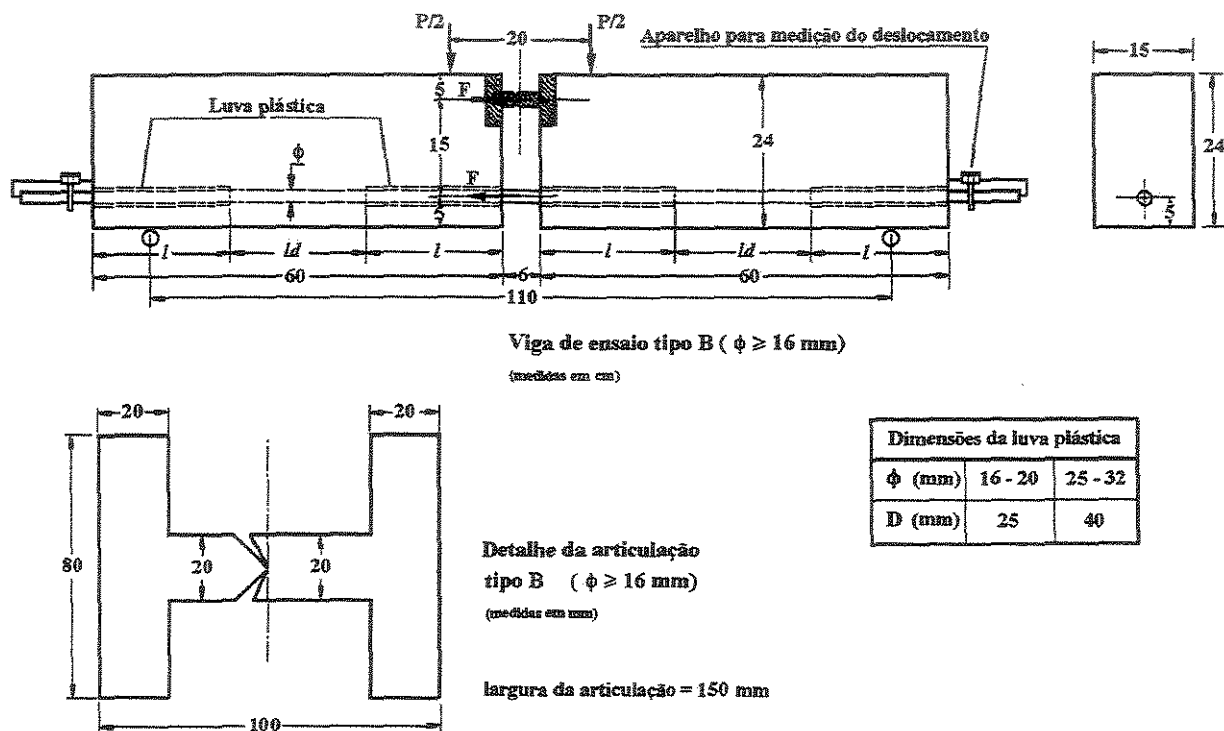


Figura 6.1. Dimensões da viga e detalhe dos equipamentos; adap. RILEM RC 5 (1978).

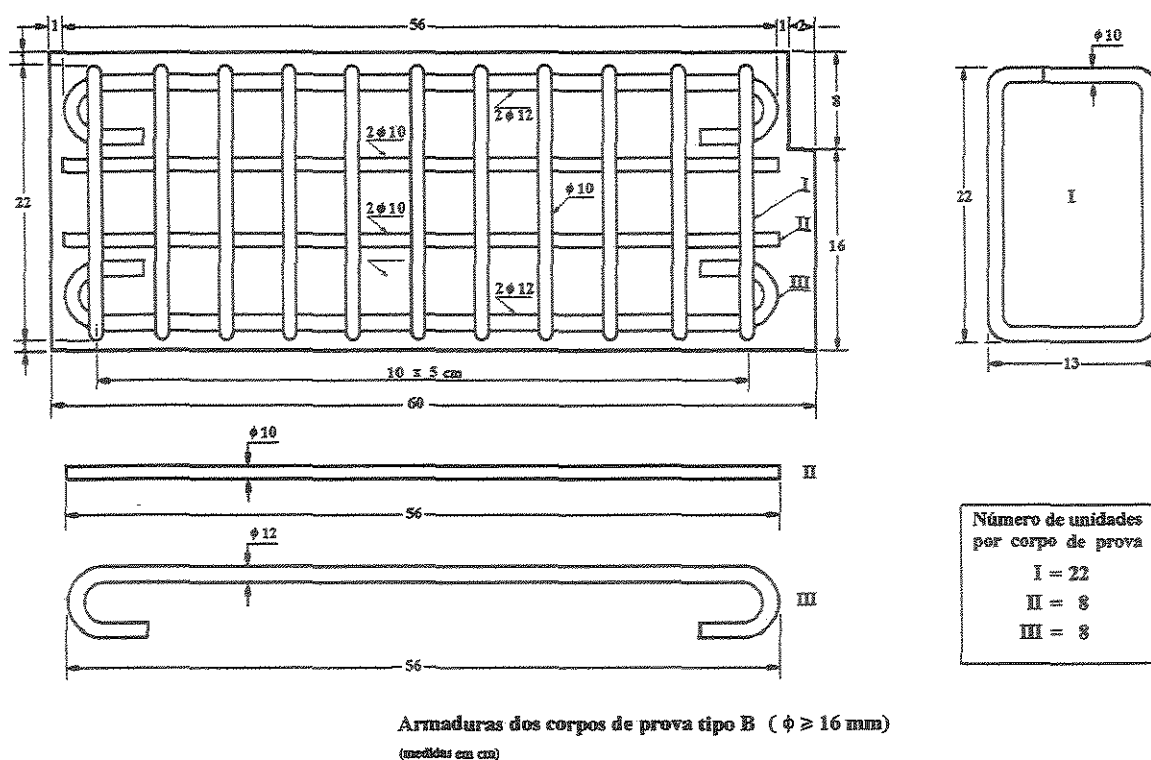


Figura 6.2 Detalhe da armadura auxiliar (de confinamento); adap RILEM RC5 (1978).

6.2 Caracterização dos materiais e preparação dos corpos de prova

Neste item será apresentada a caracterização dos materiais utilizados e a preparação dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa. Sempre que necessário, para efeito de comparação, serão apresentadas as indicações da RILEM RC 5.

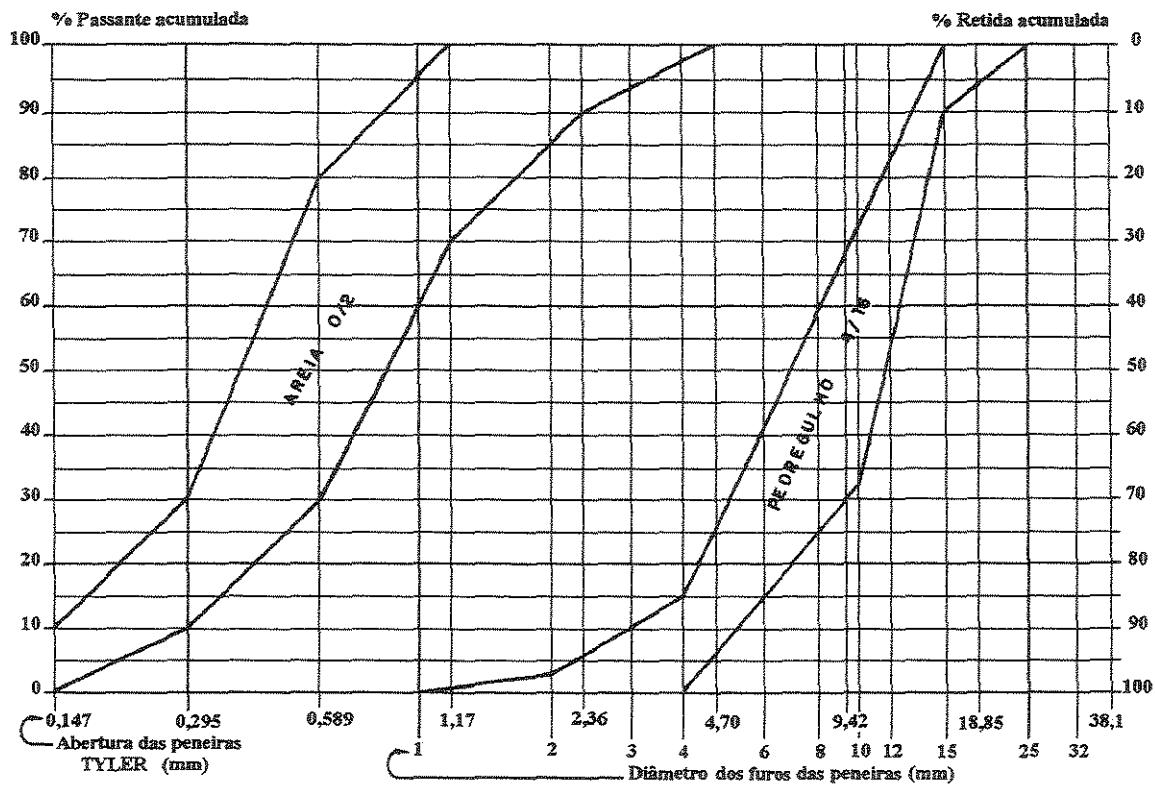
6.2.1 Composição do concreto

A RILEM RC 5 (1978) indica a seguinte composição para o concreto:

Pedregulho 4 - 16 : 1300 Kg (vide faixa granulométrica RILEM na figura 6.3)
 Areia 0 - 2 : 660 Kg (vide faixa granulométrica RILEM na figura 6.3)
 Cimento : 250 Kg (Alta Resistência, 40 MPa, padronizado pela RILEM)
 Água : 165 Kg
 Relação a/c : 0,66

Na norma RILEM, consta que, se necessário, poderá ser adicionado água à mistura para se obter o concreto com a resistência desejada.

As curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo a serem utilizados na pesquisa devem ser mantidas dentro dos limites indicados no gráfico da figura 6.3, conforme recomendação da RILEM, haja vista que a granulometria do agregado é responsável pela compacidade dos concretos e interfere de maneira significativa nos resultados.



Curvas de limites granulométricos - RILEM RC 5

Figura 6.3 Faixas granulométricas dos agregados; adap. RILEM RC 5 (1978).

Para que a areia se enquadrasse na faixa RILEM, baseado no resultado do ensaio e em previsões teóricas, utilizou-se uma peneira de obra equivalente à da série Tyler 4,8 mm, onde se eliminou a fração mais grossa acima da peneira 6,3 mm, reduzindo-se convenientemente o retido na peneira 4,8 mm. Esta previsão teórica se confirmou em ensaios práticos, conforme pode ser observado na tabela 6.2 e gráfico 6.4. O peneiramento realizado também foi apropriado para retirada de impurezas como matérias carbonosas e argilas em torrões, que pudessem vir a comprometer os resultados de ensaio.

O agregado graúdo foi lavado para a retirada do material pulverulento. Baseado nos resultados dos ensaios granulométricos foi calculada teoricamente uma composição que apontou a quantidade de 56 % de brita 0 e 44 % de brita 1, para o enquadramento na faixa da RILEM. Esta previsão teórica se confirmou em ensaios práticos, conforme pode ser observado na tabela 6.3 e gráfico 6.4.

Tabela 6.2 Características granulométricas da areia

Peneira (mm)	% de areia retida acumulada:	
	antes do peneiramento (natural do Rio do Peixe)	depois do peneiramento (peneira de obra $\approx$ 4,8 mm)
9,5	0	0
6,3	3	0
4,8	5	0
2,4	13	8
1,2	30	27
0,6	60	59
0,3	84	85
0,15	96	97
Total	288	276

Tabela 6.3 Características granulométricas das britas 1 e 2 e da composição utilizada.

Peneira (mm)	% retida acumulada		
	Brita 0	Brita 1	Brita 0 = 56% Brita 1 = 44%
19,0	0	0	0
12,5	0	65	26
9,5	0	83	40
6,3	32	97	73
4,8	74	98	94
2,4	93	98	98
1,2	96	98	100
0,6	97	98	100
0,3	98	98	100
0,15	98	98	100
Total	556	671	632

A proposta desta pesquisa é a de utilizar concretos com três classes de resistência à compressão, ou seja, concreto com resistência à compressão de 25, 50 e 85 MPa, portanto, concretos com igual número de materiais, porém, com diferentes proporções. Contudo, tudo que se refere aos materiais, como fabricante e tipo de cimento; fabricante e características da sílica ativa; qualidade, composição granulométrica e mineralógica dos agregados; e água, foram mantidos para todos os concretos. A exceção foi para o concreto na faixa de resistência de 85 MPa, quando houve a necessidade de utilização de aditivo superplastificante.

O concreto foi composto por um Cimento Portland ARI PLUS da Ciminas e sílica ativa da Silmix. Tanto para o agregado gráudo como para o miúdo foi observado o enquadramento na faixa granulométrica da RILEM. Para isso, foram determinadas no laboratório as composições granulométricas de um agregado miúdo composto de uma areia quartzosa de rio e de dois agregados gráudos provenientes de rocha diabásica, brita 0 e brita 1; isso devido à necessidade

evidente de se fazer uma composição para enquadramento na referida faixa.

Os ensaios de aderência utilizando os concretos de resistências na faixa de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa foram realizados, tendo sido usados os materiais já especificados, cuja dosagem para obtenção das resistências desejadas consta em tabelas, no capítulo 7. Estes concretos foram ensaiados conforme o relato do item 6.2.4, tendo sido obtidas as características de resistência, constantes também em tabelas, no capítulo 7. Na dosagem do concreto de 85 MPa foi mantido o proporcionamento dos materiais secos, bem como reduzida, a relação água/cimento e adicionado o aditivo superplastificante Conplast SP430 da Fosroc. O uso de sílica ativa (sem plastificante) no concreto comum objetiva a manutenção do proporcionamento granulométrico dos materiais secos para todos os concretos, de modo que se possa eliminar esta variável em comparações futuras.

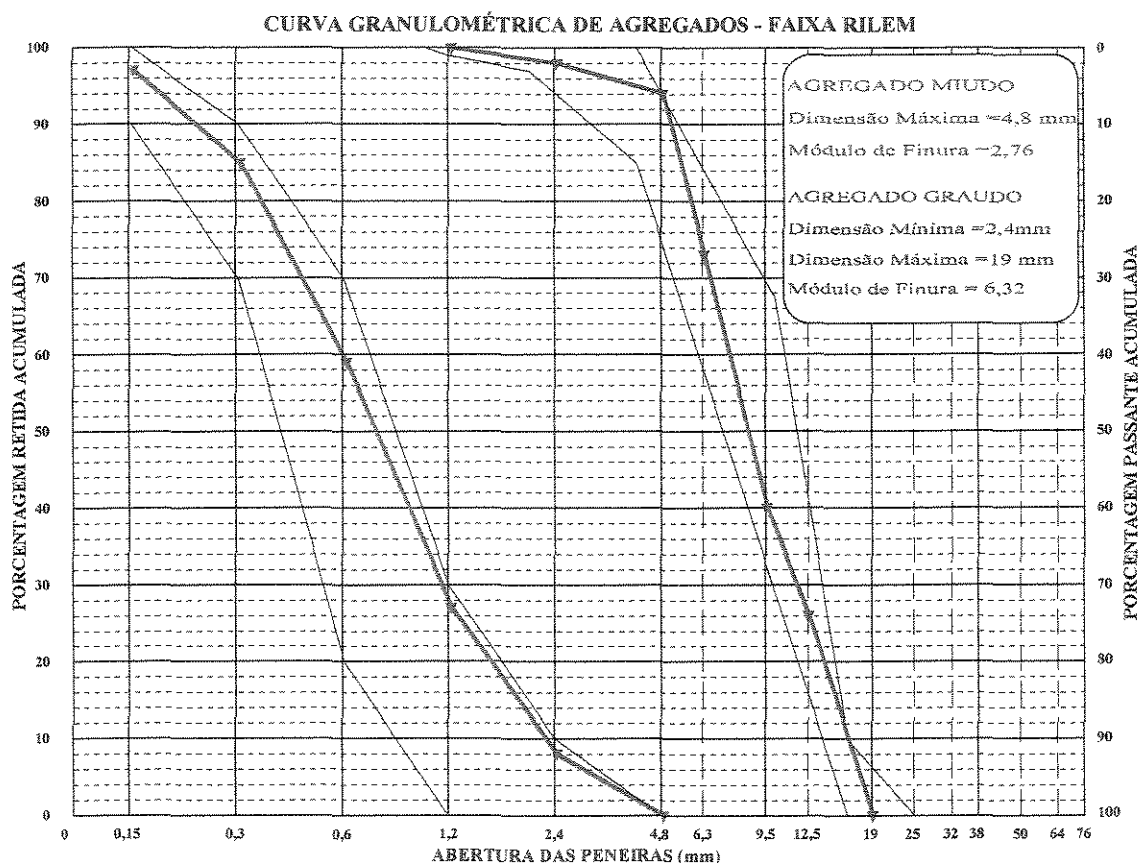


Figura 6.4 Agregado utilizado na pesquisa, dentro da faixa recomendada pela RILEM.

6.2.2 Mistura do concreto

Os constituintes do concreto foram misturados mecanicamente em um misturador de eixo inclinado. O tempo de mistura foi de pelo menos 3 minutos para os componentes secos e por mais 3 minutos depois da água ter sido adicionada.

6.2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

As vigas foram moldadas em posição horizontal (posição em que foram ensaiadas), em fôrmas de madeira impermeabilizada; a altura da última (segunda) camada, conforme recomendação da RILEM, foi igual à largura da viga. O concreto foi adensado com um vibrador de bastão, sendo dado acabamento na superfície aparente, com uma colher de pedreiro.

Depois das fôrmas terem sido preenchidas, foram cobertas com uma capa de plástico para prevenir a evaporação da água, condição em que foram mantidas por um período de cura de 28 dias no mesmo ambiente do laboratório em que foram ensaiadas; tendo sido feita então, a desmoldagem. A desmoldagem e o transporte das vigas para o pórtico em que foram ensaiadas ocorreu sem choques, evitando qualquer deslocamento relativo entre os dois blocos de concreto e que fosse responsável por comprometer a adesão entre a barra de aço e o concreto.

6.2.4 Determinação das resistências dos concretos utilizados

A resistência média do concreto, tanto à compressão quanto à tração, foi verificada em corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm, preparados ao mesmo tempo e curados sob as mesmas condições das vigas ensaiadas.

Para determinação da resistência média à compressão do concreto aos 28 dias, f_{cm28} , foram moldados seis corpos de prova, para cada mistura de concreto, que foram ensaiados por compressão simples, conforme a NBR 5739. A resistência média esteve, para as três situações previstas e conforme proposta deste trabalho, na faixa de 25, 50 e 85 MPa. (a RILEM especifica entre 22,5 e 27,5 MPa para corpos de prova cilíndricos).

Para a determinação da resistência média à tração do concreto aos 28 dias, f_{tm28} , foram moldados três corpos de prova, correspondente a cada mistura de concreto, que foram ensaiados por compressão diametral, conforme a NBR 7222.

Foi determinado, para os três diferentes concretos da pesquisa, o módulo de deformação secante aos 28 dias, conforme a NBR 8522, utilizando-se dois corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm, onde foram colados extensômetros elétricos para determinação das medidas de deformação. Os corpos de prova utilizados para o módulo de deformação secante também foram preparados ao mesmo tempo e curados sob as mesmas condições das vigas ensaiadas.

6.2.5 Características do aço utilizado no ensaio de aderência

A figura 6.5 mostra as características de conformação geométrica superficial do aço utilizado nesta pesquisa. A figura representa uma montagem do mesmo pedaço de aço, fotografado em três posições diferentes com o intuito de mostrar as nervuras longitudinais, paralelas ao eixo da barra, em número de quatro. Pode-se observar, também, as nervuras transversais que abragem a totalidade do perímetro da seção transversal da barra e surgindo a cada 15 mm (0,75 do diâmetro nominal). As barras utilizadas são caracterizadas, quanto à forma, como de nervuras transversais anulares, formando com o eixo da barra um ângulo de 90°.

Quanto à configuração geométrica, este aço obedece portanto, as especificações da NBR 7480, onde consta que as barras devem ter pelo menos duas nervuras longitudinais

contínuas, espaçamento médio entre as nervuras entre 0,5 e 0,8 do diâmetro nominal, e eixo das nervuras transversais ou oblíquas com ângulo superior ou igual a 45° em relação à direção do eixo da barra.

Abaixo, na tabela 6.4, estão relacionadas as características, determinadas em ensaio, do aço CA 50 A, com patamar de escoamento, marca DEDINI: diâmetro nominal do aço ($\phi_{aço}$); área calculada da seção transversal da barra (A); deformação no aço para a tensão de escoamento (ϵ_y); tensão de escoamento do aço (f_y); módulo de deformação longitudinal do aço (E_s).

Tabela 6.4 Características do aço utilizado no ensaio de aderência.

Aço	$\phi_{aço}$	A	ϵ_y	f_y	E_s
CA 50	20 mm	308,27 mm ²	2,55 ‰	515,8 MPa	202,0 Gpa

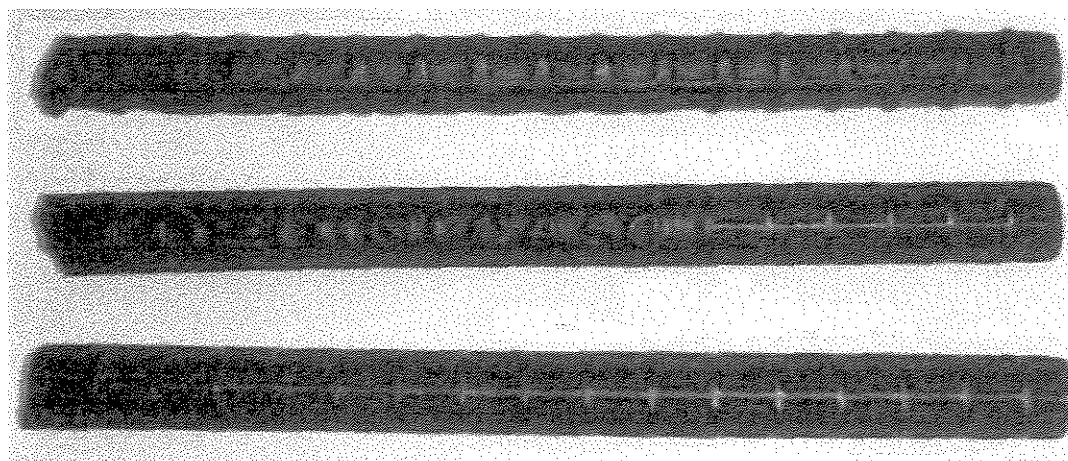


Figura 6.5 Conformação geométrica superficial do aço usado na pesquisa.

6.3 Execução do ensaio de aderência

As vigas de ensaio, apoiando-se sobre dois apoios móveis constituídos de roletes cilíndricos, foram carregadas à flexão simples por duas cargas de igual magnitude, cada uma de

um lado da articulação, estando dispostas simetricamente em relação ao centro de gravidade do conjunto. A aplicação da carga foi feita, também, através de roletes cilíndricos móveis.

O carregamento foi realizado com cargas sucessivas P , iguais a 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55,kN, de forma que a barra de aço fosse submetida a tensões σ_a , para cada carga aplicada ao corpo de prova. A tensão no aço é dada pela expressão seguinte, onde A designa a área calculada da seção transversal da barra ensaiada:

$$\sigma_a = \frac{1,50 \cdot P}{A} \quad \text{para corpos de prova do tipo B } (\phi \geq 16 \text{ mm}) \quad (6.1)$$

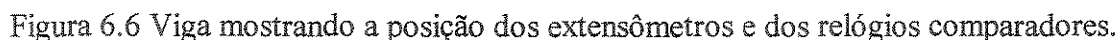
Conforme recomendação da RILEM o incremento de carga de P_i para P_{i+1} deve ser conseguido em meio minuto. A cada acréscimo, a carga deve ser mantida constante por um intervalo de tempo necessário para que a estabilização do deslocamento seja atingida; ou então a carga deve ser mantida por até 2 minutos, quando é feita a leitura do deslizamento.

O teste será continuado até que ocorra a ruptura completa da aderência da barra em ambas as metades da viga ou até a ruptura da barra.

A ruptura da aderência geralmente não ocorre simultaneamente nas duas metades da viga. Por esta razão, no instante em que uma das metades da barra cuja aderência tenha decaído, atingindo um deslocamento de 3 mm (limite conforme a RILEM), deverá ser contida por um dispositivo de segurança, constituído de porcas e arruelas, o qual, conectado junto ao concreto, seja capaz de impedir qualquer deslocamento adicional. O ensaio pode então ser continuado até que a completa ruptura de aderência ocorra na segunda metade da viga.

Os valores do deslocamento relativo entre o aço e o concreto e as deformações no aço foram medidos para cada incremento de carga, e em cada lado da viga por meio de extensômetros (conforme a RILEM, os extensômetros devem permitir leituras de 1/100 mm). Os relógios comparadores, para registrar os deslocamentos, foram fixados, através de base imantada, em cada uma das extremidades da viga, onde foram coladas para esta finalidade chapas de aço.

O croqui da figura 6.6 mostra a posição dos extensômetros elétricos colados na barra para que se pudesse fazer as medições necessárias. Os colocados na parte central (E01 e E02), que corresponde à parte aparente da barra de aço entre os dois blocos, têm a finalidade de monitorar o comportamento do aço, principalmente para verificar a permanência do mesmo dentro do seu domínio elástico durante o ensaio. Dentro de cada bloco de concreto, protegidos pela mangueira plástica, foram colocados na barra outros dois extensômetros, o primeiro antes da zona de aderência (E3 e E4) e o segundo após esta (E1 e E2) com a finalidade de monitorar possíveis transmissões de esforços nestes locais, durante o ensaio. Os relógios R1 e R2 mediram o deslizamento nas duas extremidades da viga. Para efeito de identificação, conforme a numeração utilizada, determinamos um lado ímpar e um lado par para a viga. Foram adotados comprimentos de aderência l_d , com valores de 3ϕ , 5ϕ e 10ϕ , para as três vigas ensaiadas.



7 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na parte experimental deste trabalho.

Conforme proposto e relatado no capítulo 6, foram realizados os ensaios de verificação da aderência para concretos de resistência média à compressão na faixa de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa; nas três situações usou-se comprimento de aderência igual a 3 vezes o diâmetro da barra (3 ϕ), 5 vezes o diâmetro da barra (5 ϕ) e 10 vezes o diâmetro da barra (10 ϕ). O deslizamento relativo devido ao incremento de carga aplicada foi medido, para cada caso, nas extremidades das duas semi-vigas em relação à parte aparente da barra. Para os concretos de 25 MPa e 50 MPa, em um dos lados do corpo de prova, a gravação dos dados foi feita automaticamente; no outro, por falta de equipamento, a aquisição dos dados foi feita mecanicamente. Para o concreto de 85 MPa, devido à compra do equipamento pelo laboratório, a aquisição de dados foi feita automaticamente em ambos os lados da viga. (as situações estão identificadas em cada tabela e gráfico). As curvas das figuras 7.1, 7.2, 7.3, 7.5, 7.6, 7.7, 7.9, 7.10 e 7.11, descrevem a evolução de cada ensaio.

Em cada ensaio as vigas foram colocadas sobre apoios articulados de roletes e carregadas também através de roletes por duas cargas iguais dispostas simetricamente considerando o meio do vão. O carregamento foi aplicado com aumentos sucessivos de cargas, produzindo os valores finais a 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 ...kN. Para cada aumento na carga aplicada, o total da tensão no aço é dada pela expressão 6.1, conforme as recomendações da RILEM para vigas da dimensão utilizada.

Tendo por base a expressão da RILEM - RC 5 (1978), a tensão de aderência foi adaptada para cada comprimento de aderência utilizado, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\tau_b = \frac{\sigma_a \cdot A}{\pi \cdot \phi \cdot l_d} \quad (7.1)$$

As notações seguintes foram utilizadas nas tabelas 7.3, 7.4, 7.5, 7.9, 7.10, 7.11, 7.15, 7.16 e 7.17.

P = Carga aplicada

R₁ = Deslizamento (medido no relógio comparador R1). (lado ímpar da viga)*

R₂ = Deslizamento (medido no relógio comparador R2). (lado par da viga)*

ε₀ = Deformação específica do aço (extensômetros E0). (parte livre entre os blocos)*

ε₁ = Deformação específica do aço (extensômetro E1) (depois da região de aderência)*

ε₂ = Deformação específica do aço (extensômetro E2). (depois da região de aderência)*

ε₃ = Deformação específica do aço (extensômetro E3). (antes da região de aderência)*

ε₄ = Deformação específica do aço (extensômetro E4). (antes da região de aderência)*

σ_a = Tensão no aço

τ_b = Tensão de aderência

*Veja posição na figura 6.6

7.1 Resultados obtidos para vigas de concreto com resistência média na faixa de 25 MPa

Nas tabelas 7.1 e 7.2 apresenta-se a composição, as quantidades de materiais utilizados e as características mecânicas do concreto para determinação da aderência na faixa de 25 MPa de resistência média à compressão aos 28 dias de idade. Na prática, obteve-se um concreto

com 26,1 MPa de resistência média à compressão, portanto bem próximo do proposto.

Tabela 7.1 Composição do concreto de 25 MPa

Materiais	Quantidade (kg/m ³)
Cimento	410
Sílica ativa	41
Areia	660
Brita 0	689
Brita 1	541
Água	348,5
Água/cimento	0,85
Água/aglomerante	0,77

Tabela 7.2 Propriedades mecânicas e de trabalhabilidade do concreto na faixa de 25 MPa

Propriedade	Valor médio obtido
Resistência à compressão $f_{cm\ 28}$	26,1 MPa
Resistência à tração $f_{tm\ 28}$	2,5 MPa
Módulo de deformação $E_{sec\ 0,4}$	20,3 GPa
Abatimento	240 mm

7.1.1 Resultados para barras com comprimento de aderência de 3 ϕ : considerações sobre o ensaio

A equação padrão 7.1, para cálculo da tensão de aderência, foi adaptada para o comprimento de aderência de 3 ϕ , resultando na equação 7.2:

$$\tau_b = \frac{\sigma_a \cdot A}{\pi \cdot \phi \cdot ld} = \frac{\sigma_a \cdot \pi \cdot \phi^2}{4 \cdot \pi \cdot \phi^2 \cdot 3} = \frac{\sigma_a}{12} \quad (7.2)$$

A tabela 7.3 apresenta os resultados de deformação específica do aço e deslizamentos obtidos durante o ensaio. Tem-se em seguida o resultado da tensão no aço σ_a e da tensão de aderência τ_b para cada incremento de carga. Com os valores de carga e deslizamento obtidos no ensaio, construiu-se o gráfico da figura 7.1, que permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 3ϕ e concreto na faixa de resistência à compressão de 25 MPa.

Tabela 7.3 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 3ϕ ($f_{c28} = 25$ MPa)

P (kN)	ext. mec.	ext. elet..	vão livre	depois comp. ader.		antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R ₁ (μm)	R ₂ (μm)	ε ₀ (‰)	ε ₁ (‰)	ε ₂ (‰)	ε ₃ (‰)	ε ₄ (‰)		
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
5	0	12	0,08	0,00	0,00	0,15	0,13	24,3	2,0
10	5	12	0,18	0,00	0,00	0,28	0,26	48,7	4,1
15	60	12	0,27	0,00	0,00	0,40	0,37	73,0	6,1
20	160	308	0,37	0,00	0,00	0,53	0,50	97,3	8,1
25	300	605	0,44	0,00	0,00	0,64	0,60	121,6	10,1
30	500	1330	0,46	0,00	0,00	0,75	0,68	146,0	12,2
35	700	2723	0,38	0,00	0,08	0,79	0,70	170,3	14,2
40	1300	2802	0,42	0,00	0,25	0,88	0,79	194,6	16,2
45	2100	2904	0,38	0,13	0,39	0,94	0,85	219,0	18,3
50	3000	2964	0,52	0,35	0,55	1,09	0,98	243,3	20,3
55	3000	3049	0,65	0,52	0,70	1,21	1,10	267,6	22,3

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

O deslizamento limite ocorreu primeiro do lado do relógio comparador R2; acontecendo o travamento deste lado, o deslizamento se completou no lado R1.

O extensômetro E02 apresentou problemas, não fornecendo leituras; ε_0 , deformação do aço na parte livre da barra entre os blocos, foi calculada somente considerando o extensômetro E01 a despeito de que este provavelmente também apresentou problemas se comparado com os valores de ε_3 e ε_4 , deformações oriundas dos dados obtidos dos extensômetros E3 e E4 situados antes do comprimento de aderência. De qualquer maneira, o aço não entrou em escoamento até o fim do ensaio, quando se atingiu um deslizamento de 3,000 mm para R1 e 3,049 mm para R2.

Conforme os resultados de ensaio do aço usado na pesquisa, já apresentados no capítulo 6, os mesmos mostram uma tensão de escoamento f_y de 515,8 MPa, verificando neste momento uma deformação específica ε_y de 2,55 ‰. Tal tensão na barra, considerando as solicitações presentes no ensaio, ocorreria com uma carga P de aproximadamente 106,0 kN ao passo que temos uma carga máxima de 55 kN no fim do ensaio. As deformações específicas ε_0 , ε_3 e ε_4 são respectivamente 0,65, 1,21 e 1,10 ‰ estando também longe da deformação específica correspondente ao início do escoamento, apresentada no ensaio de caracterização do aço.

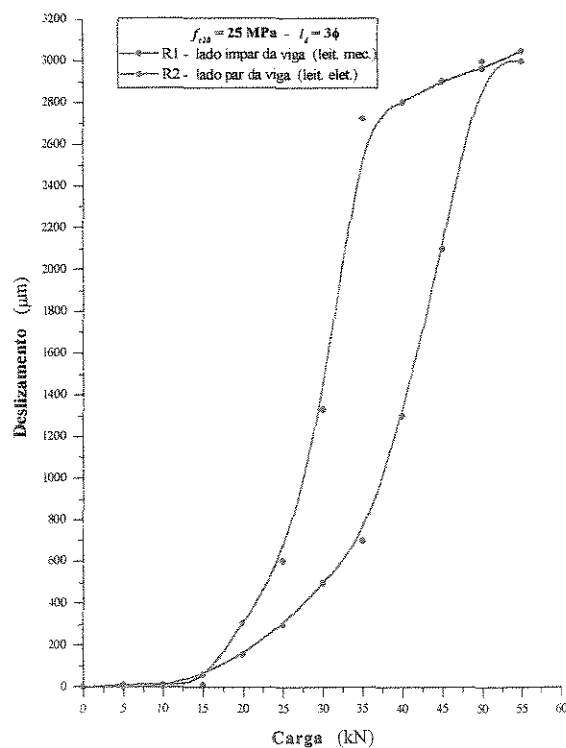


Figura 7.1 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 3 φ ($f_{c28} = 25$ MPa).

7.1.2 Resultados para barras com comprimento de aderência de 5 ϕ : considerações sobre o ensaio

A equação padrão 7.1, para cálculo da tensão de aderência, foi adaptada para o comprimento de aderência de 5 ϕ , resultando na equação 7.3:

$$\tau_b = \frac{\sigma_a \cdot A}{\pi \cdot \phi \cdot ld} = \frac{\sigma_a \cdot \pi \cdot \phi^2}{4 \cdot \pi \cdot \phi^2 \cdot 5} = \frac{\sigma_a}{20} \quad (7.3)$$

A tabela 7.4 apresenta os resultados de deformação específica do aço e deslizamentos obtidos durante o ensaio, a tensão no aço σ_a e a tensão de aderência τ_b para cada incremento de carga. Isto resultou no gráfico da figura 7.2, que permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 5 ϕ e concreto na faixa de resistência de 25 MPa.

Tabela 7.4 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 5 ϕ ($f_{c28} = 25$ MPa)

P (kN)	ext. mec.	ext. elet..	vão livre	depois comp. ader.		antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R_1 (μm)	R_2 (μm)	ϵ_0 (‰)	ϵ_1 (‰)	ϵ_2 (‰)	ϵ_3 (‰)	ϵ_4 (‰)		
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
5	0	1	0,17	0,00	0,00	0,14	0,15	24,3	1,2
10	0	2	0,31	0,00	0,00	0,27	0,32	48,7	2,4
15	0	2	0,45	0,00	0,00	0,41	0,47	73,0	3,7
20	0	107	0,62	0,00	0,00	0,56	0,64	97,3	4,9
25	20	202	0,78	0,00	0,00	0,71	0,80	121,6	6,1
30	80	262	0,94	0,00	0,00	0,86	0,96	146,0	7,3
35	200	425	1,15	0,00	0,00	1,01	1,13	170,3	8,5
40	440	664	1,38	0,00	0,00	1,17	1,30	194,6	9,7
45	750	1026	1,60	0,00	0,00	1,32	1,45	219,0	11,0
50	1000	2041	1,90	0,00	0,00	1,46	1,61	243,3	12,2
55	3000	3306	2,36	0,00	0,41	1,62	1,81	267,6	13,4

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

O deslizamento limite ocorreu primeiro do lado do relógio comparador R2 (3,306 mm); havendo o travamento deste lado o deslizamento se completou no lado R1 (3,000 mm).

O extensômetro E02 apresentou defeito, caracterizado por leituras bastante incoerentes; ε_0 , deformação do aço na parte livre da barra entre os blocos, foi calculada somente com base no E01 que apresenta valores próximos de E3 e E4 (vide ε_3 e ε_4) situados antes do comprimento de aderência. O ensaio prosseguiu até o fim sem ocorrer o escoamento do aço, conforme pode ser observado pela deformação específica máxima ε_0 de 2,36 ‰ ocorrida para carga de 55 kN, se compararmos com os resultados da caracterização do aço quando o escoamento ocorreu para uma deformação específica ε_s 2,55 ‰.

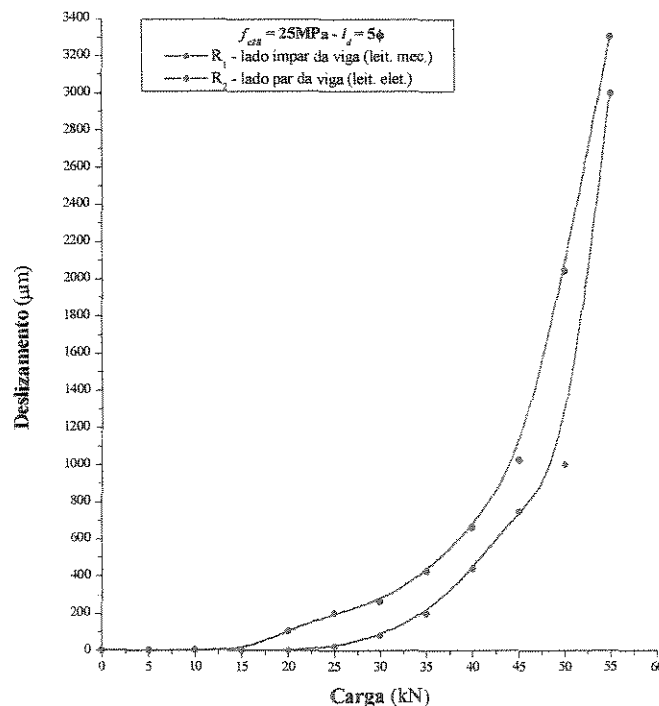


Figura 7.2 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 5 ϕ ($f_{c28} = 25$ MPa).

7.1.3 Resultados para barras com comprimento de aderência de 10 ϕ : considerações sobre o ensaio

A equação padrão 7.1, para cálculo da tensão de aderência, foi adaptada para o comprimento de aderência de 10 ϕ , resultando na equação 7.4

$$\tau_b = \frac{\sigma_a \cdot A}{\pi \cdot \phi \cdot l_d} = \frac{\sigma_a \cdot \pi \cdot \phi^2}{4 \cdot \pi \cdot \phi^2 \cdot 10} = \frac{\sigma_a}{40} \quad (7.4)$$

A tabela 7.5 apresenta os resultados de deformação específica do aço e deslizamento obtidos durante o ensaio. Em seguida, tem-se o resultado da tensão no aço σ_a e tensão de aderência τ_b para cada incremento de carga.

Com os valores de carga e deslizamento obtidos no ensaio, construiu-se o gráfico da figura 7.3, que permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 10 ϕ e concreto na faixa de resistência à compressão de 25 MPa.

Tabela 7.5 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 10 ϕ ($f_{c28}=25$ MPa)

P (kN)	ext. mec.	ext. elet..	vão livre	depois comp. ader.		antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R_1 (μm)	R_2 (μm)	ϵ_0 (%)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)	ϵ_3 (%)	ϵ_4 (%)		
0	0	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
5	0	1		0,00	0,00	0,16	0,15	24,3	0,6
10	0	1		0,00	0,00	0,30	0,28	48,7	1,2
15	0	1		0,00	0,00	0,44	0,41	73,0	1,8
20	4	1		0,00	0,00	0,58	0,55	97,3	2,4
25	19	1		0,00	0,00	0,73	0,68	121,6	3,0
30	50	1		0,00	0,00	0,87	0,82	146,0	3,7
35	90	1		0,00	0,00	1,02	0,99	170,3	4,3
40	147	1		0,00	0,00	1,13	1,08	194,6	4,9
45	320	1		0,00	0,00	1,27	1,22	219,0	5,5
50	335	137		0,00	0,00	1,37	1,34	243,3	6,1
55	500	170		0,00	0,00	1,49	1,45	267,6	6,7
60	720	231		0,00	0,01	1,55	1,53	292,0	7,3
65	950	296		0,00	0,01	1,68	1,66	316,3	7,9
70	1300	366		0,00	0,02	1,77	1,75	340,6	8,5
75	1700	497		0,00	0,02	1,88	1,85	364,9	9,1
80	2700	571		0,00	0,02	2,00	1,93	389,3	9,7
85	2700	737		0,00	0,03	2,07	2,03	413,6	10,3
90	2700	2949		0,41	0,05	2,06	1,99	437,9	11,0

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

O deslizamento limite ocorreu primeiro do lado R_1 (2,700 mm) sendo completado em seguida do lado R_2 (2,949 mm). As leituras apresentadas pelos extensômetros E01 e E02 não são confiáveis, pois o primeiro apresentou valores bastante altos enquanto que o segundo valores relativamente baixos. Portanto, não temos valores para a deformação específica do aço ϵ_0 ,

na parte livre entre os blocos. No entanto, os extensômetros E3 e E4, situados antes do comprimento de aderência apresentaram valores próximos e coerentes conforme pode ser observado para as deformações ε_3 e ε_4 , 2,06 e 1,99 (‰), respectivamente. De qualquer modo, o ensaio prosseguiu até o fim, com deslizamentos próximos de 3,00 mm com uma carga de 90 kN sem que ocorresse o escoamento do aço.

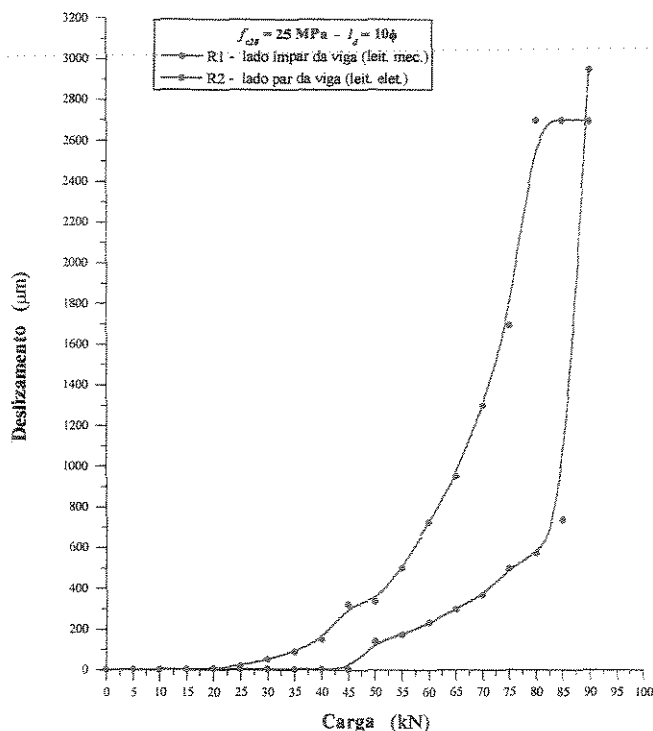


Figura 7.3 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 10ϕ ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$)

7.1.4 Tensões de aderência para um determinado deslizamento em função do comprimento de aderência

Para cada comprimento de aderência, a tabela 7.6, mostra as cargas para diferentes valores de deslizamento, lidos pelos relógios comparadores R1 e R2, nas duas semi-vigas de cada corpo de prova. Em seguida, temos os valores médios destas cargas, que possibilitou o cálculo

dos valores correspondentes, de tensão no aço e tensão de aderência, em função de cada valor de deslizamento.

Tabela 7.6 Cargas, tensões no aço e tensões de aderência, em função de diferentes valores de deslizamento, para cada comprimento de aderência utilizado ($f_{c28} = 25$ MPa)

S (μ m)	Carga (kN)									σ_a (MPa)			τ_b (Mpa)		
	R ₁	R ₂	Méd.	R ₁	R ₂	Méd.	R ₁	R ₂	Méd						
	3 ϕ			5 ϕ			10 ϕ			3 ϕ	5 ϕ	10 ϕ	3 ϕ	5 ϕ	10 ϕ
10	9,43	5,33	7,38	21,68	13,67	17,68	21,50	43,61	32,56	35,9	86,1	158,6	3,0	4,3	4,0
50	13,78	14,64	14,21	27,28	17,16	22,22	30,04	46,57	38,31	69,2	108,2	186,6	5,8	5,4	4,7
100	16,99	16,09	16,54	30,51	19,74	25,13	35,73	48,91	42,32	80,6	122,4	206,1	6,7	6,1	5,2
150	19,29	17,19	18,24	32,72	22,36	27,54	39,21	52,29	45,75	88,8	134,1	222,8	7,4	6,7	5,6
200	21,32	18,11	19,72	34,43	25,17	29,80	41,32	57,41	49,37	96,0	145,1	240,4	8,0	7,3	6,0
250	23,15	19,02	21,09	35,80	28,49	32,15	43,10	61,43	52,27	102,7	156,6	254,6	8,6	7,8	6,4
300	24,73	19,88	22,31	36,97	30,84	33,91	45,34	65,27	55,31	108,7	165,1	269,4	9,1	8,3	6,7
350	26,14	20,71	23,43	38,04	32,58	35,31	49,46	68,63	59,05	114,1	172,0	287,6	9,5	8,6	7,2
400	27,50	21,50	24,50	39,01	34,02	36,52	51,79	71,19	61,49	119,3	177,9	299,5	9,9	8,9	7,5
450	28,75	22,27	25,51	39,99	35,29	37,64	53,38	73,31	63,35	124,2	183,3	308,5	10,4	9,2	7,7
500	30,00	22,96	26,48	40,86	36,47	38,67	54,71	75,60	65,16	129,0	188,3	317,3	10,8	9,4	7,9
600	32,29	24,18	28,24	42,60	38,48	40,54	57,26	80,54	68,90	137,5	197,4	335,5	11,5	9,9	8,4
700	34,07	25,21	29,64	44,31	40,22	42,27	59,56	82,51	71,04	144,4	205,9	346,0	12,0	10,3	8,7
800	35,36	26,10	30,73	46,06	41,73	43,90	61,75	83,42	72,59	149,7	213,8	353,5	12,5	10,7	8,8
900	36,43	26,86	31,65	47,40	42,93	45,17	63,71	84,09	73,90	154,1	220,0	359,9	12,8	11,0	9,0
1000	37,36	27,54	32,45	48,30	43,94	46,12	65,49	84,59	75,04	158,0	224,6	365,4	13,2	11,2	9,1
1500	41,14	30,25	35,70	50,85	47,26	49,06	72,36	86,49	79,43	173,9	238,9	386,8	14,5	11,9	9,7
2000	44,29	32,43	38,36	52,39	49,64	51,02	76,27	87,77	82,02	186,8	248,5	399,4	15,6	12,4	10,0
2500	47,29	34,93	41,11	53,76	51,79	52,78	79,68	89,00	84,34	200,2	257,0	410,7	16,7	12,9	10,3

As curvas da figura 7.4, para diferentes valores de deslizamento, relacionam tensões de aderência com os comprimentos de aderência utilizados nos ensaios. Foram construídas com o intuito de relacionar o incremento de tensões em função da variação do comprimento de aderência e mostrar a tendência de comportamento das mesmas com a finalidade de orientar os próximos passos da pesquisa.

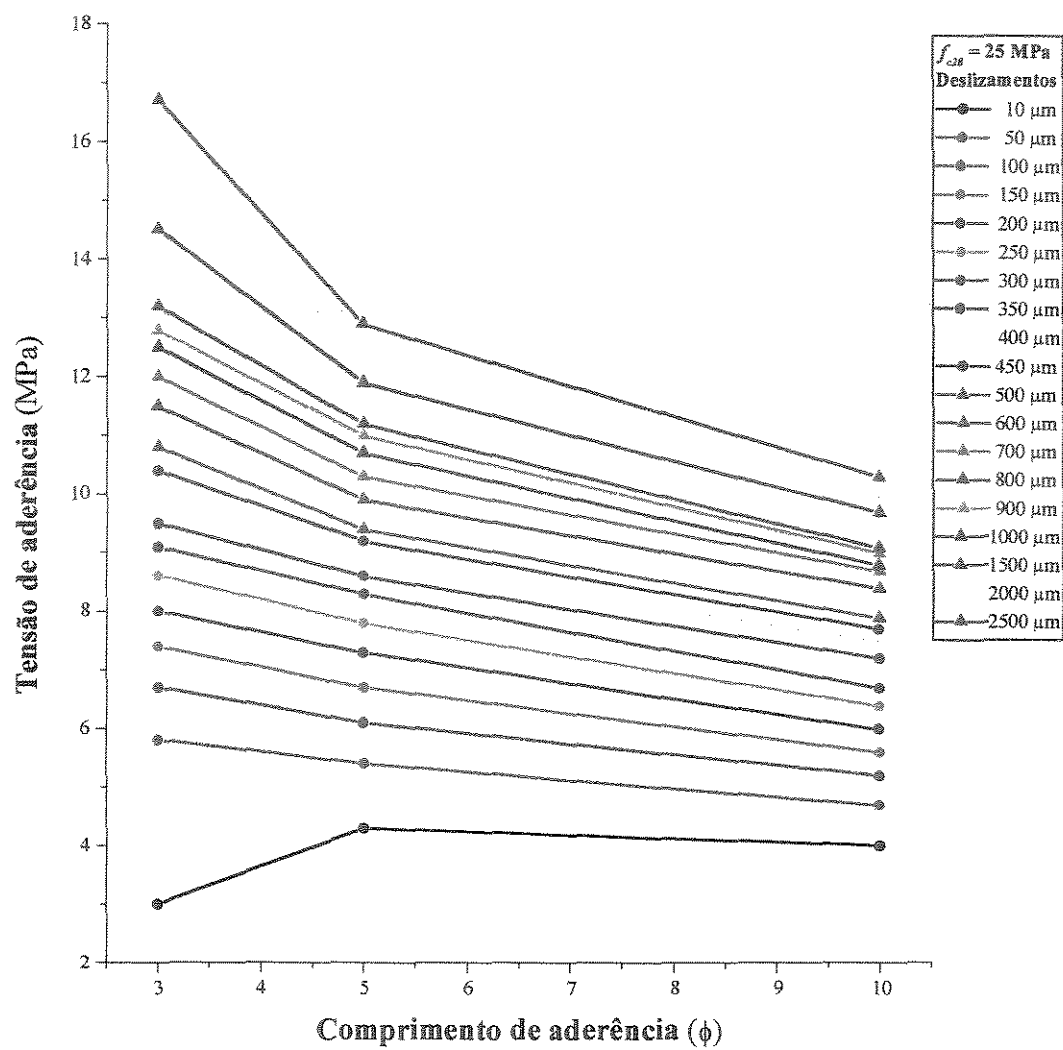


Figura 7.4 Curvas de tensões pelos comprimentos de aderência para diferentes deslizamentos e resistência à compressão do concreto de 25 MPa.

7.2 Resultados obtidos para vigas de concreto com resistência média na faixa de 50 MPa

Nas tabelas 7.7 e 7.8, são apresentadas a composição, as quantidades de materiais utilizados e as características mecânicas e de trabalhabilidade do concreto utilizado para determinação da aderência na faixa de 50 MPa de resistência média à compressão aos 28 dias de idade. Deve ser observado que na prática, determinado nos ensaios, obteve-se um concreto com 48,5 MPa de resistência média à compressão, portanto bem próximo do proposto.

Tabela 7.7 Composição do concreto de 50 MPa

Materiais	Quantidade (kg/m³)
Cimento	410
Sílica ativa	41
Areia	660
Brita 0	689
Brita 1	541
Água	270
Água/cimento	0,66
Água/aglomerante	0,60

Tabela 7.8 Propriedades mecânicas e de trabalhabilidade do concreto na faixa de 50 MPa

Propriedade	Valor médio obtido
Resistência à compressão $f_{cm\ 28}$	48,5 MPa
Resistência à tração $f_{tm\ 28}$	4,4 MPa
Módulo de deformação $E_{sec\ 0,5}$	30,2 GPa
Abatimento	80 mm

7.2.1 Resultados para barras com comprimento de aderência de 3 ϕ : considerações sobre o ensaio

A equação 7.2, para o comprimento de aderência de 3 ϕ , foi utilizada no cálculo da tensão de aderência.

A tabela 7.9 mostra os resultados de deformação específica do aço e deslizamentos obtidos no ensaio. Em seguida, tem-se o resultado da tensão no aço σ_a e tensão de aderência τ_b para cada incremento de carga. Com os valores de carga e deslizamento obtidos no ensaio, construiu-se o gráfico da figura 7.5, que permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 3 ϕ e concreto na faixa de resistência à compressão de 50 MPa.

Tabela 7.9 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 3 ϕ ($f_{c28} = 50$ MPa)

P (kN)	ext.elet.	ext. mec.	vão livre	depois comp. ader.		antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R_1 (μm)	R_2 (μm)	ϵ_0 (%)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)	ϵ_3 (%)	ϵ_4 (%)		
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
5	2	5	0,15	0,00	0,00	0,13	0,14	24,3	2,0
10	14	15	0,32	0,00	0,00	0,27	0,27	48,7	4,1
15	47	33	0,58	0,00	0,00	0,39	0,35	73,0	6,1
20	84	54	0,70	0,00	0,00	0,48	0,45	97,3	8,1
25	135	80	0,84	0,00	0,00	0,61	0,59	121,6	10,1
30	199	105	0,97	0,00	0,00	0,72	0,72	146,0	12,2
35	284	159	1,11	0,00	0,00	0,83	0,86	170,3	14,2
40	405	217	1,24	0,00	0,00	0,94	0,98	194,6	16,2
45	541	320	1,37	0,00	0,00	1,04	1,10	219,0	18,3
50	712	535	1,51	0,00	0,00	1,15	1,22	243,3	20,3
55	1073	870	1,67	0,01	0,01	1,22	1,29	267,6	22,3
60	2356	3000	1,97	0,00	0,02	1,23	1,31	292,0	24,3
60	2939	3000	2,41	0,07	0,45	1,23	1,31	-	-

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

O deslizamento ocorreu primeiro do lado R2 (3,00 mm), depois houve a complementação do lado R1 (2,939 mm).

O extensômetro E01 não apresentou leituras coerentes, tendo sido considerado no cálculo da deformação específica do aço ε_0 somente o E02. Os extensômetros E3 e E4 apresentaram semelhança de resultados, com valores pouco abaixo de E02; pode se comparar, observando os valores de ε_0 , ε_3 e ε_4 .

A carga para os deslizamentos máximos foi de 60 kN, atingindo-se uma deformação específica ε_0 de 2,41 (‰). Portanto, ficou determinado o fim do ensaio antes que ocorresse o escoamento do aço.

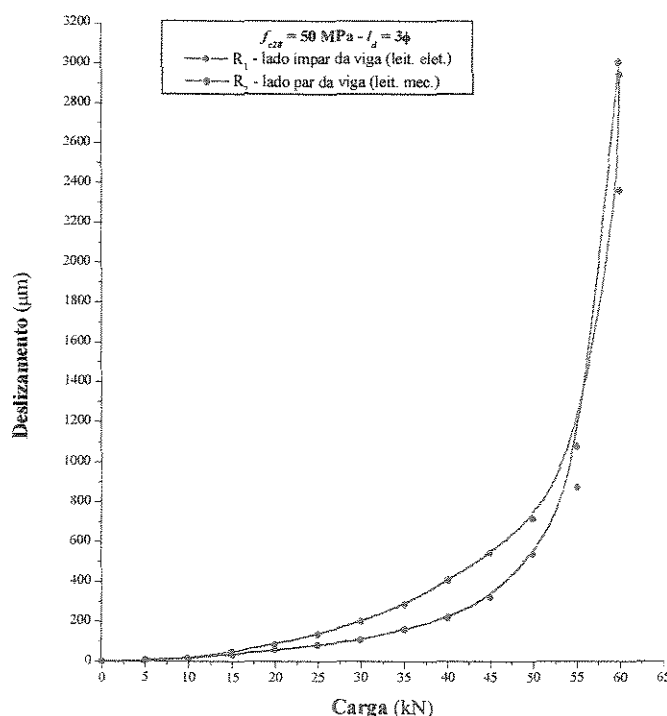


Figura 7.5 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 3 ϕ ($f_{c28} = 50$ MPa).

7.2.2 Resultados para barras com comprimento de aderência de 5 ϕ : considerações sobre o ensaio

Tabela 7.10 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 5 ϕ ($f_{c28} = 50$ MPa)

P (kN)	ext.elet.	ext. mec.	vão livre	depois comp. ader.		antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R_1 (μm)	R_2 (μm)	ϵ_0 (‰)	ϵ_1 (‰)	ϵ_2 (‰)	ϵ_3 (‰)	ϵ_4 (‰)		
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0
5	2	10	0,13	0,00	0,00	0,10		24,3	1,2
10	2	18	0,24	0,00	0,00	0,22		48,7	2,4
15	2	30	0,35	0,00	0,00	0,35		73,0	3,7
20	2	40	0,47	0,00	0,00	0,49		97,3	4,9
25	22	59	0,57	0,00	0,00	0,60		121,6	6,1
30	22	62	0,71	0,00	0,00	0,76		146,0	7,3
35	53	65	0,82	0,00	0,00	0,88		170,3	8,5
40	53	76	0,92	0,00	0,00	1,00		194,6	9,7
45	53	110	1,03	0,00	0,00	1,12		219,0	11,0
50	53	155	1,15	0,00	0,00	1,26		243,3	12,2
55	53	195	1,24	0,00	0,00	1,38		267,6	13,4
60	53	245	1,37	0,00	0,00	1,53		292,0	14,6
65	62	405	1,42	0,00	0,00	1,65		316,3	15,8
70	290	550	1,49	0,00	0,00	1,78		340,6	17,0
75	728	741	1,55	0,00	0,00	1,91		364,9	18,3
80	2361	880	1,55	0,05	0,00	1,98		389,3	19,5
85	2770	3000	1,55	0,25	0,00	2,10		413,6	20,7

A equação 7.3, para o comprimento de aderência de 5 ϕ , foi utilizada no cálculo da tensão de aderência. A tabela 7.10 apresenta os resultados de deformação específica do aço e deslizamento obtidos durante o ensaio, também o resultado da tensão no aço σ_a e tensão de

aderência τ_b para cada incremento de carga. O gráfico da figura 7.6 relaciona os valores de carga e deslizamentos obtidos no ensaio e permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 5ϕ e concreto na faixa de resistência à compressão de 50 MPa.

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

O deslizamento ocorreu primeiro do lado do relógio comparador R1 (2,770 mm), depois houve o deslizamento total do lado R2 (3,000 mm). O extensômetro E4 apresentou problemas (provavelmente foi danificado durante a moldagem da viga), não havendo nenhuma possibilidade de substituí-lo; devido a isso não temos dados nesta posição. A carga para o deslizamento limite foi de 85 kN e a deformação específica ϵ_0 do aço neste instante foi de 1,55 ‰. O extensômetro E3 situado antes do comprimento de aderência registrou uma deformação específica máxima ϵ_3 de 2,10 ‰. Pode-se considerar que não houve escoamento do aço até o fim do ensaio.

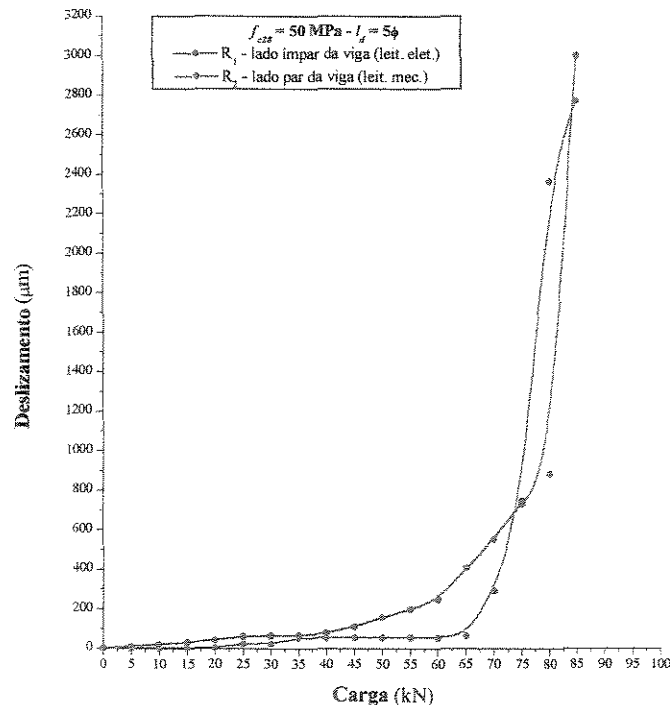


Figura 7.6 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 5ϕ ($f_{c28} = 50 \text{ MPa}$).

7.2.3 Resultados para barras com comprimento de aderência de 10 ϕ : considerações sobre o ensaio

Tabela 7.11 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 10 ϕ ($f_{c28} = 50$ MPa)

P (kN)	ext. mec.	ext. elet.	vão livre	depois comp. ader.		antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R_1 (μm)	R_2 (μm)	ϵ_0 (‰)	ϵ_1 (‰)	ϵ_2 (‰)	ϵ_3 (‰)	ϵ_4 (‰)		
0	0	0	0,00	0,00		0,00		0,0	0,0
5	0	0	0,12	0,00		0,17		24,3	0,6
10	0	0	0,24	0,00		0,35		48,7	1,2
15	0	0	0,36	0,00		0,51		73,0	1,8
20	0	0	0,49	0,00		0,67		97,3	2,4
25	0	0	0,62	0,00		0,83		121,6	3,0
30	0	1	0,73	0,00		0,97		146,0	3,7
35	0	1	0,86	0,00		1,13		170,3	4,3
40	0	2	1,00	0,00		1,30		194,6	4,9
45	0	7	1,11	0,00		1,42		219,0	5,5
50	0	11	1,23	0,00		1,57		243,3	6,1
55	0	14	1,36	0,00		1,72		267,6	6,7
60	0	21	1,49	0,00		1,88		292,0	7,3
65	1	27	1,60	0,00		2,01		316,3	7,9
70	1	38	1,73	0,00		2,17		340,6	8,5
75	1	60	1,85	0,00		2,31		364,9	9,1
80	1	129	1,97	0,00		2,46		389,3	9,7
85	2	172	2,10	0,01		2,61		413,6	10,3
90	2	214	2,23	0,01		2,77		437,9	11,0
95	2	262	2,35	0,01		2,95		462,3	11,6
100	2	321	2,49	0,01		3,49		486,6	12,2
105	2	384	2,75	0,01		5,10		510,9	12,8
110	2	413	11,4	0,01		-		535,2	13,4

Na tabela 7.11, tem-se os resultados de deformação específica do aço e deslizamento obtidos durante o ensaio. Em seguida, apresenta-se o resultado da tensão no aço σ_a e tensão de aderência τ_b para cada incremento de carga. Calculou-se a tensão de aderência para o comprimento de aderência de 10ϕ , pela equação 7.4.

Com os valores de carga e deslizamento obtidos no ensaio, construiu-se o gráfico da figura 7.7, que permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 10ϕ e concreto na faixa de resistência à compressão de 50 MPa.

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

O relógio comparador R1 apresentou problemas durante o ensaio e não registrou deslizamentos no lado ímpar da viga, portanto temos dados apenas do lado par registrado pelo relógio R2. O extensômetros E2 e E4 apresentaram problemas (provavelmente foram danificados durante a moldagem da viga), não havendo nenhuma possibilidade de substituí-los, não temos dados nestas posições.

O ensaio foi paralisado com uma carga de 110 kN, quando a deformação específica do aço ϵ_0 já era bastante excessiva, da ordem de 11,4 (‰); portanto, o aço entrou em escoamento antes que fosse atingido o deslizamento limite de 3,00 mm.

Convém lembrar que o escoamento do aço ϵ_s é 2,55 ‰, que ocorre com uma carga teórica calculada de 106,0 kN, considerando a distribuição de esforços atuantes. Pode-se admitir que isto praticamente aconteceu, pois para uma carga de 105,0 kN temos, conforme mostra a tabela 7.11, uma deformação específica ϵ_0 de 2,75 ‰.

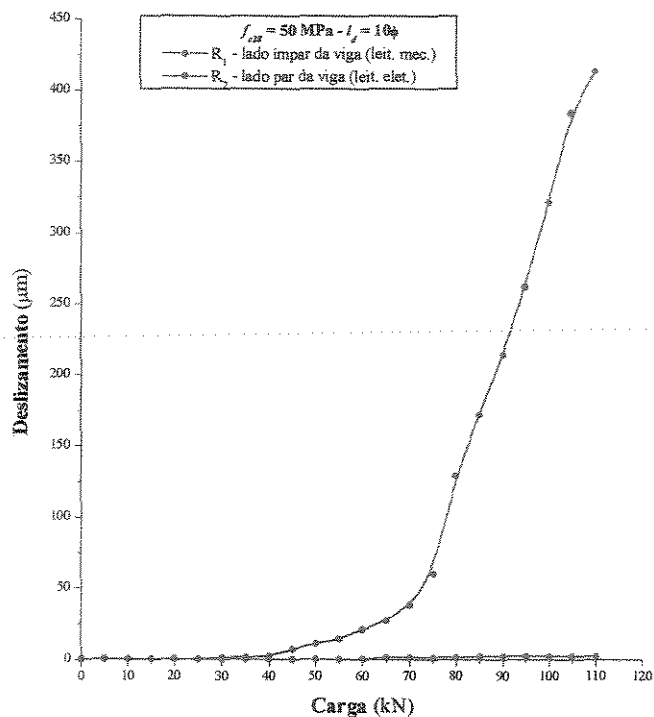


Figura 7.7 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 10ϕ ($f_{c28} = 50 \text{ MPa}$)

7.2.4 Tensões de aderência para um determinado deslizamento em função do comprimento de aderência

Para cada comprimento de aderência, a tabela 7.12, mostra as cargas para diferentes valores de deslizamento, lidos pelos relógios comparadores R1 e R2, nas duas semi-vigas de cada corpo de prova. Em seguida, temos os valores médios destas cargas, que possibilitou o cálculo dos valores correspondentes, de tensão no aço e tensão de aderência, em função de cada valor de deslizamento.

Tabela 7.12 Cargas, tensões no aço e tensões de aderência, em função de diferentes valores de deslizamento, para cada comprimento de aderência utilizado ($f_{c28} = 50 \text{ MPa}$)

S (μm)	Carga (kN)									σ_a (MPa)			τ_b (Mpa)		
	R ₁	R ₂	Méd.	R ₁	R ₂	Méd.	R ₁	R ₂	Méd.						
	3 ϕ			5 ϕ			10 ϕ			3 ϕ	5 ϕ	10 ϕ	3 ϕ	5 ϕ	10 ϕ
10	7,59	7,38	7,49	21,77	5,02	13,40	-	48,90	48,90	36,5	65,3	238,1	3,0	3,3	6,0
50	15,25	18,99	17,12	37,07	22,67	29,87	-	72,46	72,46	83,4	145,5	352,9	7,0	7,3	8,8
100	21,57	28,72	25,15	65,05	43,33	54,19	-	77,90	77,90	122,5	263,9	379,4	10,2	13,2	9,5
150	26,18	34,21	30,20	66,61	49,47	58,04	-	82,53	82,53	147,1	282,7	401,9	12,3	14,1	10,1
200	31,10	38,35	34,23	67,84	55,44	61,64	-	88,29	88,29	166,7	300,2	430,0	13,9	15,0	10,8
250	33,01	41,51	37,26	68,79	59,30	64,05	-	93,65	93,65	181,5	311,9	456,1	15,1	15,6	11,4
300	35,55	43,68	39,62	69,63	61,53	65,58	-	98,15	98,15	193,0	319,4	478,0	16,1	16,0	12,0
350	37,72	45,39	41,56	70,41	63,26	66,84	-	102,37	102,37	202,4	325,5	498,6	16,9	16,3	12,5
400	39,80	46,73	43,27	71,08	64,88	67,98	-	-	-	210,7	331,1	-	17,6	16,6	-
450	41,61	47,93	44,77	71,64	66,56	69,10	-	-	-	218,0	336,5	-	18,2	16,8	-
500	43,43	49,94	46,69	72,14	68,18	70,16	-	-	-	227,4	341,7	-	19,0	17,1	-
600	46,59	50,77	48,68	72,97	71,18	72,08	-	-	-	237,1	351,0	-	19,8	17,6	-
700	49,10	52,07	50,59	73,70	73,98	73,84	-	-	-	246,4	359,6	-	20,5	18,0	-
800	50,98	52,98	51,98	74,31	76,71	75,51	-	-	-	253,1	367,7	-	21,1	18,4	-
900	52,33	53,67	53,00	74,81	78,00	76,41	-	-	-	258,1	372,1	-	21,5	18,6	-
1000	53,34	54,25	53,80	75,32	78,84	77,08	-	-	-	262,0	375,4	-	21,8	18,8	-
1500	56,43	56,17	56,30	77,33	81,13	79,23	-	-	-	274,2	385,9	-	22,9	19,3	-
2000	58,43	57,59	58,00	79,28	82,52	80,90	-	-	-	282,5	394,0	-	23,5	19,7	-
2500	59,69	58,82	59,26	82,13	83,75	82,94	-	-	-	288,6	403,9	-	24,1	20,2	-

As curvas da figura 7.8, para diferentes valores de deslizamento, relacionam tensões de aderência com os comprimentos de aderência utilizados nos ensaios para concreto com resistência à compressão na faixa de 50 MPa. Foram construídas com o intuito de relacionar o incremento de tensões em função da variação do comprimento de aderência e mostrar a tendência de comportamento das mesmas com a finalidade de orientar os próximos passos da pesquisa.

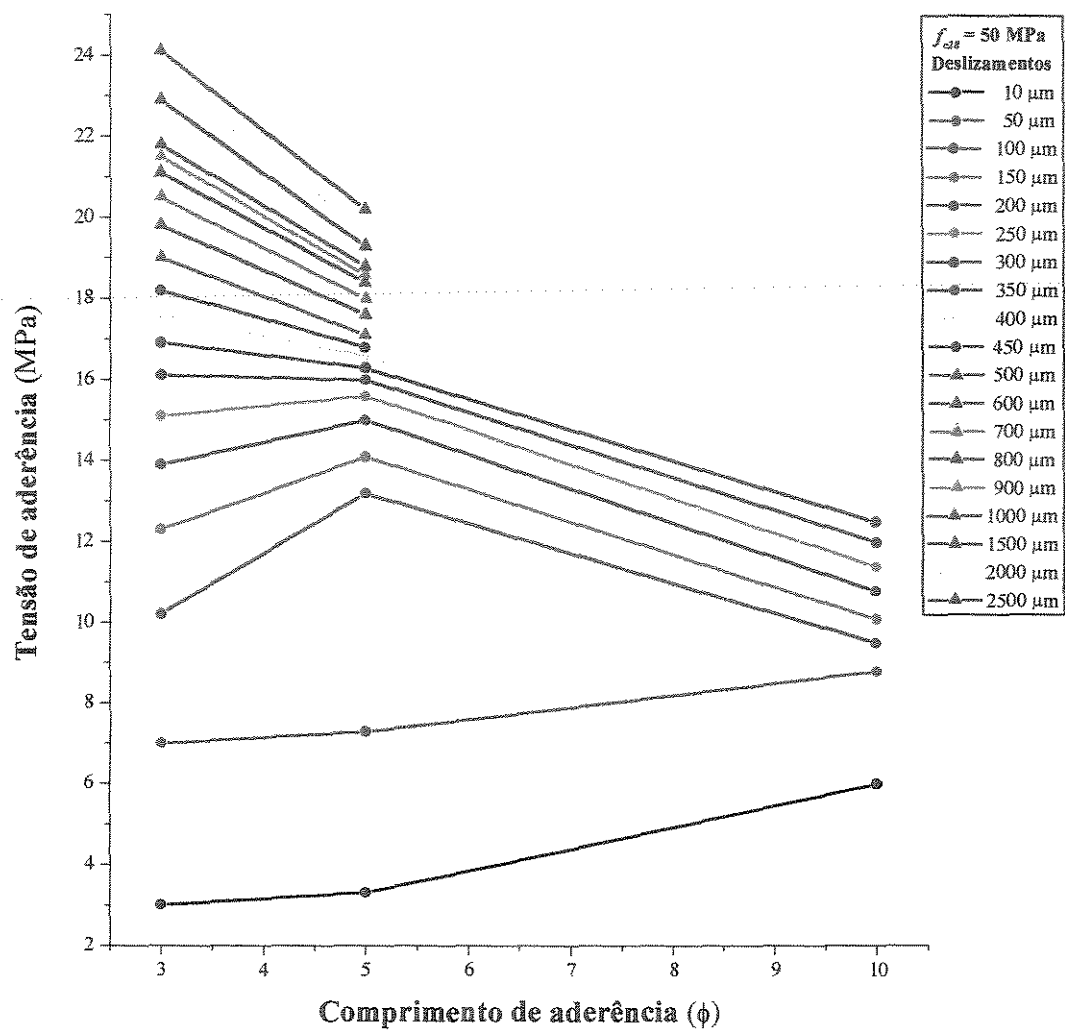


Figura 7.8 Curvas de tensões pelos comprimentos de aderência para diferentes deslizamentos e resistência à compressão do concreto de 50 MPa.

7.3 Resultados obtidos para vigas de concreto com resistência média na faixa de 85 MPa

Nas tabelas 7.13 e 7.14, são apresentadas a composição, as quantidades de materiais utilizados e as características mecânicas e de trabalhabilidade do concreto utilizado para determinação da aderência na faixa de 85 MPa de resistência média à compressão aos 28 dias de idade. Deve ser observado que na prática, determinado nos ensaios, obteve-se um concreto com 86,1 MPa de resistência média à compressão, portanto bem próximo do proposto.

Tabela 7.13 Composição do concreto de 85 MPa

Materiais	Quantidade (kg/m³)
Cimento	410
Sílica ativa	41
Areia	660
Brita 0	689
Brita 1	541
Água	147,3
Superplastificante	20,1
Água/cimento	0,36
Água/aglomerante	0,33

Tabela 7.14 Propriedades mecânicas e de trabalhabilidade do concreto na faixa de 85 MPa

Propriedade	Valor médio obtido
Resistência à compressão $f_{cm\ 28}$	86,1 MPa
Resistência à tração $f_{tm\ 28}$	6,2 MPa
Módulo de deformação $E_{sec\ 0,5}$	44,2 GPa
Abatimento	35 mm

7.3.1 Resultados para barras com comprimento de aderência de 3 ϕ : considerações sobre o ensaio

Tabela 7.15 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 3 ϕ ($f_{c28} = 85$ MPa)

P (kN)	ext.elet.	ext. mec.	vão livre	depois comp. ader.		antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R_1 (μm)	R_2 (μm)	ϵ_0 (‰)	ϵ_1 (‰)	ϵ_2 (‰)	ϵ_3 (‰)	ϵ_4 (‰)		
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
5	0	0	0,15	0,00	0,00	0,13	0,17	24,3	2,0
10	1	3	0,26	0,00	0,00	0,23	0,31	48,7	4,1
15	2	6	0,42	0,00	0,00	0,37	0,48	73,0	6,1
20	6	12	0,53	0,00	0,00	0,48	0,60	97,3	8,1
25	7	12	0,67	0,00	0,00	0,62	0,75	121,6	10,1
30	15	12	0,82	0,00	0,00	0,78	0,91	146,0	12,2
35	16	17	0,83	0,00	0,00	0,80	0,93	170,3	14,2
40	27	23	1,06	0,00	0,00	1,03	1,16	194,6	16,2
45	38	26	1,19	0,00	0,00	1,17	1,30	219,0	18,3
50	50	26	1,32	0,00	0,00	1,31	1,44	243,3	20,3
55	58	26	1,45	0,00	0,00	1,45	1,57	267,6	22,3
60	69	26	1,58	0,00	0,00	1,57	1,70	292,0	24,3
65	92	26	1,71	0,00	0,01	1,72	1,84	316,3	26,4
70	124	26	1,86	0,00	0,01	1,87	1,99	340,6	28,4
75	159	26	1,99	0,00	0,02	2,01	2,13	364,9	30,4
80	208	26	2,12	0,00	0,02	2,14	2,26	389,3	32,4
85	481	26	2,27	0,00	0,02	2,28	2,42	413,6	34,5
90	564	26	2,43	0,00	0,02	2,43	2,57	437,9	36,5
95	796	271	2,67	0,00	0,02	2,59	2,71	462,3	38,5
100	993	454	4,21	0,00	0,02	2,82	2,89	486,6	40,6
105	3255	713	10,01	0,58	0,02	5,87	4,34	510,9	42,6
110	3255	1102	11,76	0,87	0,02	13,27	12,61	535,2	44,6

A tabela 7.15 mostra os resultados de deformação específica do aço e deslizamentos obtidos no ensaio. Em seguida, tem-se o resultado da tensão no aço σ_a e tensão de aderência τ_b para cada incremento de carga. Com os valores de carga e deslizamento obtidos no ensaio, construiu-se o gráfico da figura 7.9, que permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 3 ϕ e concreto na faixa de resistência à compressão de 85 MPa.

A equação 7.2, para o comprimento de aderência de 3 ϕ , foi utilizada no cálculo da tensão de aderência.

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

O deslizamento ocorreu primeiro do lado R1 (3,250 mm), depois houve a complementação do lado R2 (1,102 mm). Provocado pela ocorrência da deformação excessiva do aço, encerrou-se o ensaio antes que houvesse o deslizamento limite do lado R2. A ruptura iminente poderia causar danos ao equipamento.

Todos os extensômetros apresentaram leituras coerentes e próximas entre si, portanto, o valor considerado para a deformação específica do aço, ϵ_0 , foi dado pela média dos valores E01 e E02. Os extensômetros E3 e E4 apresentaram semelhança de resultados, com valores próximos de E01 e E02, indicando o mesmo estado de tensão na barra, da região que vai do meio do vão até antes da zona de aderência. Isto pode ser verificado, comparando-se os valores de ϵ_0 , ϵ_3 e ϵ_4 , na tabela 7.15. Os extensômetros E1 e E2, praticamente não apresentaram leituras significativas, indicando que antes da ruptura da aderência, não houve transmissão de esforços para a região que fica depois da zona de aderência. Deve ser enfatizado, que houve ruptura da aderência, neste ensaio, somente depois do escoamento do aço.

O aço atingiu uma deformação específica ϵ_0 de 2,43 (‰), com uma carga de 90 kN; para uma carga de 95 kN, a deformação específica ϵ_0 , foi 2,67 (‰). Considerando que a deformação específica ϵ_y deste aço, para a tensão de escoamento, é 2,55 (‰), o escoamento neste ensaio ocorreu para uma carga entre 90 e 95 kN.

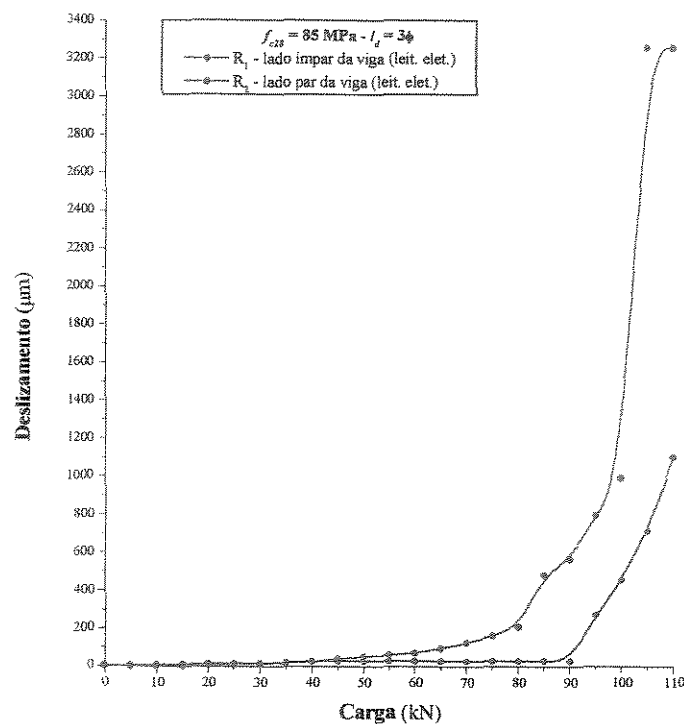


Figura 7.9 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 3 ϕ ($f_{c28} = 85$ MPa).

7.3.2 Resultados para barras com comprimento de aderência de 5 ϕ : considerações sobre o ensaio

A tabela 7.16 apresenta os resultados de deformação específica do aço e deslizamento obtidos durante o ensaio, também o resultado da tensão no aço σ_a e tensão de aderência τ_b para cada incremento de carga. O gráfico da figura 7.10 relaciona os valores de carga e deslocamentos obtidos no ensaio e permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 5 ϕ e concreto na faixa de resistência à compressão de 85 MPa.

A equação 7.3, para o comprimento de aderência de 5 ϕ , foi utilizada no cálculo da tensão de aderência.

Tabela 7.16 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 5 ϕ ($f_{c28} = 85$ MPa)

P (kN)	ext.elet.	ext. mec.	vão livre	depois comp. ader.		antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R_1 (μm)	R_2 (μm)	ϵ_0 (%)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)	ϵ_3 (%)	ϵ_4 (%)		
0	0	0	0,00	0,00	0,00		0,00	0,0	0,0
5	0	0	0,13	0,00	0,00		0,17	24,3	1,2
10	0	3	0,26	0,00	0,00		0,36	48,7	2,4
15	2	3	0,41	0,00	0,00		0,56	73,0	3,7
20	2	3	0,54	0,00	0,00		0,71	97,3	4,9
25	2	3	0,55	0,00	0,00		0,73	121,6	6,1
30	4	9	0,79	0,00	0,00		1,02	146,0	7,3
35	4	9	0,82	0,00	0,00		1,05	170,3	8,5
40	10	12	1,07	0,00	0,00		1,33	194,6	9,7
45	12	17	1,19	0,00	0,00		1,46	219,0	11,0
50	15	17	1,31	0,00	0,00		1,60	243,3	12,2
55	17	23	1,45	0,00	0,00		1,75	267,6	13,4
60	21	26	1,57	0,00	0,00		1,89	292,0	14,6
65	26	26	1,70	0,00	0,00		2,03	316,3	15,8
70	32	26	1,83	0,00	0,00		2,17	340,6	17,0
75	36	26	1,99	0,00	0,00		2,34	364,9	18,3
80	41	26	2,11	0,00	0,00		2,48	389,3	19,5
85	49	26	2,26	0,00	0,00		2,64	413,6	20,7
90	58	26	2,41	0,00	0,00		2,80	437,9	21,9
95	81	26	2,63	0,00	0,00		3,05	462,3	23,1
100	97	26	4,47	0,00	0,00		3,70	486,6	24,3
105	122	26	9,20	0,00	0,00		8,92	510,9	25,5
110	204	26	11,81	0,00	0,00		12,64	535,2	26,8

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

Os deslizamentos, tanto do lado do relógio comparador R1 como do lado R2, foram significativamente baixos (valor máximo de 58 μm , antes do escoamento do aço), para este comprimento de aderência e concreto na faixa de 85 MPa. Provocado pela ocorrência da deformação excessiva do aço, encerrou-se o ensaio antes que houvesse o deslizamento limite, em ambos os lados da viga. A ruptura iminente, indicada por uma deformação excessiva do aço, como pode ser observado na tabela 7.16, poderia causar danos ao equipamento.

Pode ser observado, na figura 7.10, para a curva representativa do lado R2, que as leituras são constantes (26 μm) a partir da carga de 60 kN, caracterizando uma discrepância em relação à curva que representa R1. Portanto, neste caso, não foram utilizados para o cálculo das tensões de aderência, os valores médios das duas curvas, mas tão somente, os valores de R1. O extensômetro E3 apresentou problemas, não havendo nenhuma possibilidade de substituí-lo; por isso não temos dados nesta posição. O valor considerado para a deformação específica do aço, ϵ_0 , foi dado pela média entre os valores de E01 e E02. O extensômetro E4 apresentou resultados relativamente próximos de E01 e E02, indicando o mesmo estado de tensão na barra, da região que vai do meio do vão até antes da zona de aderência. Isto pode ser verificado, comparando-se os valores de ϵ_0 , e ϵ_4 , na tabela 7.16. Os extensômetros E1 e E2, não apresentaram leituras, indicando que não houve transmissão de esforços para a região que fica depois da zona de aderência. Isso, somado ao fato de que o deslizamento máximo foi de 58 μm , significa, pelos padrões considerados neste trabalho, que não houve ruptura da aderência neste caso.

O aço atingiu uma deformação específica ϵ_0 de 2,41 (‰), com uma carga de 90 kN; para uma carga de 95 kN, a deformação específica ϵ_0 , foi 2,63 (‰). Considerando que a deformação específica ϵ_y deste aço, para a tensão de escoamento, é 2,55 (‰), o escoamento neste ensaio ocorreu, também, para uma carga entre 90 e 95 kN.

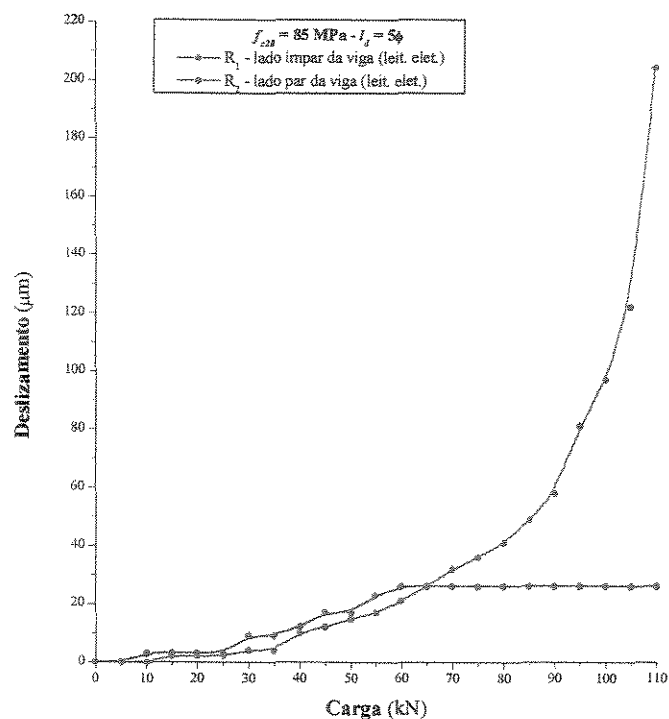


Figura 7.10 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 5 ϕ ($f_{c28} = 85$ MPa).

7.3.3 Resultados para barras com comprimento de aderência de 10 ϕ : considerações sobre o ensaio

Na tabela 7.17, tem-se os resultados de deformação específica do aço e deslizamento obtidos durante o ensaio. Em seguida, apresenta-se o resultado da tensão no aço σ_a e tensão de aderência τ_b para cada incremento de carga. Calculou-se a tensão de aderência para o comprimento de aderência de 10 ϕ , pela equação 7.4.

Com os valores de carga e deslizamento obtidos no ensaio, construiu-se o gráfico da figura 7.11, que permite visualizar o comportamento da aderência para comprimento de aderência de 10 ϕ e concreto na faixa de resistência à compressão de 85 MPa.

Tabela 7.17 Resultados do ensaio para comprimento de aderência de 10 ϕ ($f_{c28} = 85$ MPa)

P (kN)	ext. mec.	ext. elet.	vão livre	depois comp. ader.			antes comp. ader.		σ_a (MPa)	τ_b (MPa)
	R ₁ (μm)	R ₂ (μm)	ε ₀ (‰)	ε ₁ (‰)	ε ₂ (‰)	ε ₃ (‰)	ε ₄ (‰)			
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
5	0	0	0,12	0,00	0,00	0,13	0,15	24,3	24,3	0,6
10	0	0	0,24	0,00	0,00	0,25	0,29	48,7	48,7	1,2
15	0	0	0,37	0,00	0,00	0,37	0,44	73,0	73,0	1,8
20	0	0	0,48	0,00	0,00	0,49	0,57	97,3	97,3	2,4
25	0	0	0,59	0,00	0,00	0,62	0,70	121,6	121,6	3,0
30	1	3	0,73	0,00	0,00	0,74	0,84	146,0	146,0	3,7
35	1	3	0,87	0,00	0,04	0,89	1,00	170,3	170,3	4,3
40	1	3	0,96	0,00	0,04	1,00	1,10	194,6	194,6	4,9
45	1	3	1,18	0,00	0,04	1,25	1,34	219,0	219,0	5,5
50	1	3	1,22	0,00	0,04	1,28	1,37	243,3	243,3	6,1
55	2	6	1,34	0,00	0,05	1,42	1,51	267,6	267,6	6,7
60	2	6	1,46	0,00	0,05	1,55	1,64	292,0	292,0	7,3
65	4	9	1,58	0,00	0,05	1,70	1,77	316,3	316,3	7,9
70	4	9	1,69	0,00	0,05	1,82	1,89	340,6	340,6	8,5
75	4	9	1,84	0,00	0,05	2,02	2,05	364,9	364,9	9,1
80	4	12	1,98	0,00	0,07	2,17	2,21	389,3	389,3	9,7
85	4	12	2,11	0,00	0,07	2,32	2,34	413,6	413,6	10,3
90	5	12	2,25	0,00	0,07	2,55	2,50	437,9	437,9	11,0
95	7	15	2,39	0,00	0,07	2,75	2,64	462,3	462,3	11,6
100	7	15	2,53	0,00	0,12	2,99	2,80	486,6	486,6	12,2
105	12	23	10,71	0,00	0,12	5,56	3,08	510,9	510,9	12,8
110	15	23	10,85	0,00	0,23	15,74	13,91	535,2	535,2	13,4

Podem ser feitas as seguintes considerações sobre o ensaio:

Os deslizamentos, tanto do lado do relógio comparador R1 como do lado R2, foram significativamente baixos (valor máximo de 15 μm , antes do escoamento do aço), para este comprimento de aderência e concreto na faixa de 85 MPa. Provocado pela ocorrência da deformação excessiva do aço, encerrou-se o ensaio antes que houvesse o deslizamento limite, em ambos os lados da viga. A ruptura iminente, indicada por uma deformação excessiva do aço, como pode ser observado na tabela 7.17, poderia causar danos ao equipamento.

O aço atingiu uma deformação específica ϵ_0 de 2,53 (‰), com uma carga de 100 kN; para uma carga de 105 kN, a deformação específica ϵ_0 , foi 10,71 (‰). Considerando que a deformação específica ϵ_y deste aço, para a tensão de escoamento, é 2,55 (‰), o escoamento neste ensaio ocorreu, para uma carga pouco acima e bem próxima de 100 kN.

O valor considerado para a deformação específica do aço, ϵ_0 , foi dado pela média entre os valores de E01 e E02. Os extensômetro E4 e E4 apresentaram resultados relativamente próximos de E01 e E02, indicando o mesmo estado de tensão na barra, da região que vai do meio do vão até antes da zona de aderência. Isto pode ser verificado, comparando-se os valores de ϵ_0 , ϵ_3 e ϵ_4 , na tabela 7.17. Os extensômetros E1 e E2, não apresentaram leituras significativas, indicando que não houve transmissão de esforços para a região que fica depois da zona de aderência. Isto, somado ao fato de que o deslizamento máximo foi de 15 μm , significa, pelos padrões considerados neste trabalho, que não houve ruptura da aderência neste caso.

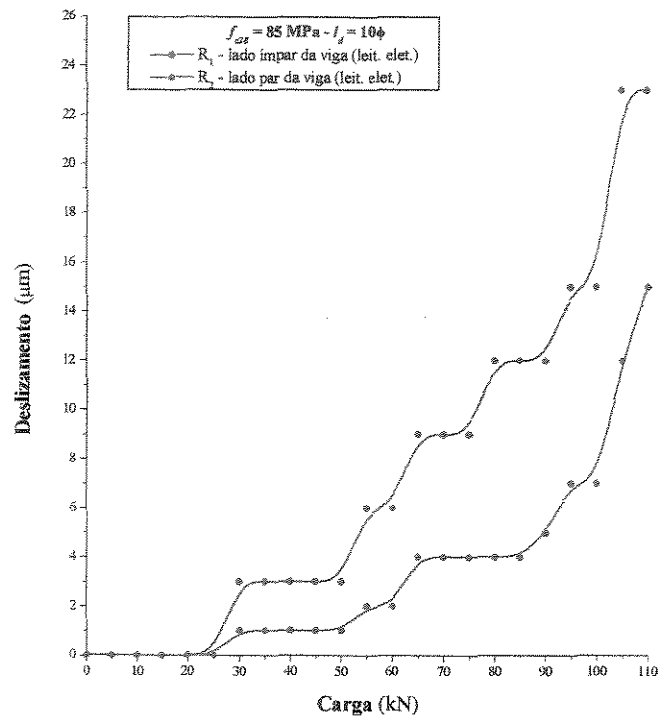


Figura 7.11 Curva carga-deslizamento para comprimento de aderência de 10 ϕ ($f_{c28} = 85 \text{ MPa}$)

7.3.4 Tensões de aderência para um determinado deslizamento em função do comprimento de aderência

Para cada comprimento de aderência, a tabela 7.18, mostra as cargas para diferentes valores de deslizamento, lidos pelos relógios comparadores R1 e R2, nas duas semi-vigas de cada corpo de prova. Em seguida, temos os valores médios destas cargas, que possibilitou o cálculo dos valores correspondentes, de tensão no aço e tensão de aderência, em função de cada valor de deslizamento.

Tabela 7.18 Cargas, tensões no aço e tensões de aderência, em função de diferentes valores de deslizamento, para cada comprimento de aderência utilizado ($f_{c28} = 85 \text{ MPa}$)

S (μm)	Carga (kN)									σ_a (MPa)			τ_b (Mpa)		
	R ₁	R ₂	Méd.	R ₁	R ₂	Méd.	R ₁	R ₂	Méd.						
	3 ϕ			5 ϕ			10 ϕ			3 ϕ	5 ϕ	10 ϕ	3 ϕ	5 ϕ	10 ϕ
5	19,24	11,67	15,46	35,21	26,42	35,21	89,54	53,59	71,57	75,3	171,5	258,7	6,3	8,6	8,7
10	27,44	19,24	23,34	40,93	36,20	40,93	103,06	76,45	89,76	113,7	199,3	393,6	9,5	10,0	10,9
15	29,98	34,05	32,02	50,45	43,20	50,45	-	-	-	155,9	245,7	-	13,0	12,3	-
20	36,87	38,16	37,52	58,63	52,35	58,63	-	-	-	182,7	285,5	-	15,2	14,3	-
25	39,75	44,25	42,00	63,97	-	63,97	-	-	-	204,5	311,5	-	17,0	15,6	-
30	41,67	87,39	64,53	68,40	-	68,40	-	-	-	314,3	333,1	-	26,2	16,7	-
40	45,97	88,49	67,23	78,84	-	78,84	-	-	-	327,4	384,0	-	27,3	19,2	-
50	49,96	89,19	69,58	85,48	-	85,48	-	-	-	338,9	416,3	-	28,2	20,8	-
100	66,22	91,17	78,69	100,35	-	100,35	-	-	-	383,2	488,7	-	31,9	24,4	-
150	73,47	92,43	82,95	-	-	-	-	-	-	404,0	-	-	33,7	-	-
200	78,19	93,62	85,91	-	-	-	-	-	-	418,4	-	-	34,9	-	-
250	80,20	94,76	87,48	-	-	-	-	-	-	426,0	-	-	35,5	-	-
300	81,49	95,93	88,71	-	-	-	-	-	-	432,0	-	-	36,0	-	-
350	82,59	97,16	89,88	-	-	-	-	-	-	437,7	-	-	36,5	-	-
400	83,76	98,40	91,08	-	-	-	-	-	-	443,6	-	-	37,0	-	-
450	85,05	99,61	92,33	-	-	-	-	-	-	449,7	-	-	37,5	-	-

As curvas da figura 7.12, para diferentes valores de deslizamento, relacionam tensões de aderência com os comprimentos de aderência utilizados nos ensaios para concreto com resistência à compressão na faixa de 85 MPa. Foram construídas com o intuito de relacionar o incremento de tensões em função da variação do comprimento de aderência e mostrar a tendência de comportamento das mesmas com a finalidade de orientar os próximos passos da pesquisa.

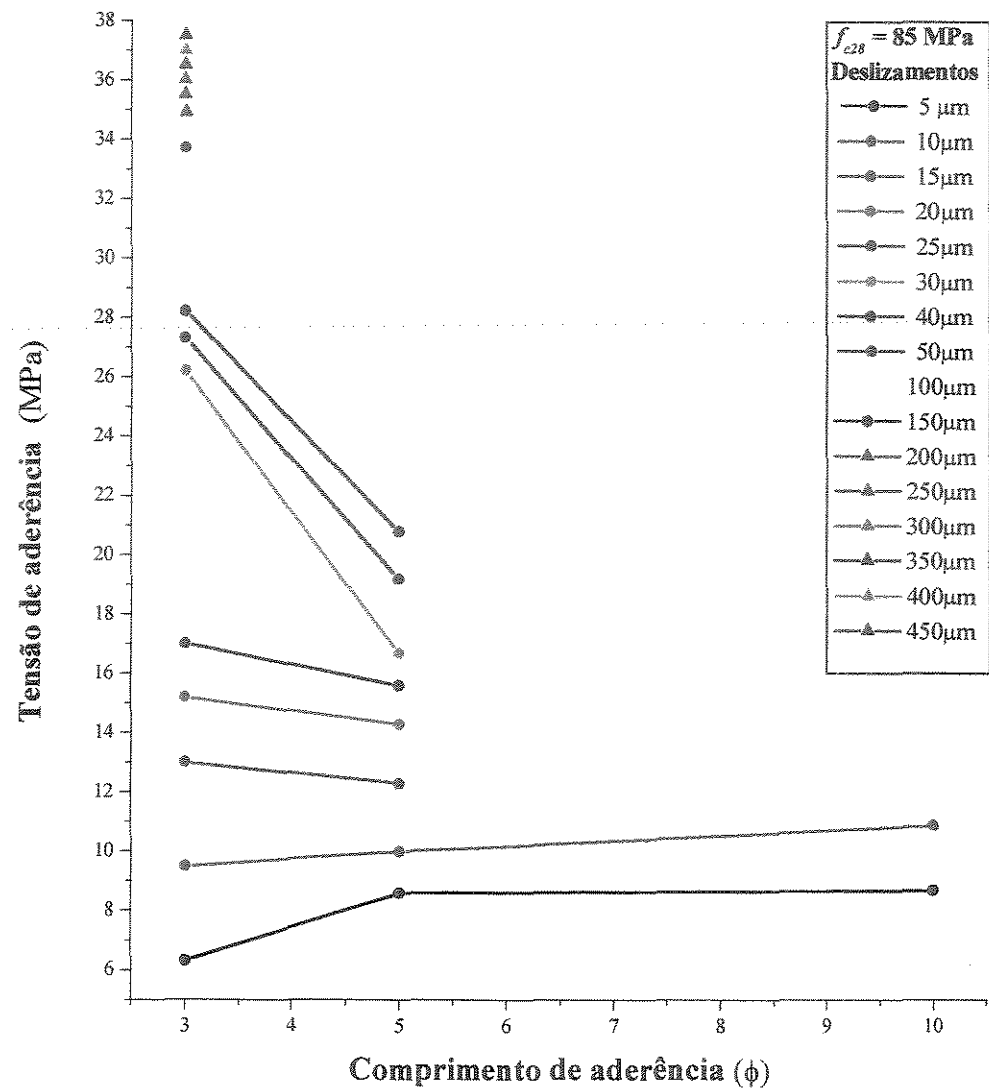


Figura 7.12 Curvas de tensões pelos comprimentos de aderência para diferentes deslizamentos e resistência à compressão do concreto de 85 MPa.

7.4 Arquivo fotográfico dos ensaios realizados

Neste item, com a proposta de contribuir para o entendimento do texto com recursos visuais, é apresentada uma sequência fotográfica do trabalho realizado

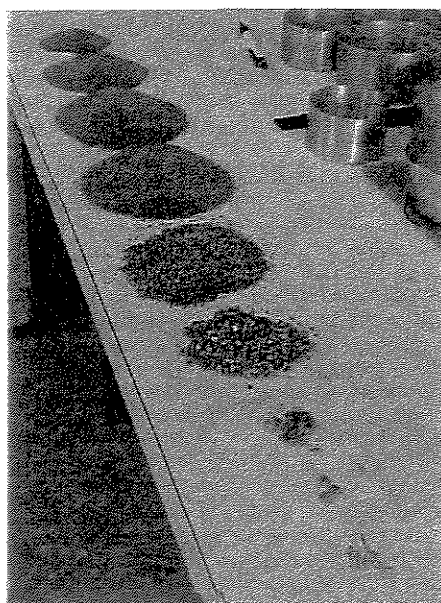


(a)



(b)

Figura 7.13 (a e b) Lavagem do agregado graúdo para retirada do material pulverulento

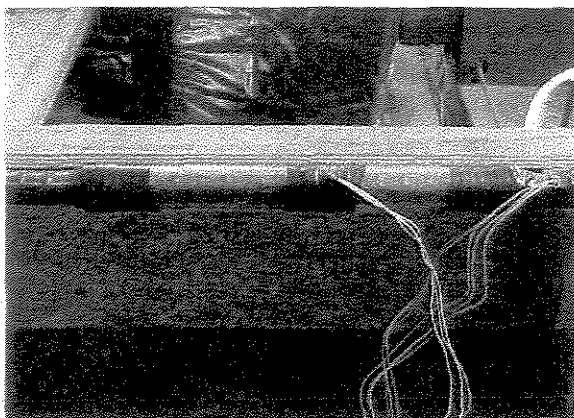


(a)

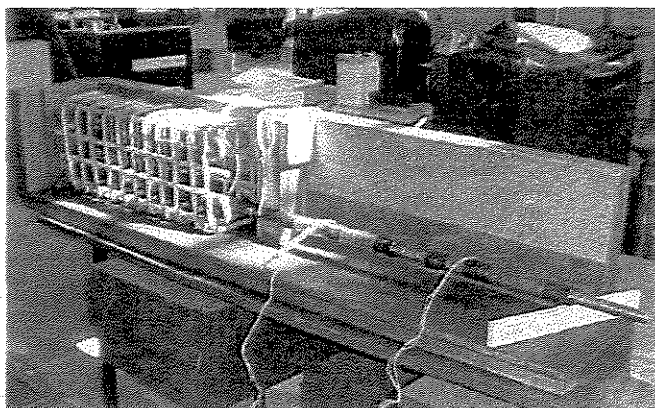


(b)

Figura 7.14 (a) Ensaio granulométrico da areia utilizada. (b) Peneiramento para retirada do material mais grosso e impurezas.

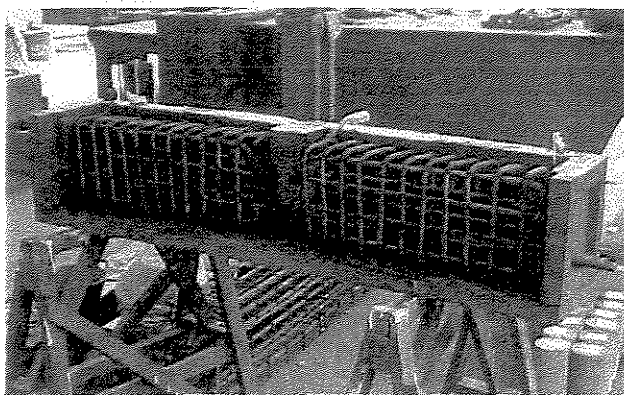


(a)

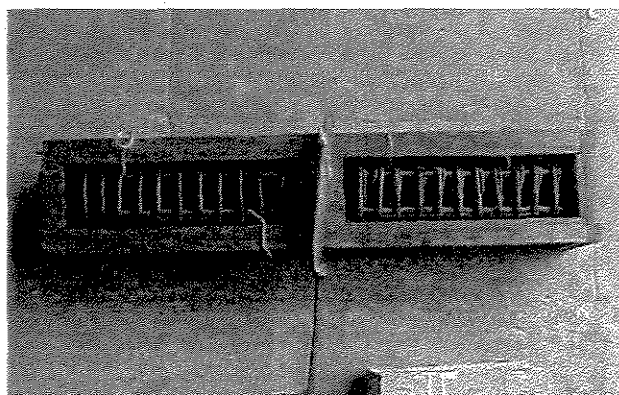


(b)

Figura 7.15 (a) Barra preparada com extensômetros e luva plástica. (b) Montagem da armadura

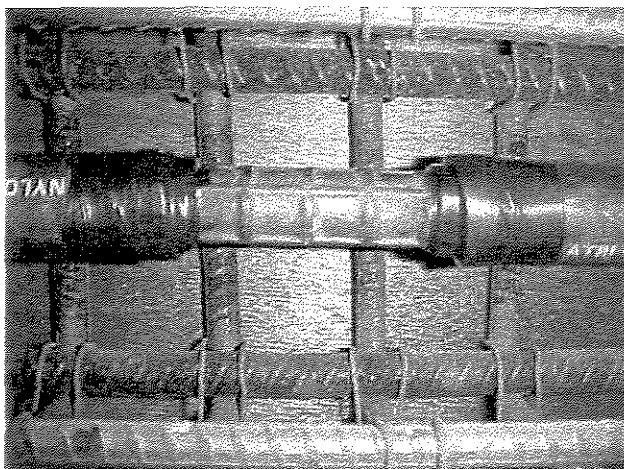


(a)

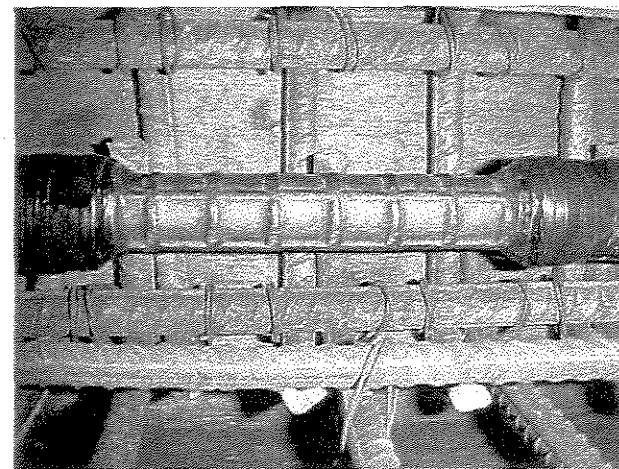


(b)

Figura 7.16 (a e b) Aparato montado para concretagem, antes e depois do fechamento da forma



(a)



(b)

Figura 7.17. Detalhe da barra mostrando o comprimento de aderência (a) 3φ e (b) 5φ

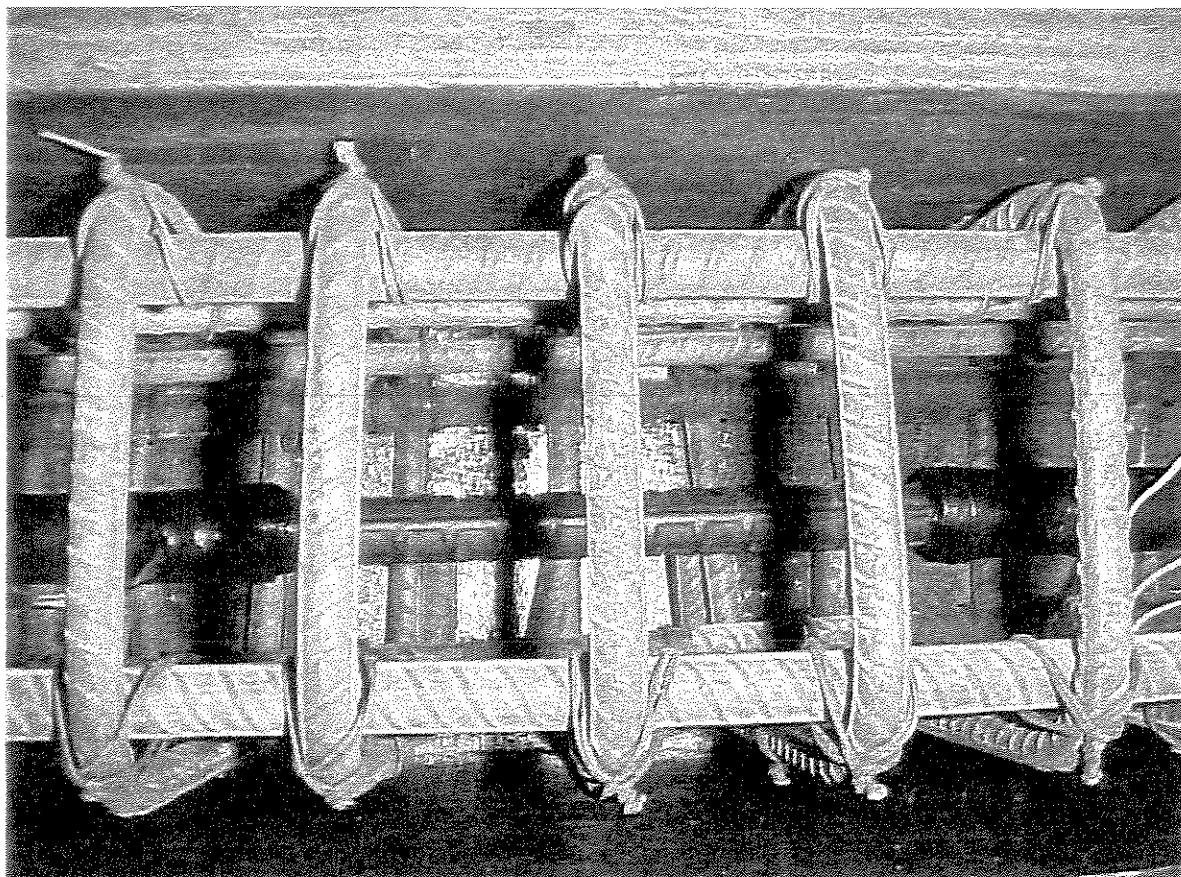
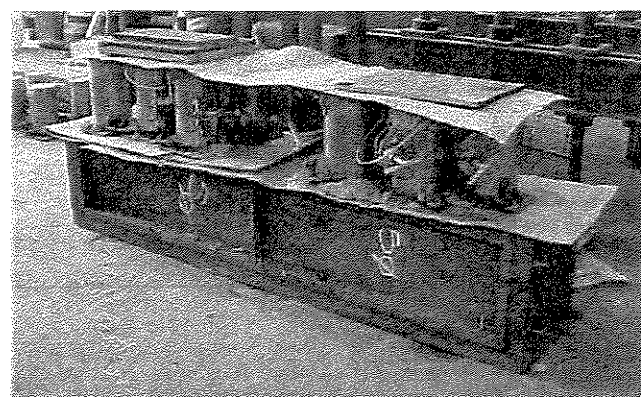


Figura 7.18 Detalhe da barra com comprimento de aderência de 10ϕ e armadura auxiliar



(a)



(b)

Figura 7.19 (a) Viga moldada e corpos de prova de controle do concreto, recém moldados. (b) Viga e corpos de prova de controle do concreto em processo de cura.

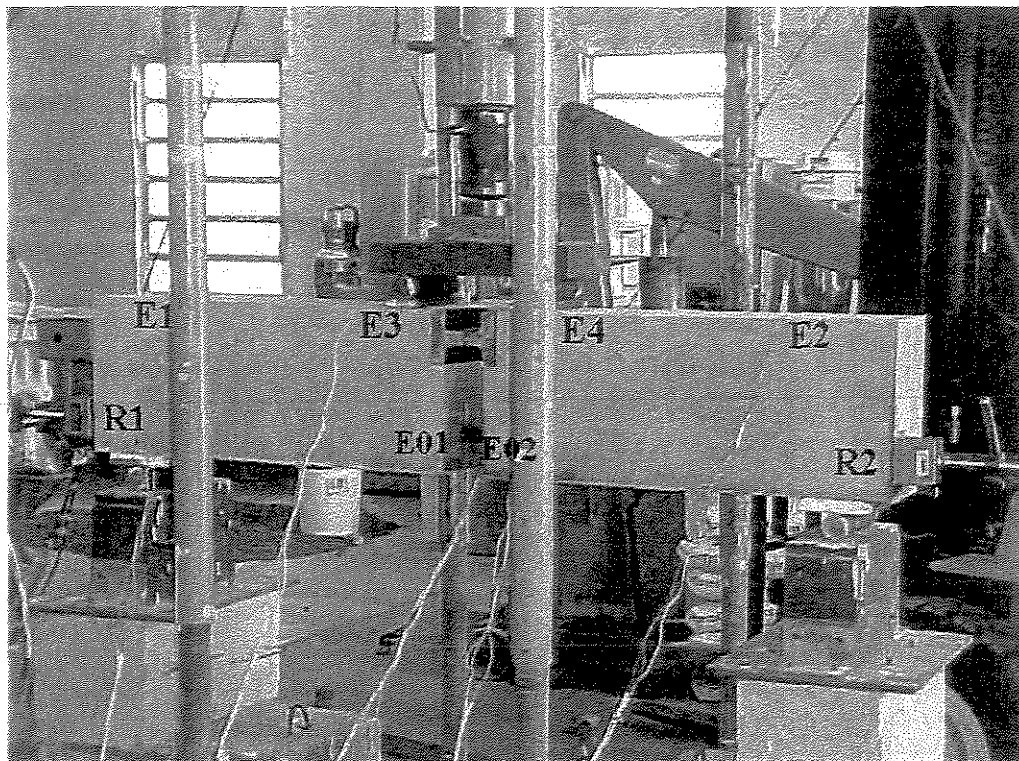


Figura 7.20 Vista geral do ensaio, mostrando a posição dos extensômetros e apoios.

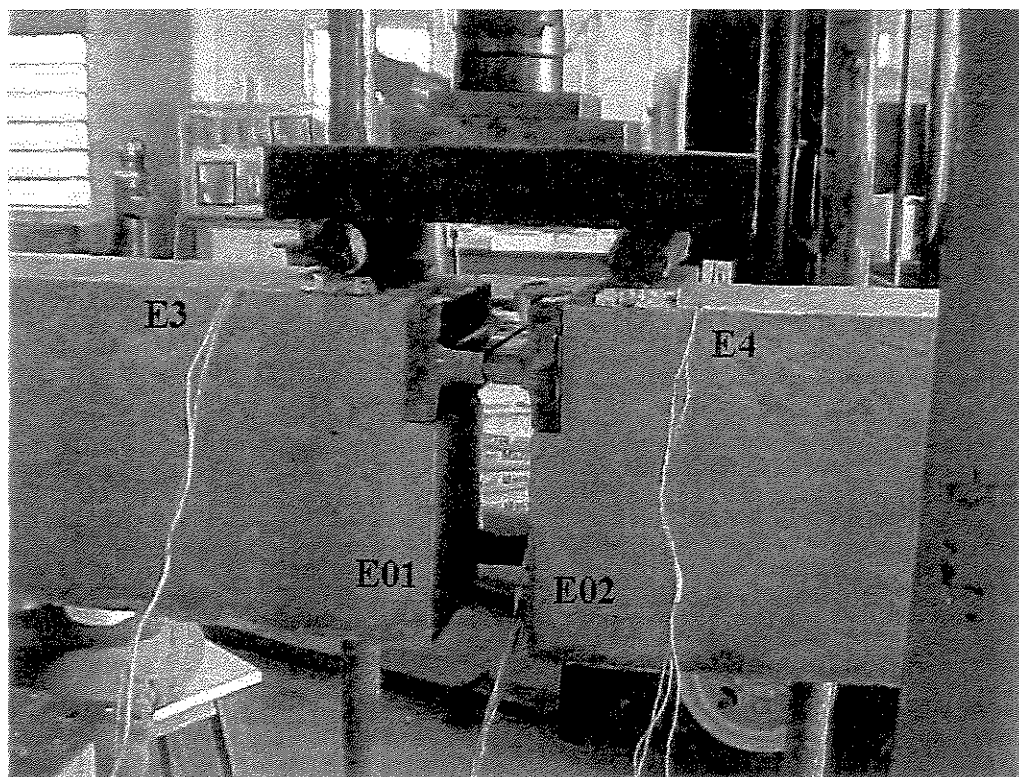
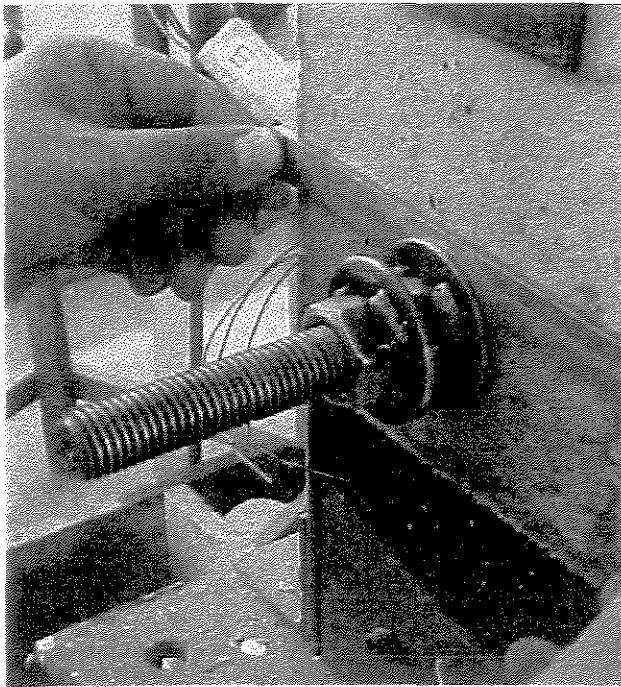
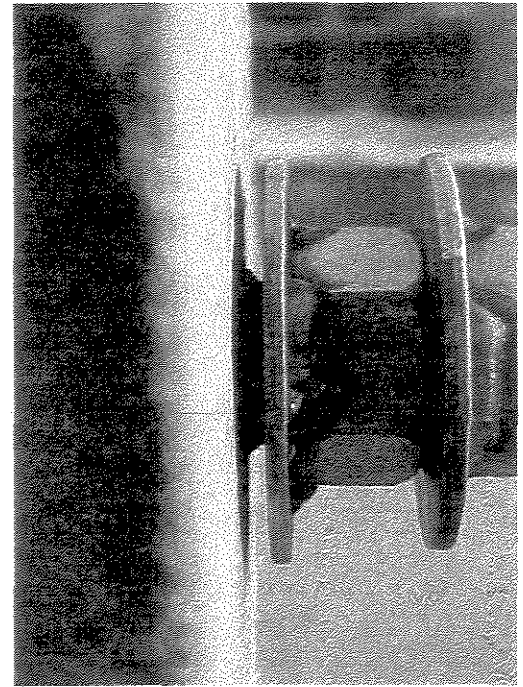


Figura 7.21 Detalhe do centro da viga, articulação e bloquete de aplicação de carga.

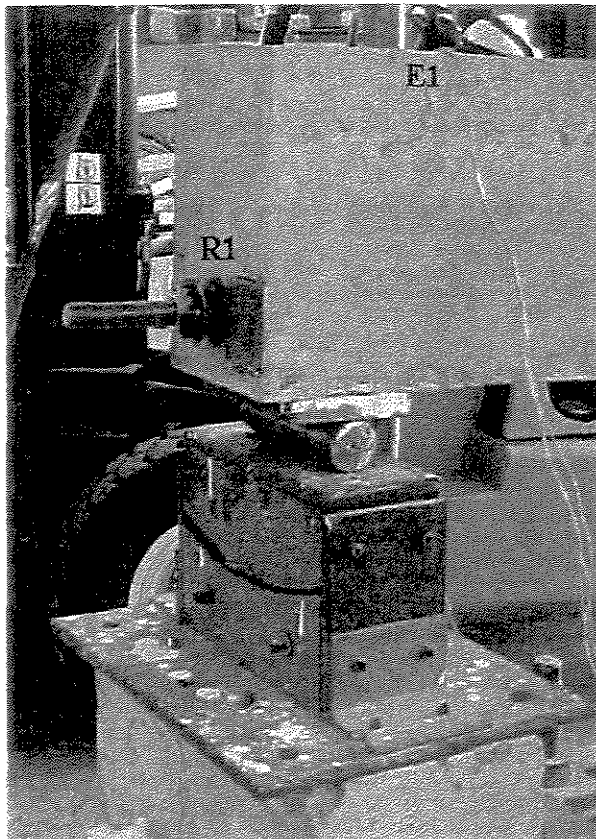


(a)

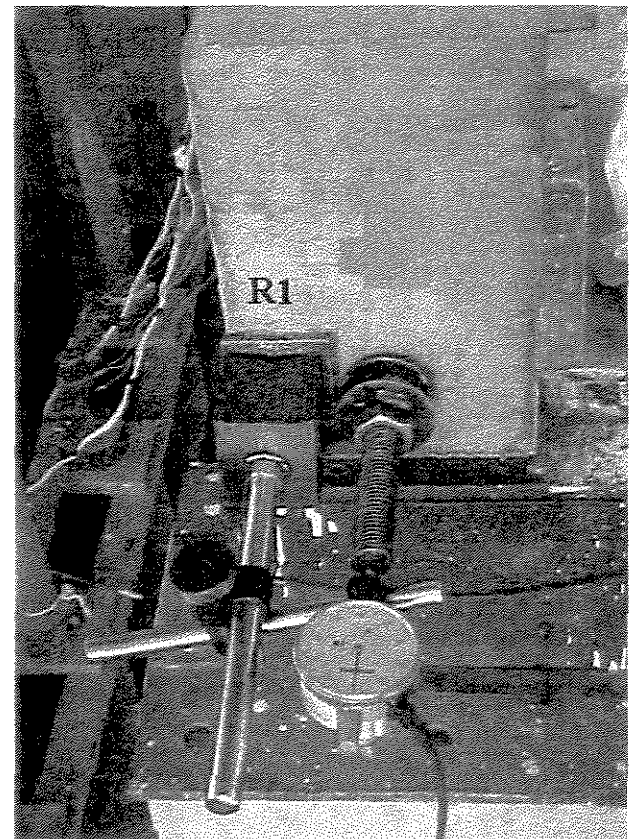


(b)

Figura 7.22 (a) Dispositivo de travamento na extremidade da barra. (b) Dispositivo, folga de 3 mm



(a)



(b)

Figura 7.23 (a) Dispositivo de apoio na extremidade da viga. (b) Fixação do relógio comparador.

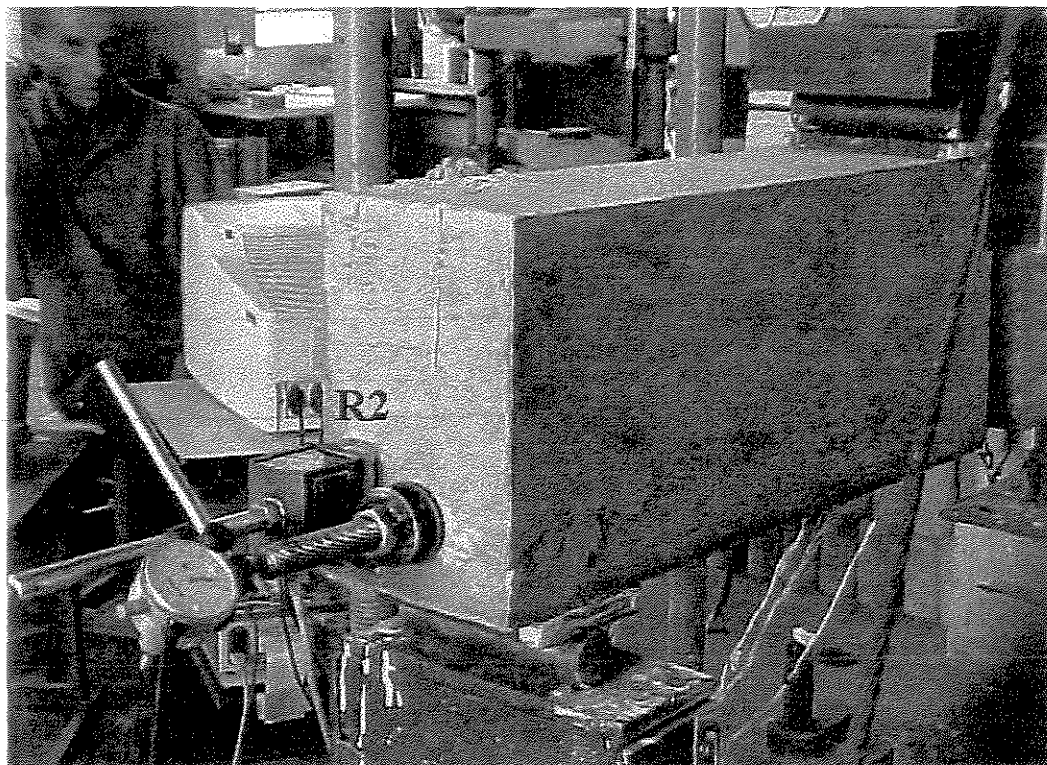


Figura 7.24. Ensaio em andamento, monitorado eletronicamente no computador.

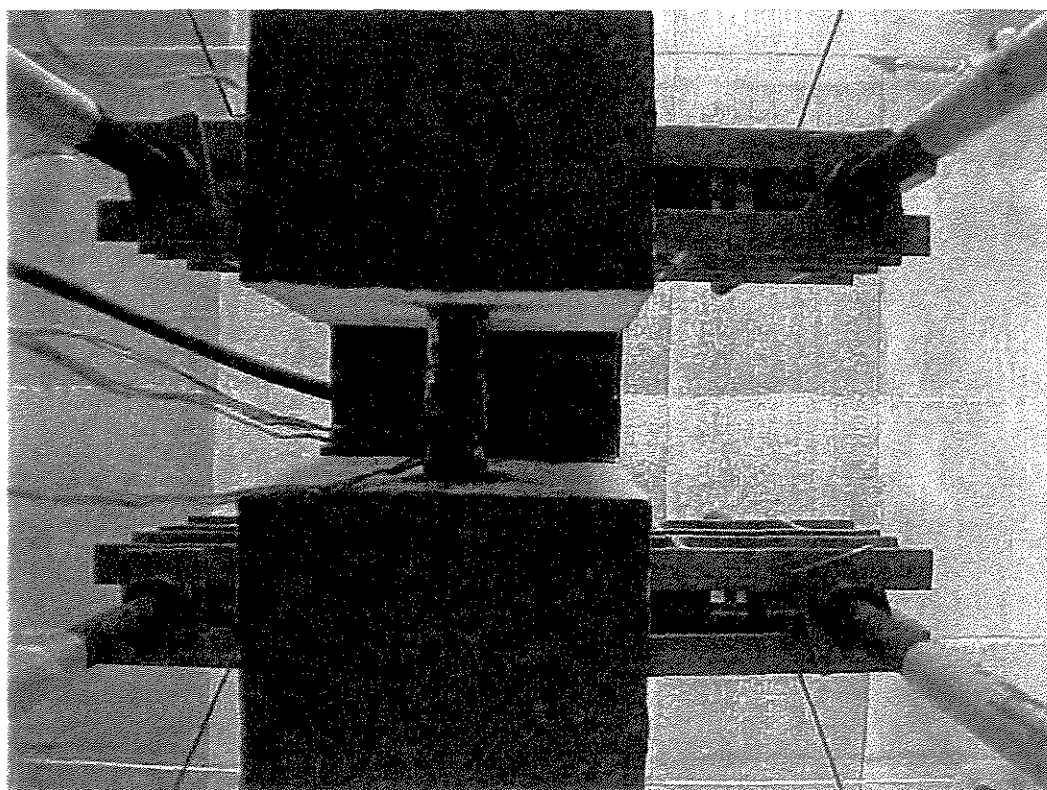


Figura 7.25 Vista de baixo da viga, mostrando a barra monitorada no vão central.

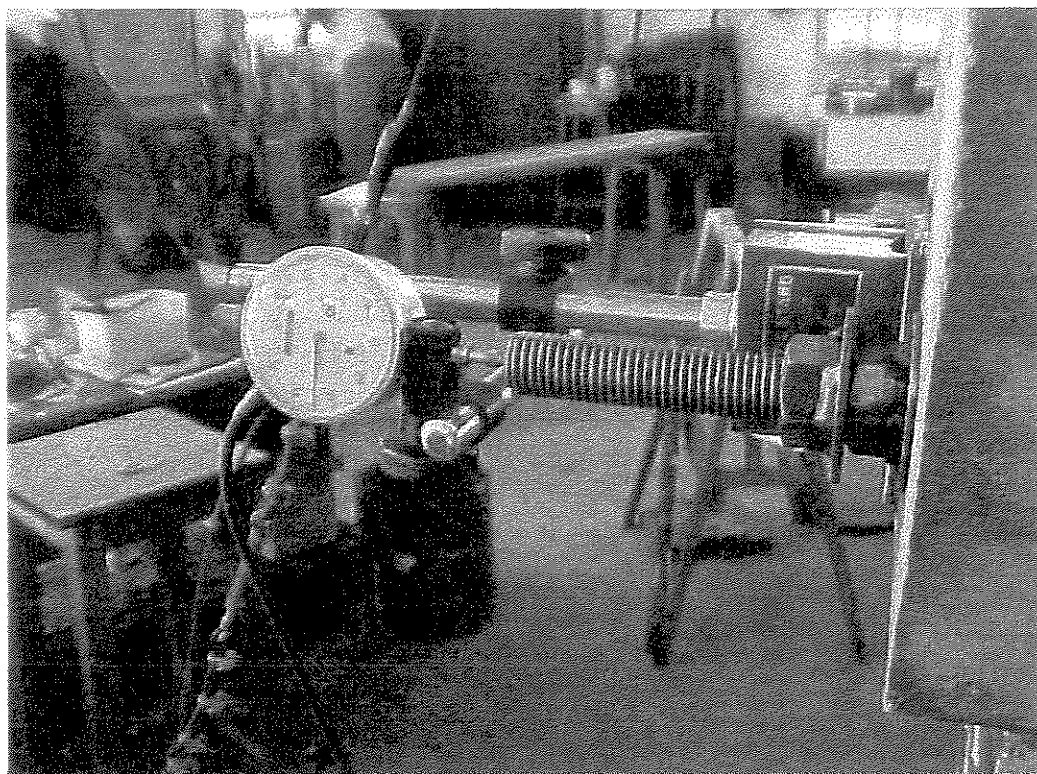


Figura 7.26 Fim do ensaio neste lado da viga, o dispositivo encosta no concreto.

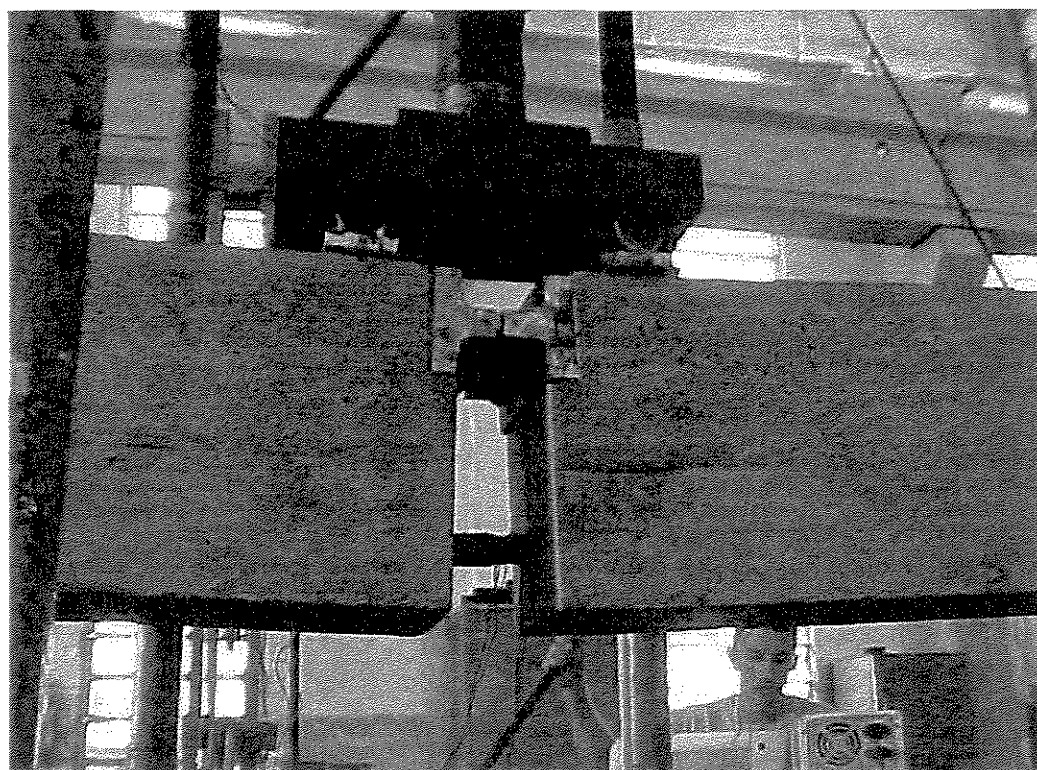


Figura 7.27 No fim do ensaio, no meio do vão, nota-se a flexão sofrida pela viga.

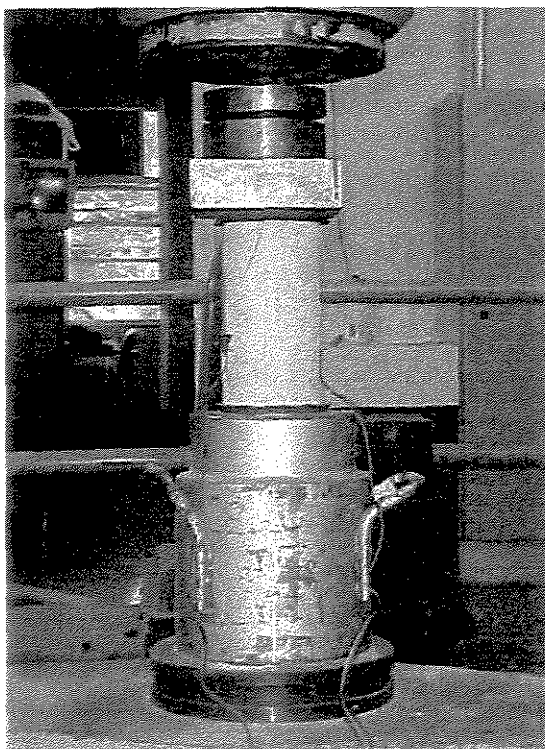


(a)

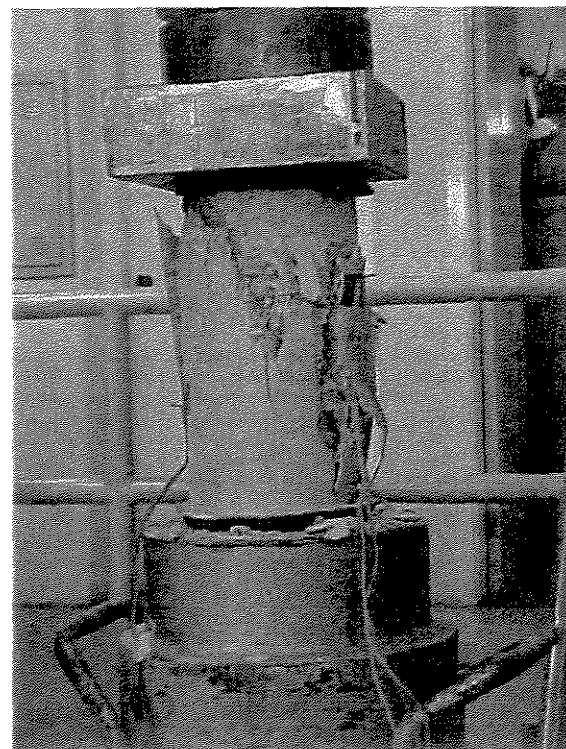


(b)

Figura 7.28 (a) Ensaio à compressão do concreto. (b) Corpos de prova – módulo de deformação.



(a)



(b)

Figura 7.29 Determinação do módulo de deformação (a) Início do ensaio. (b) Fim do ensaio.

8 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

8.1 Análise para concreto de resistência à compressão na faixa de 25 MPa

A RILEM prevê no seu método de ensaio RC 5 (1978), que aconteça um deslizamento relativo, entre o concreto e o aço, de 3 mm em cada extremidade da viga, e antes do escoamento da armadura longitudinal, para que seja considerado finalizado o ensaio. Analisando para concreto com resistência à compressão na faixa de 25 MPa, pode-se notar nas figuras 7.1, 7.2 e 7.3, para comprimentos de aderência de 3ϕ , 5ϕ e 10ϕ respectivamente, que foi conseguido este intento.

Assim, considera-se que nos três ensaios, o deslizamento padrão aconteceu antes do início do escoamento da armadura longitudinal ($\epsilon_y = 2,55 \text{ ‰}$). A máxima deformação específica da armadura longitudinal (ϵ_0) durante os ensaios foi de $0,65 \text{ ‰}$ e $2,36 \text{ ‰}$ para comprimentos de aderência 3ϕ e 5ϕ , respectivamente, conforme pode ser observado nas tabelas 7.3 e 7.4. Para comprimento de aderência de 10ϕ , por motivo de não funcionamento dos extensômetros, não se obteve valores para ϵ_0 . Contudo, tem-se valores para $\epsilon_3 = 2,06 \text{ ‰}$ e $\epsilon_4 = 1,99 \text{ ‰}$ com uma carga máxima no fim do ensaio de 90 kN que, conforme relatado no capítulo 7, garante não ter havido escoamento do aço, como pode ser visto na tabela 7.5.

Para todos os comprimentos de aderência, os extensômetros E1 e E2, colados depois da zona de aderência, praticamente não apresentaram leitura significativa, o que confirma que

realmente não houve transmissão de esforços para aquela região antes que ocorresse o deslizamento.

Para todas as vigas experimentadas desta série, os extensômetros E3 e E4, colados antes da zona de aderência, mostraram valores próximos dos lidos nos extensômetros E01 e E02. Isto confirma, praticamente, o mesmo estado de tensões na barra longitudinal para o trecho que vai do meio do vão até antes da região de aderência. Vale lembrar que os extensômetros E0 estão livres e os E3 e E4 estão confinados dentro da bainha, podendo sofrer atrito durante a flexão da viga; isto, além da posição relativa destes extensômetros, pode justificar a pequena diferença nas leituras dos mesmos. (vide tabelas 7.3, 7.4 e 7.5).

Nota-se ainda, observando as curvas e tabelas relativas a esta série de ensaios, que existe um padrão de deslizamento até um intervalo que fica entre 600 μm e 1000 μm sendo que depois deste intervalo, o deslizamento se processa de maneira brusca.

Pode-se dizer, também, que as curvas obtidas obedecem a um padrão bem definido e com valores próximos para ambos os lados da viga, o que permite uma boa confiabilidade para se trabalhar com valores médios.

Analizando o gráfico da figura 7.4 pode-se dizer que para deslizamentos de 50 μm até 2500 μm , a tensão de aderência decresce em função de um comprimento de aderência maior, de 3 ϕ para 5 ϕ , bem como de 5 ϕ para 10 ϕ . A exceção é para deslizamento de 10 μm onde a tensão de aderência cresce conforme o comprimento de aderência aumenta de 3 ϕ para 5 ϕ e sofre um pequeno decréscimo, na medida em que o comprimento de aderência aumenta de 5 ϕ para 10 ϕ .

Resumindo, pode-se, via de regra, dizer que, para pequenos deslizamentos, até 10 μm , o crescimento da tensão de aderência é diretamente proporcional ao aumento do comprimento de aderência; considerando que o decréscimo na tensão de aderência para comprimentos de aderência de 5 ϕ para 10 ϕ é muito pequeno. Nota-se, também, observando a figura 7.4, que para deslizamentos acima de 50 μm , inclusive, o valor da tensão de aderência varia na razão inversa

do comprimento de aderência, variando a uma taxa cada vez maior à medida que se aproxima do máximo de 2500 μm .

8.2 Análise para concreto de resistência à compressão na faixa de 50 MPa

Analisando para concreto com resistência à compressão na faixa de 50 MPa, pode-se notar nas figuras 7.5 e 7.6, para comprimentos de aderência de 3 ϕ e 5 ϕ , que foi conseguido o deslizamento limite de 3 mm proposto pela RILEM RC 5 (1978), com exceção de um dos lados em cada viga, onde por problemas operacionais atingiu-se, respectivamente, os valores de 2,939 mm e 2,770 mm.

Assim, considera-se que em ambos os ensaios o deslizamento padrão aconteceu antes do escoamento do aço ($\epsilon_y = 2,55 \text{ ‰}$). A máxima deformação específica (ϵ_0) durante os ensaios foi de 2,41 ‰ e 1,55 ‰ para comprimentos de aderência 3 ϕ e 5 ϕ , respectivamente, conforme se observa nas tabelas 7.9 e 7.10.

Para comprimento de aderência de 10 ϕ observa-se que não foi atingido o deslizamento relativo padrão, antes do início de escoamento da armadura longitudinal. Nota-se um deslizamento de 0,384 mm para uma deformação específica $\epsilon_0 = 2,75 \text{ ‰}$ e logo em seguida um deslizamento 0,413 mm para deformação específica $\epsilon_0 = 11,4 \text{ ‰}$, conforme consta na tabela 7.11 e na figura 7.7.

Para comprimento de aderência de 10 ϕ , no lado ímpar da viga, praticamente não se obteve deslizamento relativo (deslizamento máximo = 2 μm). Existe a possibilidade de não ter havido realmente deslizamento deste lado, mas é mais provável que o relógio comparador não tenha funcionado.

Para todos os comprimentos de aderência, os extensômetros E1 e E2, colados depois da

zona de aderência, praticamente não apresentaram leitura significativa, o que confirma que realmente não houve transmissão de esforços para aquela região antes que ocorresse o deslizamento.

Para todas as vigas experimentadas desta série, os extensômetros E3 e E4, colados antes da zona de aderência, apresentaram valores de deformação próximos dos lidos nos extensômetros E01 e E02. Isto confirma praticamente o mesmo estado de tensões na barra longitudinal, para o trecho que vai do meio do vão até antes da região de aderência. (vide tabelas 7.9, 7.10 e 7.11).

Nota-se ainda, observando as curvas e tabelas relativas ao comprimento de aderência de 3ϕ e 5ϕ , que existe um padrão de deslizamento até um intervalo que fica entre $800\ \mu\text{m}$ e $1000\ \mu\text{m}$, sendo que depois deste intervalo, o deslizamento se processa de maneira brusca. Vale lembrar que isto não pode ser observado para o comprimento de aderência de 10ϕ , onde o aço escoou com um deslizamento relativamente baixo, conforme já mencionado anteriormente.

Pode-se dizer, também, que as curvas obtidas obedecem a um padrão bem definido e com valores bastante próximos para ambos lados da viga, o que permite uma boa confiabilidade para se trabalhar com valores médios.

Analisando o gráfico da figura 7.8, pode-se dizer que no início do ensaio, para deslizamentos de $10\ \mu\text{m}$ e $50\ \mu\text{m}$ a tensão de aderência cresce conforme aumenta o comprimento de aderência; para deslizamentos de $100\ \mu\text{m}$ até $250\ \mu\text{m}$, a tensão de aderência cresce em função do aumento do comprimento de aderência de 3ϕ para 5ϕ , mas depois acontece uma inversão com a tensão de aderência decrescendo com o aumento do comprimento de aderência de 5ϕ para 10ϕ .

Para deslizamentos maiores, de $300\ \mu\text{m}$ até $2500\ \mu\text{m}$, acontece uma inversão nas curvas; nota-se que a tensão de aderência decresce em função de um comprimento de aderência maior. Para comprimento de aderência de 10ϕ não houve deslizamentos acima de $400\ \mu\text{m}$, o que se explica pela ocorrência do escoamento do aço antes que se atingisse tais valores.

Resumindo, pode-se, via de regra, dizer que, para pequenos deslizamentos, até 50 μm , o crescimento da tensão de aderência é diretamente proporcional ao aumento do comprimento de aderência e que para grandes deslizamentos acima de 250 μm o valor da tensão de aderência varia na razão inversa do comprimento de aderência. Seria prudente levantar dúvidas sobre os resultados de deslizamentos obtidos no intervalo acima de 50 μm e abaixo de 300 μm , devido às mudanças bruscas que ocorrem na inflexão das curvas neste trecho.

8.3 Análise para concreto de resistência à compressão na faixa de 85 MPa

Analisando para concreto com resistência à compressão na faixa de 85 MPa, nota-se, nas figuras 7.9, 7.10 e 7.11 e nas tabelas 7.15, 7.16 e 7.17, que somente para o comprimento de aderência de 3ϕ , e somente para um dos lados da viga, foi obtido um deslizamento relativo máximo próximo de 3,00 mm. Do outro lado da viga, o deslizamento relativo máximo foi de 1,102 mm. É importante observar que estes valores de deslizamentos máximos relativos ocorreram muito depois da deformação na armadura longitudinal, correspondente ao início de escoamento.

Para o comprimento de aderência da armadura correspondente a 3ϕ , o início de escoamento do aço ocorreu para um deslizamento de 0,564 mm, para o comprimento de aderência de 5ϕ , o início de escoamento do aço ocorreu para um deslizamento de 0,058 mm e para o comprimento de aderência de 10ϕ o início de escoamento da armadura ocorreu para um deslizamento máximo de 0,015 mm.

Nota-se, portanto, para este concreto de elevado desempenho, no tocante à resistência de aderência, que em nenhum instante do ensaio foi obtido o deslizamento padrão que determina o encerramento do mesmo segundo a norma da RILEM (1978); ficando este fato mais evidente, na medida que se aumenta o comprimento de aderência.

Nota-se, ainda, observando uma das curvas relativas ao comprimento de aderência de 3ϕ , que existe um padrão de deslizamento até um intervalo que fica entre 1000 μm e 1200 μm , sendo que depois deste intervalo, o deslizamento se processa de maneira brusca. Vale observar, que valores de deslizamentos posteriores ao início do escoamento da armadura, não devem ser considerados para o cálculo da tensão de aderência.

Analisando o gráfico da figura 7.12, pode-se dizer, que para deslizamentos de até 10 μm , o crescimento da tensão de aderência é diretamente proporcional ao aumento do comprimento de aderência e que para deslizamentos de 15 μm até 50 μm o valor da tensão de aderência varia na razão inversa do comprimento de aderência, notando-se que temos valores somente para 3ϕ e 5ϕ ; para 10ϕ não houve deslizamentos dessa magnitude. Acima de 100 μm até 450 μm , só temos deslizamentos para 3ϕ .

8.4 Análise interativa entre os concretos de resistência 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa

Com o propósito de se fazer uma análise interativa entre os três concretos ensaiados nesta pesquisa, as curvas carga-deslizamento das figuras 7.1, 7.2, 7.3, 7.5, 7.6, 7.7, 7.9, 7.10 e 7.11, foram agrupadas e colocadas na mesma escala, conforme o objeto do estudo em questão.

Assim, as curvas da figura 8.1, 8.2, e 8.3 comparam, respectivamente, a evolução carga-deslizamento de cada concreto estudado, (25 MPa, 50 MPa e 85 MPa), em função dos comprimentos de aderência, com 3ϕ , 5ϕ e 10ϕ . As curvas da figura 8.4, 8.5 e 8.6 comparam, respectivamente, a evolução carga-deslizamento para cada comprimento de aderência utilizado (3ϕ , 5ϕ e 10ϕ), e os concretos nas faixas de resistência média à compressão de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa.

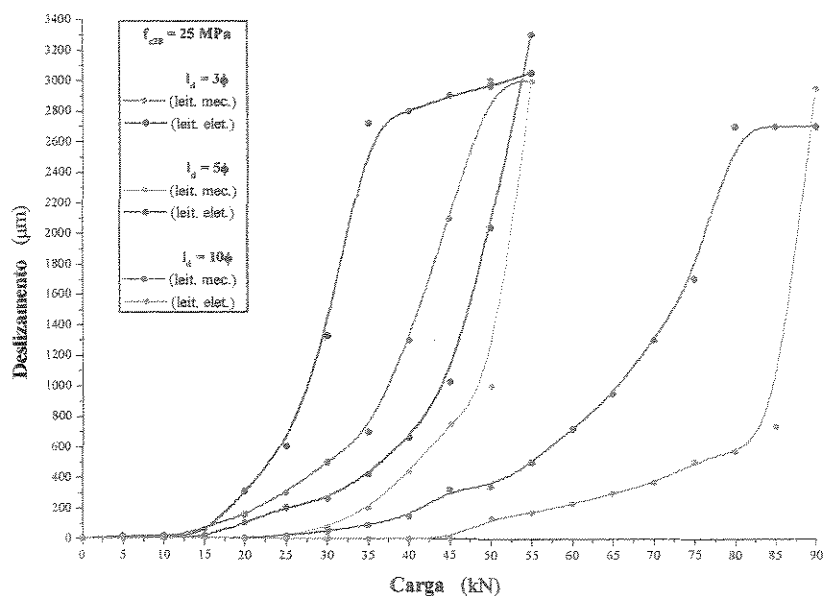


Figura 8.1 Curvas carga-deslizamento para concreto com resistência média à compressão na faixa de 25 MPa e comprimentos de aderência de 3ϕ , 5ϕ e 10ϕ .

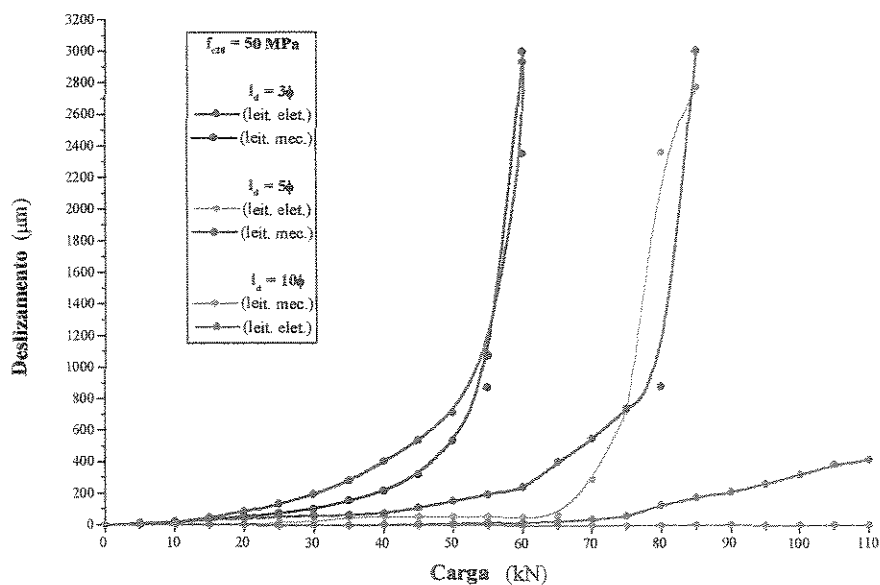


Figura 8.2 Curvas carga-deslizamento para concreto com resistência média à compressão na faixa de 50 MPa e comprimentos de aderência de 3ϕ , 5ϕ e 10ϕ .

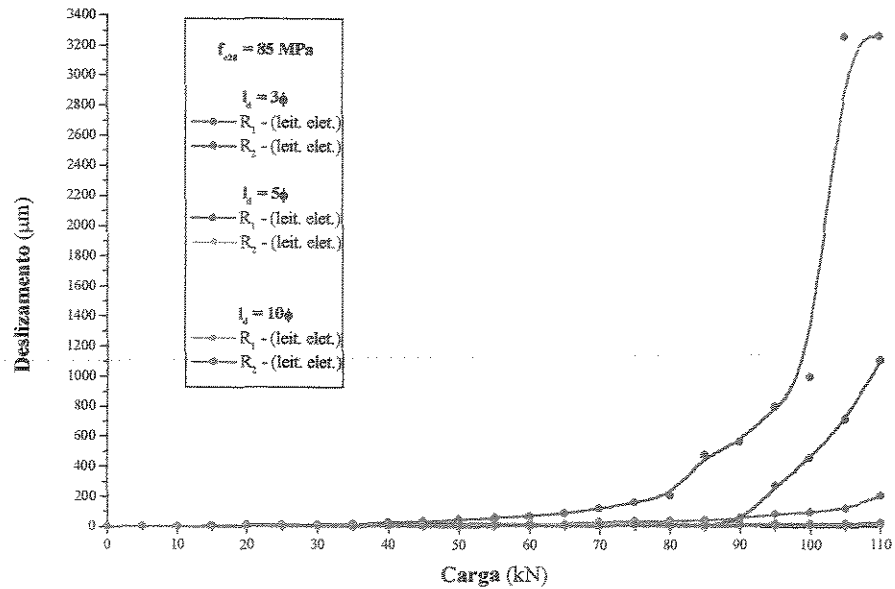


Figura 8.3 Curvas carga-deslizamento para concreto com resistência média à compressão na faixa de 85 MPa e comprimentos de aderência de 3ϕ , 5ϕ e 10ϕ .

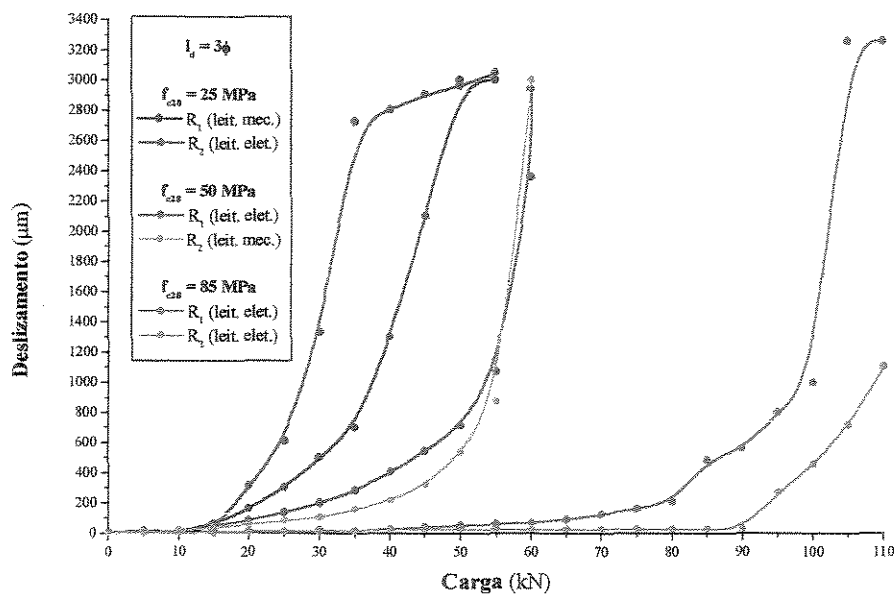


Figura 8.4 Curvas carga-deslizamento para comprimento de aderência de 3ϕ e concretos nas faixas de resistência média à compressão de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa.

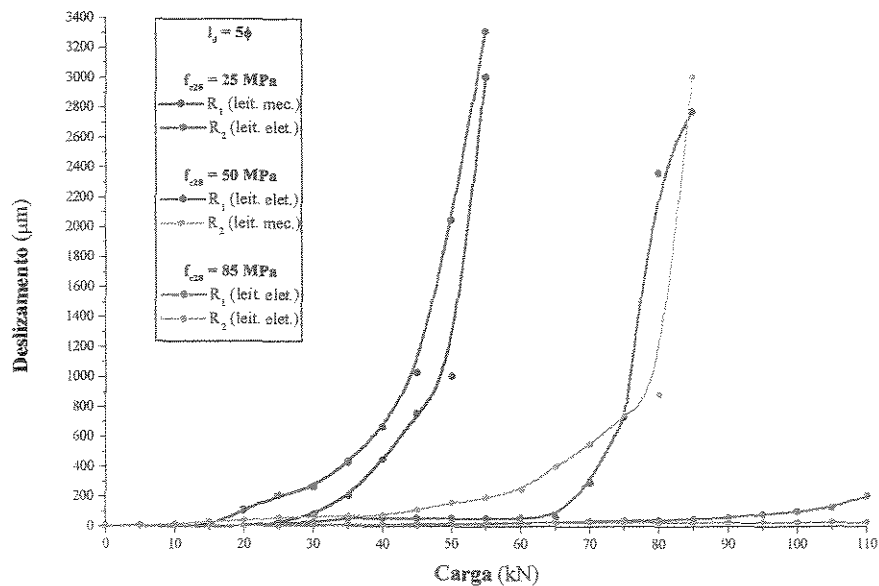


Figura 8.5 Curvas carga-deslizamento para comprimento de aderência de 5ϕ e concretos nas faixas de resistência de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa.

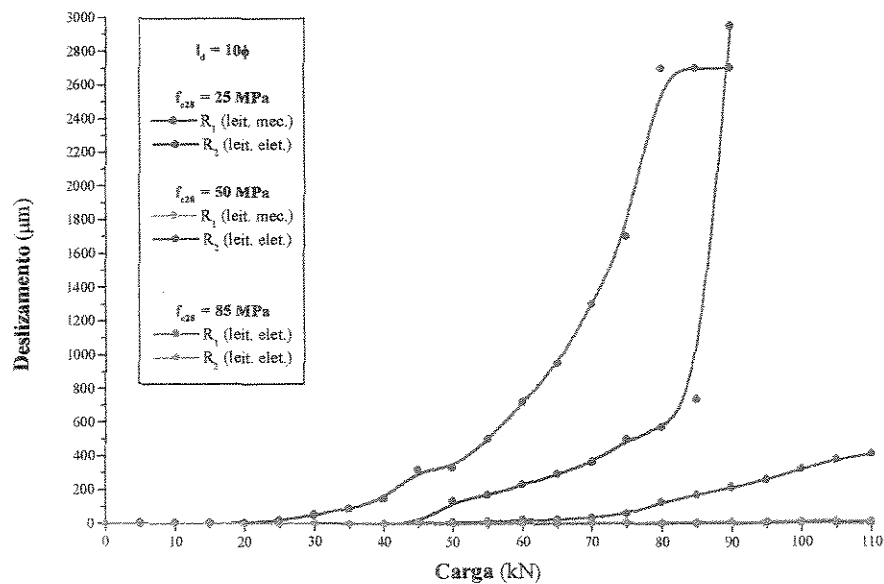


Figura 8.6 Curvas carga-deslizamento para comprimento de aderência de 10ϕ e concretos nas faixas de resistência média à compressão de 25 MPa, 50 MPa e 85 MPa.

Pode ser observado que, invariavelmente, para todos os comprimentos de aderência e para uma mesma carga, o concreto de resistência à compressão na faixa de 25 MPa apresenta deslizamentos maiores do que os observados para o concreto na faixa de resistência à compressão de 50 MPa, que por sua vez apresenta deslizamentos maiores que para o concreto na faixa de 85 MPa, conforme pode ser comparado nos gráficos das figuras 8.4, 8.5 e 8.6.

Para os comprimentos de aderência de 5ϕ e 10ϕ , o início do deslizamento ocorre com cargas menores para o concreto na faixa de 25 MPa se comparado com o concreto de resistência à compressão na faixa de 50 MPa; o mesmo pode-se dizer do concreto de 50 MPa em relação ao concreto de 85 MPa. Para o comprimento de aderência de 3ϕ , não se nota diferença significativa na carga relativa ao início do deslizamento para o concreto de 25 MPa em relação ao de 50 MPa, mas já se nota, do 50 MPa em relação ao de 85 MPa. Isto pode ser confirmado comparando-se os gráficos das figuras 8.4, 8.5 e 8.6.

No capítulo 7, foram calculados valores de tensão de aderência, para cada comprimento de aderência utilizado e diferentes deslizamentos (de 10 a 2500 μm). Os valores, para cada resistência de concreto, constam das tabelas 7.6, 7.12 e 7.18. Para continuidade dos estudos, os valores relativos a deslizamentos de 10 μm , 100 μm e 1000 μm , foram extraídos das referidas tabelas e estão representados, neste capítulo, nas tabelas 8.1 e 8.2. A partir destas tabelas, elaboraram-se respectivamente, as curvas das figuras 8.7 e 8.8.

Tabela 8.1 Tensões em função dos comprimentos de aderência para deslizamentos de 10, 100 e 1000 μm (concretos com resistências de 25, 50 e 85 MPa)

l_d	Concreto - $f_{c28}=25$ MPa			Concreto - $f_{c28}=50$ MPa			Concreto - $f_{c28}=85$ MPa		
	Deslizamentos (μm)			Deslizamentos (μm)			Deslizamentos (μm)		
	10	100	1000	10	100	1000	10	100	1000
3ϕ	3,0	6,7	13,2	3,0	10,2	21,8	9,5	31,9	-
5ϕ	4,3	6,1	11,2	3,3	13,2	18,8	10,0	24,4	-
10ϕ	4,0	5,2	9,1	6,0	9,5	-	10,9	-	-

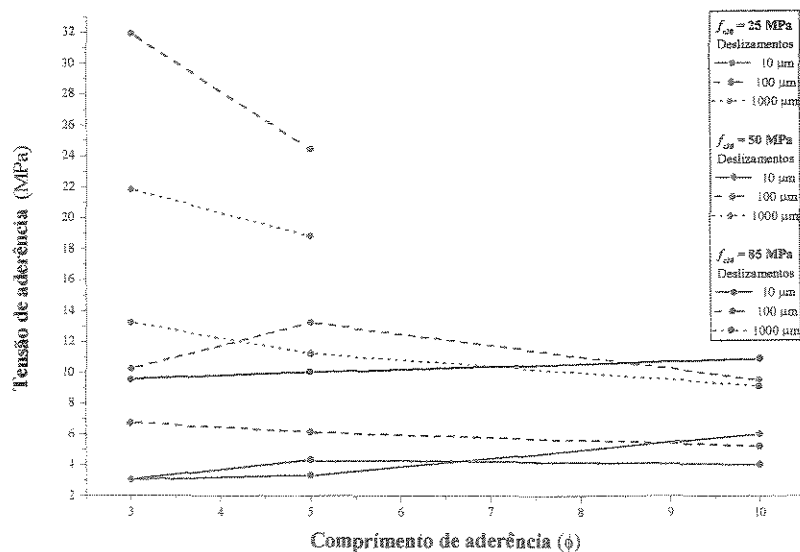


Figura 8.7 Curvas de tensões em função dos comprimentos de aderência para deslizamentos de 10, 100 e 1000 μm e resistência à compressão dos concretos de 25, 50 e 85 MPa.

Analisando as curvas da figura 8.7, faz-se as considerações abaixo relacionadas.

Pode-se notar que praticamente não há diferença nos valores de tensão de aderência entre os concretos de 25 e 50 MPa. Contudo, esta diferença passa a ser significativa, quando se comparam estes concretos com o de 85 MPa. Isto se justifica, provavelmente, devido à melhoria físico-química da interface aço-concreto, por conta da baixa relação a/c utilizada nesta série de vigas de maior resistência.

Pode-se dizer que, para pequenos deslizamentos, da ordem de 10 μm , existe a tendência de aumento da tensão de aderência em função do incremento no comprimento de aderência, isto a se considerar insignificante a queda na tensão de aderência de 4,3 MPa para 4,0 MPa, relativo aos comprimentos de aderência de 5ϕ para 10ϕ , para o concreto de 25 MPa. A pequena diferença que provoca esta discrepância, deve ser atribuída à possível dispersão de resultados que pode ocorrer neste tipo de ensaio, para pequenos valores de deslizamentos entre aço e concreto.

É importante lembrar que a aderência é constituída de três parcelas: aderência química, aderência mecânica e aderência por atrito.

Para pequenos deslizamentos, a parcela de adesão química pode ser responsável pelo pequeno incremento na tensão de aderência, conforme o comprimento de aderência aumenta. No estudo do diagrama de TASSIOS (1979), no capítulo 3, (figura 3.6), mencionou-se que até a tensão τ_{b0} , os deslocamentos são da ordem de micrômetros e diz-se que a união entre o aço e o concreto é de natureza química. Aumentando a solicitação, a tensão de aderência cresce, atingindo τ_{b0} , instante em que é rompida a aderência química.

Para deslizamentos maiores, de 100 μm e 1000 μm , observa-se, a tendência de um pequeno decréscimo da tensão, conforme o aumento do comprimento de aderência. Faz-se exceção à afirmação anterior, para o trecho de comprimento de aderência de 3 ϕ para 5 ϕ em concreto de 50 MPa; devendo este fato ser avaliado com maior propriedade, promovendo a realização de um maior número de ensaios, pois provavelmente trata-se de dispersão de resultados. Conforme estudos de TASSIOS (1979), deve ser lembrado, que para grandes valores de deslizamento, já não existe aderência química, tendo sido acionado o engrenamento da aderência mecânica entre o concreto e o aço.

De qualquer forma, para cada uma das três resistências de concreto estudado (25 MPa, 50 MPa e 85 MPa), em relação a cada um dos valores de deslizamento (10 μm , 100 μm ou 1000 μm), os valores correspondentes, da tensão de aderência estão muito próximos entre si, praticamente independendo do comprimento de aderência, o que dá confiabilidade para se trabalhar com valores médios.

Tabela 8.2 Tensões de aderência em função da resistência do concreto para deslizamentos de 10, 100 e 1000 μm (comprimentos de aderência de 3 ϕ , 5 ϕ e 10 ϕ)

f_{cm28}	Comprimentos de aderência								
	3 ϕ			5 ϕ			10 ϕ		
	10 μm	100 μm	1000 μm	10 μm	100 μm	1000 μm	10 μm	100 μm	1000 μm
25 MPa	3,0	6,7	13,2	4,3	6,1	11,2	4,0	5,2	9,1
50 MPa	3,0	10,2	21,8	3,3	13,2	18,8	6,0	9,5	-
85 MPa	9,5	31,9	-	10,0	24,4	-	10,9	-	-

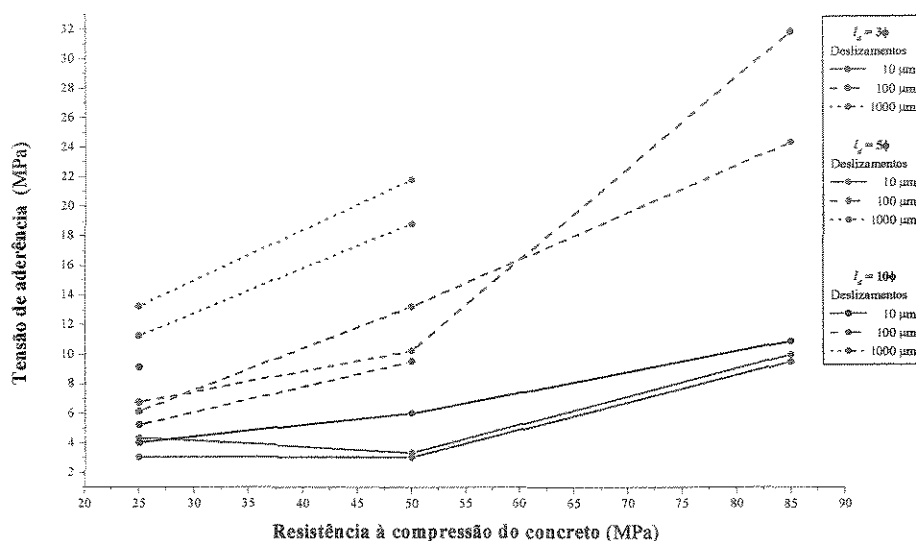


Figura 8.8 Curvas de tensões em função da resistência do concreto, para deslizamentos de 10, 100 e 1000 μm e comprimentos de aderência de 3 ϕ , 5 ϕ e 10 ϕ .

Analisando-se as curvas da figura 8.8, observa-se que, via de regra, para os comprimentos de aderência utilizados de 3 ϕ , 5 ϕ e 10 ϕ , a tensão de aderência aumenta com o incremento da resistência do concreto de 25 MPa para 50 MPa e de 50 MPa para 85 MPa, não existindo nenhuma dúvida quanto a isso quando se trata de deslizamentos de 100 μm e 1000 μm e comprimento de aderência grande como o de 10 ϕ .

Levanta-se dúvida, para pequenos deslizamentos, de 10 μm , para comprimento de

aderência de 3ϕ , quando se obteve o mesmo valor de tensão de aderência para os dois concretos estudados. Pode-se pensar, da mesma maneira, para comprimento de aderência de 5ϕ , quando, num quadro inverso, a tensão de aderência diminui com o aumento da resistência à compressão do concreto. Entretanto, como os valores são bastante próximos, este fato deve ser atribuído à possível dispersão de resultados que pode ocorrer neste tipo de ensaio, para pequenos valores de deslizamento entre o aço e o concreto.

8.5 Discussão dos procedimentos normatizados para o cálculo da tensão de aderência

A seguir, a tensão de aderência calculada conforme procedimentos normatizados da NBR 6118 (1978), NBR 6118 (2000) e EUROCODE 2 (1990), são comparados com os resultados obtidos neste trabalho.

8.5.1 Tensão de aderência baseada nos resultados experimentais obtidos

De acordo com o Boletim do CEB nº 73, citado por SORETZ (1972), a tensão de aderência é dada pela média das tensões de aderência, relativas a deslizamentos de $10\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ e $1000\ \mu\text{m}$, conforme a equação 8.1 e pela tensão máxima (última), τ_{br} , relativa à ruptura da aderência.

$$\tau_{bm} = \frac{\tau_{b10} + \tau_{b100} + \tau_{b1000}}{3} \quad (8.1)$$

Conforme ISA (1997), caso a ruptura de aderência ocorra antes de se atingir o valor de

deslizamento de 1000 μm , a resistência máxima τ_{br} se constituirá no terceiro valor a ser introduzido no cálculo de τ_{bm} . O mesmo autor denomina a tensão máxima de aderência de τ_{br} .

Com já foi observado no capítulo 7, e pode ser visto nas figuras 8.1, 8.2 e 8.3, um deslizamento brusco ocorre no intervalo entre 600 μm e 1000 μm para o concreto na faixa de resistência de 25 MPa, entre 800 μm e 1000 μm para o concreto na faixa de resistência de 50 MPa e entre 1000 μm e 1200 μm para o concreto na faixa de 85 MPa, salientando-se que quando houve deslizamento desta magnitude para o concreto de 85 MPa (3 ϕ , para uma das semi-vigas) já havia ocorrido o escoamento do aço.

Da mesma forma, pode-se observar nas figuras 8.1, 8.2 e 8.3, que o deslizamento se torna brusco para tensões relativas a deslizamentos em torno de 1000 μm para os três concretos estudados; valendo ressaltar, pela inclinação das curvas, que quanto maior a resistência do concreto mais frágil é a ruptura.

Com base nestas observações experimentais, adotou-se neste trabalho, uma tensão de ruptura τ_{br} , relativa ao deslizamento de 1000 μm . Daí, define-se a equação 8.2.

$$\tau_{br} = \tau_{b1000} \quad (8.2)$$

8.5.2 Tensão de aderência, calculada pela NBR 6118 (1978)

Em situações de boa aderência, deslizamento em peças fletidas e aços de coeficientes de conformação superficial superiores a 1,5 ($\eta_b \geq 1,5$), a tensão de aderência é dada pela equação 8.3.

$$f_{bd} = 0,74 \cdot \sqrt[3]{f_{cd}^2} \quad (8.3)$$

8.5.3 Tensão de aderência, calculada pelo projeto de revisão da NBR 6118/2000

Nas ancoragens de armaduras passivas, em situações de boa aderência, a tensão de aderência é calculada pela equação 8.4

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (8.4)$$

onde,

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

em situação de boa aderência, $\eta_2 = 1,00$

$\phi \leq 32 \text{ mm}$, $\eta_3 = 1,00$

Para deslizamento da armadura em peças fletidas, deve-se adotar valores de tensão de aderência multiplicados por 1,75.

8.5.4 Tensão de aderência, calculada pelo EUROCODE 2

Em situações de boa aderência, barras de alta aderência e $\phi \leq 32 \text{ mm}$, a tensão de aderência é calculada pela equação 8.5

$$f_{bd} = \frac{2,25 \cdot f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (8.5)$$

É importante dizer, que os procedimentos normatizados acima se aplicam a concretos com resistência característica à compressão de até 50 MPa. Deve ser observado, que neste

trabalho, um dos concretos possui resistência média à compressão na faixa de 85 MPa.

8.5.5 Comparação entre as tensões de aderência calculadas teoricamente e as tensões de aderência experimentais

A tabela 8.3 contém os valores calculados, das tensões de aderência, segundo a NBR 6118 (1978), pela equação 8.3; segundo o projeto de revisão da NBR 6118 (2000), pela equação 8.4; e pelo EUROCODE 2 (1990), pela equação 8.5, e também as tensões de aderência τ_{b10} , τ_{b100} , τ_{b1000} e τ_{br} .

Será usado para o valor de f_{cd} , o resultado da resistência à compressão, f_{cm28} . Da mesma forma, foi usado para f_{ctd} , o valor de resistência à tração, f_{tm28} ; e para o valor de $f_{ctk,inf/\gamma_c}$, o resultado de f_{tm28} . Todos os valores, que substituem os teóricos, foram determinados experimentalmente no laboratório. O uso destes valores se justifica, por estarmos comparando valores experimentais.

As tensões de aderência τ_{b10} , τ_{b100} , τ_{b1000} são relativas aos deslizamentos de 10 μm , 100 μm e 1000 μm , respectivamente. Para cada resistência de concreto, a tensão de aderência, para um determinado deslizamento, foi calculada pela média das tensões de aderência obtidas para cada comprimento de aderência utilizado neste trabalho. Os dados para cálculo destas médias foram obtidos da tabela 8.1 (podem ser obtidos também na tabela 8.2). O uso de valores médios é justificado, pois, como foi mencionado em análise anterior, neste mesmo capítulo, fixando um dos valores de deslizamento (10 μm ou 100 μm ou 1000 μm) para qualquer resistência de concreto estudado, os valores correspondentes das tensões de aderência, estão muito próximas entre si, praticamente independentemente do comprimento de aderência; portanto, há confiabilidade em se trabalhar com valores médios.

A tensão de aderência τ_{br} é dada pela equação 8.2, e τ_{bm} foi calculada pela equação 8.1.

Tabela 8.3 Tensões τ_{b10} , τ_{b100} , τ_{b1000} , τ_{bm} e τ_{br} e tensões de aderência pela NBR 6118 (1978 e 2000), e EUROCODE 2 (1990), dadas em função da resistência do concreto.

f_{cm28}	Tensões de aderência (MPa)					Tensões de aderência (MPa)		
	τ_{b10}	τ_{b100}	τ_{b1000}	τ_{bm}	τ_{br}	NBR 6118/1978	NBR 6118/2000	EUROCODE 2
25 MPa	3,8	6,0	11,2	7,0	11,2	6,5	9,8	5,6
50 MPa	4,1	11,0	20,3	11,8	20,3	9,8	17,3	9,9
85 MPa	10,1	28,2	-	19,2	-	14,4	24,4	14,0

O Código Modelo CEB (1982), considera um aço, de diâmetro menor que 40 mm, como sendo de alta aderência, se no ensaio tipo viga RILEM/CEB/FIP, a média das tensões de aderência, correspondentes aos deslizamentos de 10 μm , 100 μm e 1000 μm , for:

$$\tau_{bm} \geq 8 - 0,12\phi = 5,6 \text{ MPa, no caso da barra ensaiada neste trabalho,}$$

e a tensão de ruptura no diagrama for:

$$\tau_{br} \geq 13 - 0,19\phi = 9,2 \text{ MPa, no caso da barra ensaiada neste trabalho.}$$

O aço ensaiado neste trabalho pode ser considerado de alta aderência, pois a menor tensão média de aderência τ_{bm} foi de 7,0 MPa e a menor tensão de ruptura τ_{br} foi de 11,2 MPa, ambas para o concreto de 25 MPa.

O gráfico da figura 8.9 foi construído para visualização dos valores apresentados na tabela 8.3.

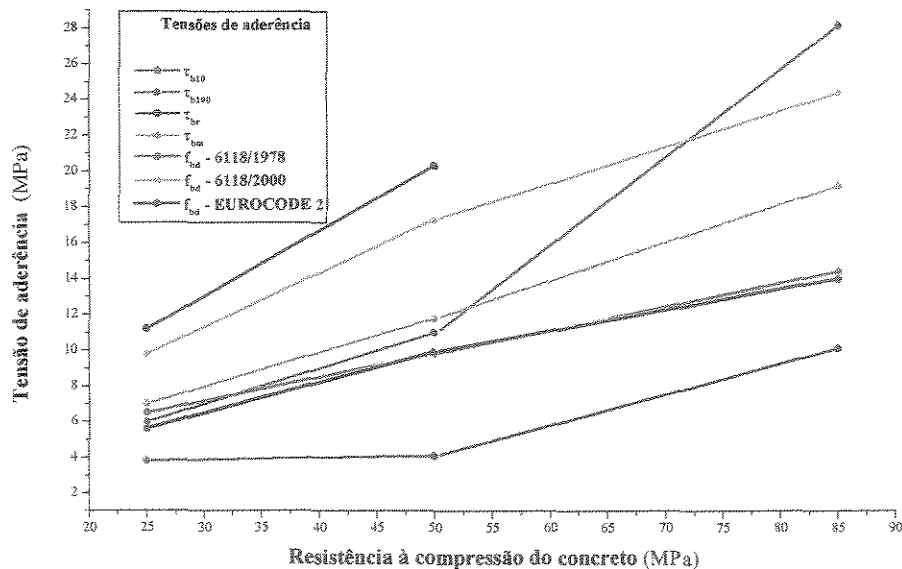


Figura 8.9 Curvas de tensões experimentais de aderência e tensões teóricas de aderência em função da resistência à compressão do concreto.

Pelo gráfico da figura 8.9 pode-se observar, avaliando-se as curvas teóricas relativas à NBR 6118/1978 e ao EUROCODE 2, que ambos os procedimentos normativos são conservadores em relação à tensão de aderência média τ_{bm} e, principalmente, em relação à tensão de ruptura τ_{br} , obtidas experimentalmente neste trabalho. Em contrapartida, observa-se que o Projeto de Revisão da NBR 6118/2000 se mostra pouco conservador e contra a segurança em relação aos valores determinados para τ_{bm} , estando a curva que representa esta revisão de norma, bastante próxima e com valores pouco abaixo da curva experimental que representa as tensões de ruptura τ_{br} .

A fixação da tensão de ruptura τ_{br} em relação a um deslizamento de 1000 μm , para os ensaios realizados nesta pesquisa, mostrou-se adequado; uma vez que, pela figura 8.9, pode-se notar que os valores da tensão de aderência calculados para este valor, estão sempre acima dos valores obtidos de acordo com os vários códigos normativos avaliados.

Analisando-se as curvas que representam a NBR 6118/1978 e o EUROCODE 2, e comparando-se com a curva obtida para a tensão de aderência τ_{b100} , pode-se afirmar que a contribuição da resistência à compressão do concreto no incremento da tensão de aderência, para concretos de alta resistência, não é convenientemente considerada, se adotarmos os parâmetros atuais normatizados.

8.6 Considerações finais

Como observações finais deste trabalho, pode-se enfatizar que o estabelecimento pela RILEM RC 5 (1978), de um deslizamento máximo de 3,00 mm para este ensaio, deve ser entendido apenas como uma referência para se determinar o fim do experimento; não significando que a perda de aderência aconteça somente quando se atinge este valor.

No ensaio de arrancamento ASTM C-234, realizado por DUCATTI (1993), e relatado no capítulo 4, o ensaio é dado por encerrado, quando o concreto que envolve a barra rompe de forma brusca, ou quando o aço entra em escoamento, ou ainda, quando ocorre um deslizamento de pelo menos 2,5 mm, medidos na extremidade da barra carregada. Estes ensaios prosseguiram até a ruptura dos corpos de prova, o que aconteceu após o escoamento do aço. Este pesquisador considerou os valores últimos registrados pela prensa, como τ_{bmax} . Praticamente é impossível no ensaio tipo viga padrão RILEM, um rompimento brusco, devido a presença da armadura de confinamento.

Nos ensaios realizados neste trabalho, devido à armadura de confinamento, não existe ruptura visível, nem tão pouco ocorre o arrancamento da barra; portanto parece justo, como mencionado anteriormente, considerar como referência para o valor de ruptura τ_{br} , um deslizamento de 1000 μm . Esse valor está situado no trecho das curvas carga-deslizamento, caracterizado por mudanças bruscas nas deflexões, apresentando o que significa grandes incrementos de deslizamento, para pequenos aumentos de tensão. Isso pode ser visto nas figuras

8.1, 8.2 e 8.3. Acredita-se, considerando os ensaios realizados, que neste trecho ocorre a ruptura da ligação aço-concreto. Da mesma forma, LARRARD et al (1993), nos ensaios por eles realizados, utilizando o método RILEM RC (1978), não detectaram nenhum comportamento frágil do concreto, atribuindo este fato à presença da armadura transversal utilizada.

Como já analisado, neste próprio capítulo, para todos os comprimentos de aderência utilizados, a tensão de aderência aumenta com o incremento da resistência do concreto. Neste trabalho, para a tensão de aderência τ_{b10} , constatamos um ganho de 8% do concreto de 50 MPa em relação ao de 25 MPa e de 146 % do concreto de 85 MPa em relação ao de 50 MPa. Para a tensão de aderência τ_{b100} , constatamos um acréscimo de 83 % do concreto de 50 MPa em relação ao de 25 MPa e de 156 % do concreto de 85 MPa em relação ao de 50 MPa. Para efeito de comparação, LARRARD et al (1997), pesquisando com barras nervuradas, constataram para a tensão de aderência τ_{b10} , um ganho de 39 % a 80 % com o uso do CAD em relação ao concreto comum. Para a tensão de aderência τ_{b100} , o ganho foi de 28% a 80 %, dependendo da situação pesquisada.

As controvérsias que existem a respeito do papel da sílica ativa, na aderência entre o concreto e o aço, conduziu-nos, ao uso de sílica ativa em todos os concretos estudados, mesmo para aqueles onde não havia necessidade, sob ponto de vista da resistência mecânica pretendida. Esta decisão foi tomada como maneira de eliminar esta variável da pesquisa. DUCATTI (1993), observou uma tendência de otimização do teor de sílica ativa em torno de 10 %, para o qual notou-se os maiores valores para as tensões máximas de aderência. BURGE (1982), GJORV; MONTEIRO E MEHTA (1990); notaram a melhoria da aderência numa razão similar à diminuição da porosidade e na medida em que se aumenta o teor de sílica ativa em substituição ao cimento. No capítulo 7, foi mencionado que LARRARD e LE ROY (1993), demonstraram que a sílica ativa conduz a um aumento na retração autógena do concreto, o que contribui para o melhoramento da aderência. HWANG et al (1994), concluíram que a presença de sílica ativa provoca menor adesão entre o concreto e o aço, diminuindo a resistência por atrito e aumentando o efeito do fendilhamento. Pode se imaginar por estes estudos, que o uso de sílica ativa diminui a porosidade e a espessura da zona de transição, contribuindo para a aderência química e mecânica,

mas em contrapartida, prejudica a aderência por atrito.

No concreto com resistência média à compressão de 85 MPa, devido a necessidade de se reduzir a relação água/cimento, foi necessário a utilização do superplastificante especificado nos capítulos 6 e 7. Este fato, provavelmente não cria nenhuma variável neste estudo, pois, a pesquisa de CARRASQUILLO (1988), relatada no capítulo 4, sobre a influência dos tipos de plastificantes, não detectou diferença na resistência ao arrancamento, dos concretos com ou sem aditivos.

Para efeito de análise e conclusões e até continuidade deste trabalho, deve-se lembrar que LARRARD et al (1993), trabalham somente com deslizamentos de até 100 μm , quando afirmam em seu artigo que para elevados valores de deslizamento entre a barra e o concreto, ocorre flexão substancial no meio da barra, que é então comprimida contra a parte de cima da luva plástica, podendo causar atrito nesta região.

Para efeito de continuidade deste trabalho, deve-se enfatizar que comprimentos de aderência de 10ϕ , ou mesmo de 5ϕ , no caso de concretos de alta resistência, não devem ser utilizados para a determinação da tensão de aderência em ensaios tipo viga de acordo com o padrão RILEM/CEB/FIP – RC 5. Portanto, pode-se dizer que há concordância com a pesquisa de LARRARD et al (1993), relatada no capítulo 5, onde é afirmado que tais comprimentos de aderência, no caso de concreto de 95 MPa, são grandes para se atingir a carga de deslizamento, antes do escoamento do aço.

9 PROSSEGUIMENTO DOS ESTUDOS

Como contribuição ao estudo da aderência entre o aço e o concreto foi proposto o presente trabalho, que tem, conforme o capítulo 1, o objetivo principal de fornecer subsídios para a padronização do ensaio da RILEM/CEB/FIP RC-5 (1978), para concretos com resistência à compressão superior ao limite máximo especificado nesse ensaio.

No prosseguimento destes estudos, recomenda-se que outros diâmetros da armadura longitudinal, além destes de 20 mm, sejam avaliados. LARRARD et al (1993), afirmam que para um dado concreto, há um aumento na tensão de aderência conforme o diâmetro da barra é reduzido.

No presente trabalho, foi ensaiado apenas um exemplar de cada tipo de concreto, para cada comprimento de aderência estudado. Recomenda-se que, no prosseguimento dos estudos, sejam testados um número representativo de exemplares, para que se possa fazer uma análise estatística dos resultados, pois como foi visto na bibliografia consultada, a dispersão de resultados, é grande, neste tipo de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “Standart Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforced Steel”. ASTM – C – 234 91a, Philadelphia, 1991.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregados para Concreto: Especificação”. NBR 7211, Rio de Janeiro, 1982.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras para Concreto Armado: Especificação”. NBR 7480, Rio de Janeiro, 1996.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras de Concreto Armado: Método de Ensaio”. NBR 7477, São Paulo, 1982.
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão – Deformação: Método de Ensaio”. NBR 8522, Rio de Janeiro, 1984.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Materiais Metálicos – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração”. NBR 6152, Rio de Janeiro, 1992.

- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos”. **NBR 5739**, Rio de Janeiro, 1994.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos”. **NBR 7222**, Rio de Janeiro, 1994.
- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado”. **NBR 6118**, Rio de Janeiro, 1978.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Projeto de Revisão-Projeto de Estruturas de Concreto”. **NBR 6118**, Rio de Janeiro, 2000.
- 11 BARBOSA, M. P.; HAMOUTINE, A.; LORRAIN, M. “Aderência dos Concretos de Elevado Desempenho: Influência da Posição das Armaduras em Relação ao Sentido de Concretagem”. **Revista Ibracon**, Abril/Julho, 1998.
- 12 BONY, J. C.; CLAUDE, G.; SORETZ, S. “Comparaison des Essais d’Adhérence par Flexion (Beam Test) e par Traction (Pull-Out-Test)”. **Matériaux et Constructions**, v. 6, n. 35, p. 395-401, sep./oct., Paris, 1973.
- 13 BÜRGE, T. A. “Densified Cement Matrix Improves Bond with Reinforced Steel”. In: Bartos, P. (ED). **Bond in Concrete**, Applied Science Publishers, p. 273-81, London, 1982.
- 14 BÜRGE, T. A. “Densified Matrix Improves Bond with Reinforced Steel,” **Proceedings, Symposium of the Material Research Society**, Boston, 1987.
- 15 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. “Bond Action and Bond Behaviour of Reinforcement”. State of the Art Report. **Bulletin d’Information n° 151**, Paris, Avr., 1982.

- 16 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. "CEB-FIP Model Code 1990". **Bulletin d'Information n° 195.**, Lausanne, Mar.,1990.
- 17 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. "CEB-FIP Model Code 1990". **Bulletin d'Information n° 203-205.**,1991.
- 18 DAL MOLIN, D. C. C.; VIEIRA F. "Aderência das Barras de Aço em Concretos de Alta Resistência com a Adição de Microsilica". **Ibracon**. 37° Reinbrac, Goiania, 1995.
- 19 DE LARRARD, F.; SCHALLER, I.; FUCHS, J.. "Effect of Bar Diameter on the Bond Strength of Passive Reinforcement in High-Performance Concrete. **ACI Materials Journal**, 1993.
- 20 DO VALLE, A.; FUSCO, P. B. "Estudo da Aderência entre Concreto e Armadura sob Carregamento Cíclico". **XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural**. Tucumán-Argentina, Sep.,1995.
- 21 DUCATTI, V. A. "Concreto de Elevado Desempenho: Estudo da Aderência com a Armadura". **Tese de Doutorado**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- 22 DUCATTI, V. A.; AGOPYAN, V. "Concreto de Elevado Desempenho: Estudo da Aderência com a Armadura".**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/113. São Paulo, 1993.
- 23 FUSCO, P. B. "Técnica de Armar as Estruturas de Concreto". **Editora Pini**, São Paulo, 1995.
- 24 GJORV, O. E.; MONTEIRO, P. J. M.; MEHTA, P. K. "Effect of Condensed Silica Fume on Steel-Concrete Bond". **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 6, p. 573-80, Nov./Dec., 1990.

- 25 HAMAD, B. S.; ITANI, M. S. "Bond Strength of Reinforcement in High-Performance Concrete: The Role of Silica Fume, Casting Position, and Superplasticizer Dosage". **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 5, Sept./Oct.,1998.
- 26 HWANG, S. J.; LEE, Y. Y., LEE, C. S. "Effect of Silica Fume on the Splice Strenght of Deformed Bars of High-Performance Concrete". **ACI Structural Journal**, p. 294-302, May/June,1994.
- 27 ISA, M. M. "Aderência Concreto Armadura: Influência da Corrosão e da Proteção Catódica". **Tese de Doutorado**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- 28 LEONHARDT, F.; MÖNNING, E. "Construções de concreto". Interciência, v. 1 e 3, Rio de Janeiro, 1977.
- 29 LORRAIN, M.; KHÉLAFI, H. "Sur la Résistance de la Liaison Armature-Béton de Haute Résistance". **Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics**. Série: Béton 260, n. 470, p. 117-28, Déc., 1988.
- 30 MASLEHUDDIN, M.; ALLAM, J. M.; AL-SULAIMANI, G. J.; AL-MANA, A. I.; ABDULJAUWAD, S. N. "Effect of Rusting of Reinforced Stell on its Mechanical Properties and Bond with Concrete" **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 5, p. 496-502, Sep/Oct., 1990.
- 31 RILEM/CEB/FIP. "Bond Test for Reinforced Stell 1. Beam Test". **Recommendation RC 5**. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1978.
- 32 RILEM/CEB/FIP. "Bond Test for Reinforced Stell 2. Pull-Out-Test". **Recommendation RC 6**. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1978.

- 33 SORETZ, S. "A Comparison of Beam Test and Pull-Out-Test". **Matériaux et Constructions.**, v. 5, n. 28, p. 261-264, Jul./Aug.,1972.
- 34 SOROUSHLAN, P.; CHOI, K. B.; PARK, G.H.; ASLANI, F. "Bond of Deformed Bars to Concrete: Effects of Confinement and Strength of Concrete. **ACI Materials Journal.** v. 88, n. 3, p. 227-32, May/June 1991.
- 35 TASSIOS, T. P. "Properties of Bond Between Concrete and Steel under Load Cycles Idealizing Sismic Actions". **Bulletin d'Information du Comité Euro – International du Béton,** n° 131, p. 67-122, 1979.
- 36 USUDA, F. E.; PEIXOTO, A. S. P.; BATELOCHI, R. "Estudo da Aderência do Aço em Concreto de Alta Resistência". **Ensaio Apresentado Durante a Realização do Curso de Pós Graduação Análise Experimental de Estruturas IC 601– UNICAMP,** Campinas-SP, 1998.
- 37 WECHARATANA, M.; CHIMAMPHANT, S. "Bond Strength of Deformed Bars and Steel Fibers in High-Strength Concrete," **Proceedings, Symposium of the Material Research Society,** Boston, 1987.