



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Beatriz Nogueira Tavares de Macedo

**Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras de aço
para uso em concreto armado**

Rio de Janeiro

2018

Beatriz Nogueira Tavares de Macedo

Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras de aço para o uso em concreto armado



Dissertação de mestrado apresentado como requisito final para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

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

Rio de Janeiro

2018

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

M141 Macedo, Beatriz Nogueira Tavares de.
Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras de aço para o uso em concreto armado / Beatriz Nogueira Tavares de Macedo. – 2018.
128f.

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

1. Engenharia civil - Teses. 2. Barras de aço - Teses. 3. Concreto armado - Teses. 4. Materiais de construção - Testes - Teses. I. Tavares, Maria Elizabeth da Nóbrega. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.016:620.1

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

Assinatura

Data

Beatriz Nogueira Tavares de Macedo

**Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras para o uso em
concreto armado**

Dissertação de mestrado apresentado
como requisito final para obtenção do
título de Mestre, ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, da
Universidade do Estado do Rio de
Janeiro.

Aprovada em 09 de maio de 2018.

Banca Examinadora:

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

Prof.^a Dra. Claudia Maria de Oliveira Campos
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof.^a Dra. Regina Helena Ferreira de Souza
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, porto seguro para o meu viver.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar esperança, coragem e toda força necessária para conquistar meu objetivo.

Ao meu pai, Waldir, por acreditar que eu sou capaz de alcançar meus objetivos, me ensinar a lutar e me incentivar a ir sempre mais longe.

À minha mãe, Márcia Cristina, pela compreensão e perseverança quando não conseguia ver esperança.

À minha irmã e afilhada, Maria Eduarda, por compreender minha ausência em boa parte de sua infância por estar estudando.

Ao meu companheiro, André Felipe, por viver comigo todos os momentos dessa caminhada, os bons e os ruins, sem desistir.

À professora Maria Elizabeth, pela orientação e incentivo à pesquisa no projeto de Iniciação Científica, no GECAD, no projeto de graduação e no mestrado.

Ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Ao Instituto Aço Brasil pelo suporte financeiro que possibilitou esta pesquisa.

Às empresas Gerdau, ArcelorMittal e Faulim pelo fornecimento das barras de aço.

Somos muito pequenos e insignificantes perante o universo,
mas profundamente capazes de feitos grandiosos.

Stephen Hawking

RESUMO

MACEDO, B. N. T. *Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras para o uso em concreto armado*. 2018. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

A presente dissertação de mestrado refere-se ao estudo das condições de aderência aço – concreto com barras de aço finas e grossas, no âmbito da pesquisa e de avaliação da resistência de aderência e da determinação do coeficiente de conformação superficial experimental, utilizando concreto classe C40 e aços da categoria CA-50 nervurados (diâmetros 6.3, 10.0, 20.0, 25.0 e 32.0 mm), CA-60 nervurados (diâmetros 3.4, 4.2, 6.0 e 9.5 mm) e CA-60 lisos (diâmetros 3.4 e 4.2 mm). Visto que o ensaio de Barras Confinadas, recomendado pela NBR 7477 - Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado., não é eficiente para barras menores que 10 mm, foram executados os ensaios de arrancamento “Pull-out test”, recomendado pela RILEM, para determinação das tensões de aderência aço-concreto e determinação do coeficiente de conformação superficial experimental baseado na norma francesa BAEL-91. A Universidade do Estado do Rio de Janeiro participa do Comitê 28 da ABNT e atua em conjunto com o Instituto Aço Brasil e as empresas fornecedoras de barras de aço e os laboratórios de ensaios para a revisão da norma NBR 7477. “Para validar o método de ensaio, foram apresentadas análises de resultados de ensaios experimentais entre laboratórios universitários e comerciais e comparados às prescrições normativas e teóricas utilizadas pela comunidade técnica. Foram avaliadas tensões de aderência, a influência do diâmetro, modos de ruptura do ensaio, o coeficiente de conformação superficial experimental e a análise da relação entre os resultados dos ensaios de aderência e a geometria das nervuras transversais, eventualmente traduzida na sua área relativa de nervura.

Palavras-chave: Aderência aço-concreto; Ensaio arrancamento “Pull-Out”; Coeficiente de conformação superficial; Área relativa de nervura.

ABSTRACT

MACEDO, B. N. T. *Determination of the coefficient of superficial conformation of bars for use in reinforced concrete*. 2018.128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

The present dissertation refers to the study of steel-concrete bond conditions with thin and thick steel bars, within the search and evaluation of the bond strength and the determination of the superficial conformation coefficient, using concrete class c40 and bars of the category CA-50 ribbed (diameters 6.3, 10.0, 20.0, 25.0 and 32.0 mm), CA-60 ribbed (diameters 3.4, 4.2, 6.0 and 9.5 mm) and CA-60 plain (diameters 3.4 and 4.2 mm). Since the confined bar test, recommended by the NBR 7477 “Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado”, is not efficient for bars less than 10 mm, Pull-out tests were performed, recommended by RILEM, for determination of steel-concrete bond stresses and determination of the experimental surface conformation coefficient based on the French standard BAEL -91. To validate the test method, analyzes of the results of experimental tests between university and commercial laboratories were presented and compared to the normative and theoretical prescriptions used by the technical community. The bond stress, influence of the diameter, test rupture modes, the experimental surface conformation coefficient and the analysis of the relationship between the results of the pull-out tests and the geometry of the transverse ribs, possibly translated in their rib relative area, were evaluated.

Keywords: Bond stress; Pull-out test; Coefficient of superficial conformation; Rib relative area.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de aço e diâmetros das barras de aço estudadas	19
Figura 2- Aderência por adesão - FUSCO (1995).....	24
Figura 3 - Aderência por atrito devido tensões de compressão - FUSCO (1995).....	25
Figura 4 - Aderência mecânica - FUSCO (1995)	26
Figura 5 - Acabamento superficial de fios e barras lisas - REHM (1961)	26
Figura 6 - Representação do comportamento da aderência – Ducatti (1993)	27
Figura 7 - Curva de aderência de acordo com Tassios (1979) - FERNANDES (2000).....	28
Figura 8 - Primeiras fissuras diagonais - FERNANDES 2000.....	29
Figura 9 - Fissuras diagonais e de fendilhamento segundo Tassios (1979) - FERNANDES (2000)	29
Figura 10 - Ruptura da aderência para concreto confinado com barras nervuradas de acordo com Tassios (1979) - FERNANDES (2000)	29
Figura 11 - Hipótese do mecanismo de resistência de aderência residual τ_r - TASSIOS (1979) - FERNANDES (2000).....	30
Figura 12 - Tipos de solicitações de acordo com FUSCO (1995).....	31
Figura 13 - Região micro fissurada devido às tensões de tração - FUSCO (1995).....	31
Figura 14 - Fendilhamento do concreto - FUSCO (1995).....	31
Figura 15 - Ruptura por aderência em concreto confinado - FERNANDES (2000).....	32
Figura 16 - Ruptura por aderência em concreto não confinado - FERNANDES (2000).....	32
Figura 17 - Disposição das nervuras transversais e longitudinais de uma barra de aço, segundo LNEC.....	37
Figura 18 - Modos de ruptura por aderência: (a) ruptura por "pull-out"; (b) ruptura por "pull-out" induzida por "splitting" com esmagamento do concreto abaixo das nervuras; (c) ruptura por "splitting" - FIB BULLETIN 10 (2000)	37
Figura 19 - Modelo do corpo de prova do ensaio de barras confinadas - FRANÇA 2010	39
Figura 20 - Modelo de corpo de prova segundo a ABNT NBR 7477 1982	39
Figura 21 - Esquema do ensaio de arrancamento - RILEM CEB RC6 (1983)	41
Figura 22 - Gráfico tensão por deslizamento com o máximo ocorrendo após 1,0 mm - FRANÇA (2010)	41
Figura 23 - Gráfico tensão por deslizamento com o máximo ocorrendo antes de 1,0mm - FRANÇA (2010)	41

Figura 24 - Posicionamento de barras de aço na concretagem - LEONHARDT & MONNING (1977)	45
Figura 25 - Barra ideal com nervuras anulares e possíveis áreas de ruptura dos consolos de concreto entre as nervuras - LEONHARDT & MONNING (1977)	46
Figura 26 - Trajetórias das tensões principais e da ruptura nos consolos de concreto - LEONHARDT & MONNING (1977).....	46
Figura 27 - Formação de fissuras secundárias entre fissuras principais em uma barra de concreto armado tracionada - LEONHARDT & MONNING (1977).....	47
Figura 28 - Corpo de provas de concreto proposto para o ensaio de arrancamento de barras finas com diâmetro inferior a 10 mm, chamado de Método RILEM Modificado.....	63
Figura 29 - Teste de abatimento "slump test"	67
Figura 30 - Disposição das nervuras para barras CA-60 e barras CA 50.....	72
Figura 31- Aparelho de medição digital	73
Figura 32 - Corpo de prova posicionado na gaiola para o ensaio de aderência	73
Figura 33 - Fendilhamento do concreto.....	76
Figura 34 - Gráfico de resistência de aderência NBR 6118 e barras lisas CA-60.....	83
Figura 35 - Gráfico de resistência de aderência NBR 6118 e barras nervuradas CA-60	84
Figura 36 Gráfico de resistência de aderência NBR 6118 e barras nervuradas CA-50.....	85
Figura 37 - Gráfico de resistência de aderência BAEL91 e barras lisas CA-60	85
Figura 38 - Gráfico de resistência de aderência BAEL91 e barras nervuradas CA-60.....	86
Figura 39 - Gráfico de resistência de aderência BAEL91 e barras nervuradas CA-50.....	87
Figura 40 - Gráfico tensões médias e máximas CEB e barras lisas CA-60.....	88
Figura 41 - Gráfico tensões médias CEB e barras nervuradas CA-60	89
Figura 42 - Gráfico tensões máximas CEB e barras nervuradas CA-60	89
Figura 43 - Gráfico tensões médias CEB e barras nervuradas CA-50	90
Figura 44 - Gráfico tensões máximas CEB e barras nervuradas CA-50	90
Figura 45 - Gráfico tensões médias UNE 36740 e barras lisas CA-60	91
Figura 46 - Gráfico tensões máximas UNE 36740 e barras lisas CA-60	91
Figura 47 - Gráfico tensões médias UNE 36740 e barras nervuradas CA-60.....	92
Figura 48 - Gráfico tensões máximas UNE 36740 e barras nervuradas CA-60.....	92
Figura 49 - Gráfico tensões médias UNE 36740 e barras nervuradas CA-50.....	93
Figura 50 - Gráfico tensões máximas UNE 36740 e barras nervuradas CA-50.....	93
Figura 51 - Gráfico de influência do diâmetro barras de aço CA-60 lisas	97
Figura 52 - Gráfico de influência do diâmetro barras de aço CA-60 nervuradas.....	98

Figura 53 - Gráfico de influência do diâmetro barras de aço CA-50 nervuradas.....	99
Figura 54 – Gráfico do coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-60 lisos.....	100
Figura 55 - Gráfico do coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-60 lisos.....	101
Figura56- Gráfico do coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-50 lisos.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias e diâmetros de aço estudados e os laboratórios que participam da pesquisa	19
Tabela 2 - Valores mínimos de f_R - CEB (1999).....	38
Tabela 3 - Relação entre η_b e η_1 de acordo com a ABNT NBR 7480 (1996) - ABNT NBR 6118 (2014)	56
Tabela 4 - Coeficiente de conformação superficial - ABNT NBR 7480 (2007).....	56
Tabela 5 - Valores dos coeficientes de conformação superficial das barras lisas, calculados de acordo com a formulação da norma francesa BAEL 91.....	59
Tabela 6 - Valores dos coeficientes de conformação superficial das barras nervuradas, CA-50, calculados de acordo com a formulação da norma francesa BAEL 91	60
Tabela 7 - Valores dos coeficientes de conformação superficial das barras nervuradas, CA-60, calculados de acordo com a formulação da norma francesa BAEL 91	60
Tabela 8 - Características físicas da areia.....	65
Tabela 9 - Características físicas da brita 0	66
Tabela 10 – Traço para o concreto	67
Tabela 11 - Resultados obtidos dos ensaios de caracterização do concreto, aos 28 dias	68
Tabela 12 - Barras de aço empregadas no programa experimental.....	68
Tabela 13 - Caracterização das barras de aço estudadas	70
Tabela 14 - Características das barras de aço para o cálculo da área relativa de nervuras.....	71
Tabela 15 - Valores obtidos para área relativa da nervura (f_r)	72
Tabela 16 - Tipo de ruptura dos corpos de prova empregados no ensaio de arrancamento	76
Tabela 17 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 3,4 mm – concreto C40	77
Tabela 18 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 4,2 mm – concreto C40	77
Tabela 19 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 3,4 mm – concreto C40	78
Tabela 20 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 4,2 mm – concreto C40	78
Tabela 21 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 6,0 mm – concreto C40	78
Tabela 22 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 9,5 mm – concreto C40	79
Tabela 23 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 6,3 mm – concreto C40	79
Tabela 24 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 10,0 mm – concreto C40	79
Tabela 25 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 20,0 mm – concreto C40	80
Tabela 26 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 25,0 mm – concreto C40	80

Tabela 27 – Ensaio de arrancamento – barra Φ 32,0 mm – concreto C40	80
Tabela 28 - Tensão de aderência máxima obtida nos ensaios	81
Tabela 29 - Tensão de aderência média obtida nos ensaios	81
Tabela 30 - Tensão de aderência média e tensão de aderência máxima obtida nos resultados - CONCREMAT	82
Tabela 31 - Tensão de aderência média e tensão de aderência máxima obtida nos ensaios - FALCÃO BAUER.....	82
Tabela 32 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a NBR 6118 (2014), para aços CA-60 lisos.....	83
Tabela 33 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a NBR 6118 (2014), para aços CA-60 nervurados	84
Tabela 34 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a NBR 6118 (2014), para aços CA-50 nervurados	84
Tabela 35 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a BAEL-91, para aços CA-60 lisos	85
Tabela 36 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a BAEL-91, para aços CA-60 nervurados	86
Tabela 37 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a BAEL-91, para aços CA-50 nervurados	86
Tabela 38 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo o CEB, para aços CA-60 lisos.....	88
Tabela 39 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo o CEB, para aços CA-60 nervurados	89
Tabela 40 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo o CEB, para aços CA-50 nervurados	90
Tabela 41 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo a UNE 36740, para aços CA-60 lisos.....	91
Tabela 42 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo a UNE 36740, para aços CA-60 nervurados.....	92
Tabela 43 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo a UNE 36740, para aços CA-50 nervurados.....	93
Tabela 44 - Barras de aço lisas CA-60	94
Tabela 45 - Barras de aço nervuradas CA-60.....	94
Tabela 46 - Barras de aço nervuradas CA-50.....	94
Tabela 47 – Coeficiente de variação de amostras para os laboratórios	96

Tabela 48 – Influência do diâmetro barras de aço CA-60 lisas.....	97
Tabela 49 - Influência do diâmetro barras de aço CA-60 nervuradas	98
Tabela 50 - Influência do diâmetro barras de aço CA-50 nervuradas	99
Tabela 51 – Coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-60 lisos ...	100
Tabela 52 - Coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-60 nervurados	101
Tabela 53 - Coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-50 nervurados	102
Tabela 54 – Ganho de desempenho de tensão última para barras lisas e nervuradas CA-60.	103
Tabela 55 - Ganho de desempenho do coeficiente de conformação superficial para barras lisas e nervuradas CA-60	103

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
OBJETIVO	21
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
1. MECANISMOS DE ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO	23
1.1. ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO	23
1.1.1. <i>Tipos de aderência</i>	24
1.1.2. <i>Comportamento da aderência aço-concreto</i>	27
1.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA	33
1.2.1. <i>Resistência do concreto</i>	33
1.2.2. <i>Diâmetro da barra</i>	33
1.2.3. <i>Posição das barras na concretagem</i>	34
1.2.4. <i>Idade da carga</i>	35
1.2.5. <i>Adensamento</i>	35
1.2.6. <i>Geometria e nível de tensões da armadura</i>	36
1.3. ENSAIOS DE ADERÊNCIA.....	39
1.3.1. <i>Ensaio de barras confinadas</i>	39
1.3.2. <i>Ensaio de arrancamento direto (“Pull-out Test”)</i>	40
1.4. ESTUDOS SOBRE ADERÊNCIA	43
1.5. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DA TENSÃO DE ADERÊNCIA.....	55
1.5.1. <i>Norma brasileira ABNT NBR 6118 2014</i>	55
1.5.2. <i>Norma francesa BAEL-91</i>	56
1.6. INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DAS BARRAS E FIOS DE AÇO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA.....	57
1.6.1. <i>CEB</i>	57
1.6.2. <i>Norma espanhola UNE 36740 (1998)</i>	58
1.7. ALTERNATIVA PARA A DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE ADERÊNCIA.....	58
1.7.1. <i>Escolha do método de ensaio da tensão de aderência, da amostragem e das dimensões dos corpos de prova</i>	62
1.7.2. <i>Descrição sucinta do Método RILEM Modificado</i>	63
1.7.3. <i>Verificação dos resultados e controle da conformação superficial</i>	64
2. PROGRAMA EXPERIMENTAL	65
2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	65
2.1.1. <i>Agregado miúdo</i>	65
2.1.2. <i>Agregado graúdo</i>	66
2.1.3. <i>Cimento</i>	66
2.1.4. <i>Água</i>	66
2.2. DOSAGEM DO CONCRETO	67

2.3.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CONCRETO	67
2.4.	ARMADURAS	68
2.4.1.	<i>Caracterização das barras de aço</i>	69
2.4.2.	<i>Área relativa de nervuras</i>	71
2.5.	ENSAIO “PULL-OUT-TEST”	73
3.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO.....	74
3.1.	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA AMOSTRA.....	74
3.2.	CÁLCULO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA.....	74
3.1.	CÁLCULO DA TENSÃO MÉDIA DE ADERÊNCIA	75
3.2.	MODO DE RUPTURA	75
3.3.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	77
a)	<i>Para aços CA-60 lisos</i>	77
b)	<i>Para aços CA-60 nervurados</i>	78
c)	<i>Para aços CA-50 nervurados</i>	79
3.4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS LABORATÓRIOS COMERCIAIS CONCREMAT E FALCÃO BAUER	82
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	83
4.1.	TENSÕES DE ADERÊNCIA	83
4.1.1.	<i>Resultados experimentais x Normalização brasileira</i>	83
4.1.2.	<i>Resultados experimentais x BAEL 91</i>	85
4.2.	INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO NAS TENSÕES DE ADERÊNCIA.....	88
4.2.1.	<i>Resultados experimentais x CEB</i>	88
4.2.2.	<i>Resultados experimentais x UNE 36740</i>	91
4.3.	DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE ADERÊNCIA	94
4.3.1.	<i>Barras lisas CA-60</i>	94
4.3.2.	<i>Barras nervuradas CA-60</i>	94
4.3.3.	<i>Barras nervuradas CA-50</i>	94
4.4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE DIFERENTES LABORATÓRIOS.....	96
4.4.1.	<i>Avaliação do coeficiente de variação de amostras</i>	96
4.4.2.	<i>Avaliação das tensões de aderência</i>	97
4.4.3.	<i>Coefficiente de conformação superficial</i>	100
4.5.	GANHO DE DESEMPENHO ENTRE BARRAS NERVURADAS E LISAS	103
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	104
	REFERÊNCIAS	108
	ANEXO A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO	117

INTRODUÇÃO

Considerações iniciais

A transferência dos esforços solicitantes entre o aço e o concreto, assim como a compatibilidade de deformações, são essenciais para a determinação da capacidade de carga dos elementos de concreto armado. A resistência de aderência é utilizada para os cálculos de comprimento de aderência e ancoragem de armaduras passivas e para os procedimentos de detalhamento de peças.

A resistência de aderência é obtida, no Brasil, por uma expressão dada pela ABNT NBR 6118/2014. A equação depende diretamente de três coeficientes adimensionais (η_1, η_2, η_3) que são definidos em funções de variáveis estabelecidas na mesma norma. O parâmetro η_1 , extraído da norma europeia EUROCODE 2 de 1992, foi introduzido na revisão publicada da ABNT NBR 6118 em 2003 e considerado constante para cada categoria de aço. Tal coeficiente, até então desconhecido pela comunidade técnica nacional, foi relacionado com o coeficiente de conformação superficial de barras mínimo, η_b , que também englobava valores para as diferentes categorias do aço e diâmetros maiores e iguais a 10,0 mm, dado pela ABNT NBR 7480 1996.

A ABNT NBR 7480, teve sua última revisão publicada em 2007. Reconhecendo a existência de lacunas técnicas quanto ao conhecimento do coeficiente de conformação superficial η das barras e fios finos, com diâmetros inferiores a 10,0 mm, consideram-se diferentes coeficientes η em função das classes e bitolas dos aços. Para diâmetros superiores e iguais a 10,0 mm, os valores do coeficiente de conformação superficial modificam-se com as diversas categorias, porém, para as bitolas inferiores a 10,0 mm foi considerado um valor único igual a um.

A ABNT NBR 6118 2014, norma de projeto de estruturas de concreto, vigente, preconiza que os índices η_1 , assim como os seus correspondentes η_b , sejam definidos conforme preconizados na ABNT NBR 7480, o que implica na consideração das mesmas capacidades e propriedades de aderência para todas as barras,

independentemente da sua bitola, seja ela inferior ou superior a 10,0 mm. A utilização das barras e fios com diâmetros inferiores a 10,0 mm, em estruturas de concreto armado, pode, portanto ser um fator de incerteza para a engenharia nacional, sem a devida fundamentação que garanta comprimentos de ancoragens compatíveis com a sua conformação superficial.

Esta dissertação tem por objetivo avaliar a aderência aço-concreto e obter experimentalmente o coeficiente de conformação superficial para barras de aço de diferentes categorias e diâmetros.

Devido ao desenvolvimento de pesquisas na área da aderência aço-concreto, a Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) é membro ativo do Comitê Técnico 28 (ABNT/CB-028 - Comitê Brasileiro de Siderurgia).

Os Comitês Técnicos são órgãos de coordenação, planejamento e execução das atividades de normalização técnica, que devem garantir que os membros representem toda a variedade de partes interessadas no assunto objeto de estudo. Por este motivo, participam deste comitê entidades:

- Neutras: Laboratórios de pesquisa da UERJ e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)
- Comerciais: Empresas que produzem as barras de aço e necessitam de certificação do produto. Gerdau, ArcelorMittal, Faulim, Sinobras, Jal arames.
- Técnicas: Laboratórios comerciais que realizam os ensaios prescritos nas normas Concremat e L.A. Falcão Bauer

Em parceria com o Instituto Aço Brasil, IABr, para atualização da norma NBR 7477 Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado, iniciou-se em 2012 pela equipe de pesquisadores do CEFET-MG, o estudo das condições de aderência aço-concreto e conformação superficial de barras e fios de aço, de categorias CA-50 e CA-60,

Os resultados apontaram que o ensaio de barras confinadas, proposto pela norma NBR-7477, no que tange a avaliação do coeficiente de rugosidade ou de conformação superficial, não é eficiente para bitolas inferiores a 10mm. Por este motivo, foi proposto utilizar o ensaio de arrancamento “Pull-out test”, preconizado pela RILEM, com alteração apenas no comprimento de ancoragem de 5Φ para 10Φ , somente para as barras abaixo de 10,0mm.

Em 2016 a UERJ entrou para o Comitê Técnico dando continuidade aos ensaios iniciados pela equipe de pesquisadores do CEFET-MG, avaliando as bitolas de aço que ainda não haviam sido ensaiadas.

Em 2018, com o objetivo de validar o ensaio e sua reprodutibilidade, sugeriu-se que a UERJ realizasse uma nova etapa de ensaios utilizando barras de aço das categorias CA 60 lisa, CA 60 nervurada e CA 50 nervurada com barras finas e grossas, a fim de validar o ensaio proposto.

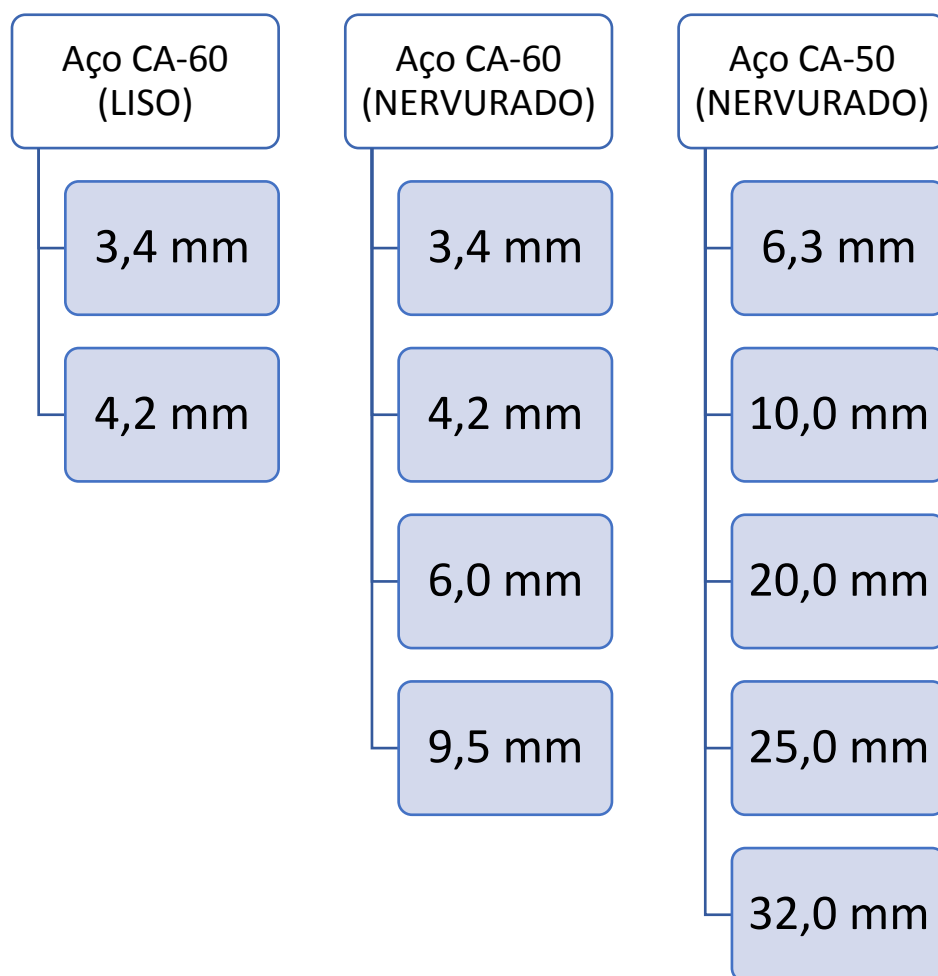
Ainda para testar a reprodutibilidade da metodologia e dos ensaios, foram enviadas amostras para os laboratórios comerciais Concremat e L.A. Falcão Bauer, a fim de testar a execução do ensaio em si e avaliar se os resultados estavam coerentes com os apresentados nos laboratórios de pesquisa das universidades.

Neste trabalho, serão apresentados resultados experimentais realizados pela UERJ e serão feitas comparações inter laboratoriais e com prescrições normativas utilizadas pela comunidade técnica com o objetivo de validar o coeficiente de conformação superficial obtido experimentalmente pela atual pesquisa.

Além disso, se procura obter os valores reais das propriedades de conformação superficial para barras de aço, ainda desconhecidos, por meio de ensaios normatizados.

A figura 1 apresenta as categorias de aço e os diâmetros que serão ensaiados neste trabalho:

Figura 1 - Tipos de aço e diâmetros das barras de aço estudadas



A tabela 1 apresenta as categorias e os diâmetros de aço ensaiados em outros laboratórios. São quatro os laboratórios que contribuem para o comitê 28, sendo eles: UERJ, CEFET-MG, Concremat e L.A. Falcão Bauer.

Tabela 0 - Categorias e diâmetros de aço estudados e os laboratórios que participam da pesquisa

CA 60 LISO				
ϕ barra (mm)	LABORATÓRIOS			
3,4		FALCAO BAUER		UERJ
4,2		FALCAO BAUER		UERJ
5	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT	
6	CEFET			

8	CEFET			
9,5	CEFET			
CA 60 NERVURADO				
ϕ barra (mm)	LABORATÓRIOS			
3,4		FALCAO BAUER	CONCREMAT	UERJ
4,2		FALCAO BAUER	CONCREMAT	UERJ
5	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT	
6	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT	UERJ
8	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT	
9,5	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT	UERJ
CA 50 NERVURADO				
ϕ barra (mm)	LABORATÓRIOS			
6,3	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT	UERJ
8	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT	
10	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT	UERJ
20				UERJ
25				UERJ
32				UERJ

A fim de contemplar a variedade de amostras ensaiadas, serão analisados em conjunto os resultados executados por todos, ou quase todos, os laboratórios. Para a categoria CA-60 lisa, serão analisados os diâmetros de 5,0 e 4,2 mm. Para a categoria CA-60 nervurado, os diâmetros 6,0 e 9,5 mm e para a categoria CA-50 nervurado, os diâmetros 6,3 e 10,0 mm.

Objetivo

O objetivo geral da pesquisa é obter experimentalmente o coeficiente de conformação superficial de barras de por meio de ensaios de arrancamento direto “pull-out”.

Os objetivos específicos a considerar são:

- Realizar ensaios de arrancamento, seguindo recomendações da RILEM-CEB-FIP (1983) “Pull-out test”, para barras de aço CA-60 lisas, CA-60 nervuradas e CA-50 nervuradas.
- Verificar a repetibilidade do ensaio proposto, comparando os resultados com os laboratórios do CEFET, Falcão Bauer e Concremat.
- Avaliar as tensões de aderência com recomendações teóricas e prescrições normativas.
- Avaliar a influência da área relativa de nervura no resultado das tensões de aderência.
- Avaliar o coeficiente de conformação superficial obtido para cada diâmetro e cada tipo de aço estudado com resultados existentes na bibliografia.

Estrutura da dissertação

O presente documento está dividido em sete capítulos, começando pelo capítulo um, no qual se providencia uma introdução sobre o tema a ser desenvolvido, os objetivos que se propõe examinar a presente pesquisa e uma breve descrição da metodologia a ser empregada no decorrer do estudo.

No segundo capítulo realiza-se uma revisão bibliográfica sobre o comportamento da aderência entre barras de aço e o concreto, os tipos de ensaios de aderência, resistência de aderência, a determinação experimental do coeficiente de conformação superficial e apresentação de pesquisas realizadas até o momento sobre aderência.

O terceiro capítulo relata sobre a metodologia experimental a ser aplicada nesta pesquisa. Amplia-se em detalhes sobre a confecção e ensaio dos corpos de prova, ensaios de caracterização, os laboratórios, os equipamentos para realização dos ensaios, o procedimento de ensaio propriamente e resultados preliminares.

No quarto capítulo se expõem e se analisam os resultados obtidos dos experimentos, apresentam-se gráficos, tabelas e demais detalhes.

No quinto capítulo apresentam-se as análises dos resultados e comparações. Examina-se o comportamento do material ensaiado segundo o comportamento teórico esperado e observado experimentalmente.

O sexto capítulo apresenta conclusões da pesquisa e recomendações para pesquisas futuras.

O sétimo capítulo se refere à bibliografia empregada, os artigos científicos baseados em experimentos similares, a literatura sobre os temas desenvolvidos e as teses e dissertações realizadas que contribuíram para a realização deste documento.

1. MECANISMOS DE ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

1.1. Aderência aço-concreto

LEONHARDT & MONNING (1977) e FUSCO (1995) apontam a firme ligação por aderência entre aço e concreto, como principal responsável pelas boas características do material.

FERNANDES (2000) explica que, na união por aderência, ocorre uma igualdade de deformações entre os materiais, aço e concreto, que ocorre somente a nível global. Já a nível local, afirma não serem exatamente iguais, uma vez que a aderência envolve descontinuidades como fissuras e, conseqüentemente, deslocamentos relativos entre a armadura e o concreto.

BARBOSA (2001) conceitua a aderência entre aço e concreto como sendo a ligação que impede o deslizamento entre eles e aponta que os materiais se deformam em conjunto, através da transferência de esforços. Tal fato ocorrerá sempre que houver variação das tensões nas barras, sejam de compressão ou de tração, considerando o desenvolvimento de tensões de aderência ao longo dessas.

NETO (2006) define aderência como sendo um mecanismo fundamental para a existência das estruturas de concreto armado e principal responsável pela ancoragem da armadura no concreto. A transferência de esforços internos é realizada por meio das tensões de aderência, também chamadas de cisalhantes, na interface das barras de aço com o concreto. Afirma, também, que esta propriedade impede o escorregamento das armaduras nos segmentos entre as fissuras, limitando a abertura dessas.

1.1.1. Tipos de aderência

Segundo vários autores encontrados na revisão bibliográfica, entre eles LEONHARDT e MONNIG (1977), ACI COMMITTEE 408 (2003) e FUSCO (1995), a aderência pode ser dividida em três categorias:

- Aderência por adesão;
- Aderência por Atrito;
- Aderência Mecânica.

Contudo, FUSCO (1995), FERNANDES (2000) e OLIVEIRA (2008) explicam que esta separação é puramente didática, já que não é possível obtê-las, separadamente, devido à complexidade dos fenômenos envolvidos.

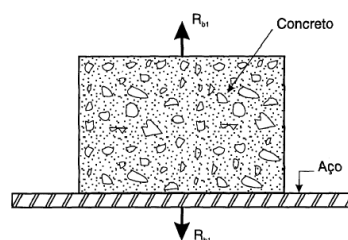
a) Aderência por adesão

De acordo com LEONHARDT & MONNING (1977), a ligação existente entre o aço e a nata de cimento é proveniente da adesão ou de forças capilares dependentes da rugosidade e limpeza da superfície. Porém, o efeito é destruído por pequenos deslocamentos.

BARBOSA (2001) também afirma que essa aderência não é suficiente para uma boa ligação. A nata de cimento penetra nas irregularidades da superfície das barras de aço e, portanto, é dependente do acabamento superficial, ou seja, da laminação, estiramento e condições de corrosão.

FUSCO (1995), BARBOSA (2001), ROSSI (2002), SANTANA (2004) e NETO (2006), descrevem a adesão como a ligação físico-química originada durante as reações de endurecimento do concreto, proporcionando uma “colagem” entre os materiais.

Figura 1- Aderência por adesão - FUSCO (1995)



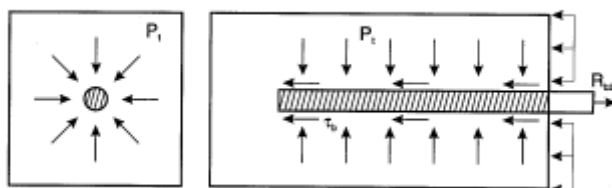
b) Aderência por atrito

Conforme descrito por LEONHARDT & MONNING (1977), a aderência por atrito pode ser verificada depois de rompida a adesão e tem efeito confiável desde que existam pressões transversais às armaduras, que podem ser ocasionadas por tensões de compressão, conforme demonstrado na figura abaixo, ou pela retração e expansão do concreto.

FUSCO (1995) e LEONHARDT & MONNING (1977), afirmam, também, que a aderência por atrito depende da rugosidade da superfície da barra.

A aderência por atrito, de acordo com FUSCO (1995), se deve a forças de atrito causadas pela retração do concreto, já que ocorrem pressões transversais exercidas pelo concreto sobre a barra, conforme representado na figura 3.

Figura 3 - Aderência por atrito devido tensões de compressão - FUSCO (1995)



c) Aderência mecânica

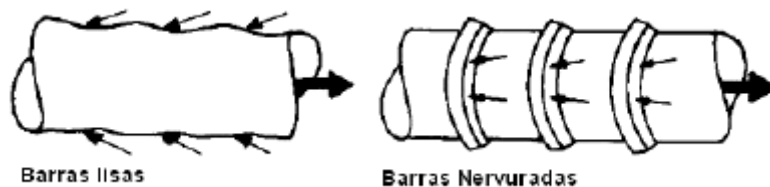
Para as barras nervuradas, LEONHARDT & MONNING (1977) ressaltam que a aderência mecânica é devida ao engrenamento entre a superfície da armadura e o concreto, com formação de “consoles de concreto”.

Os consoles de concreto são solicitados ao corte e impedem o deslizamento da barra. Afirmam, ainda, ser esta ligação a mais efetiva e confiável, dependente da forma, inclinação, altura das nervuras e distância entre elas.

Para as barras lisas, ELIGEHAUSEN (1983) e SIMPLÍCIO (2008) afirmam que a aderência mecânica ocorre devido às irregularidades superficiais originadas no processo

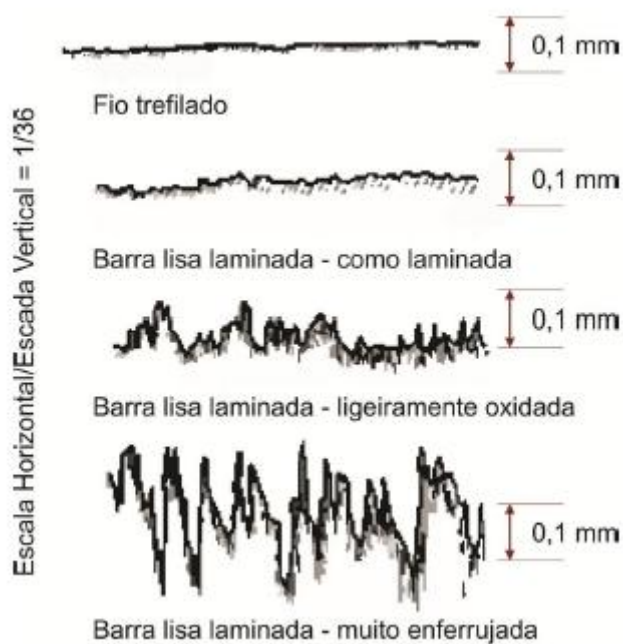
de laminação. Mas, segundo FUSCO (1995), em barras lisas, a aderência mecânica e por atrito praticamente se confundem. O mecanismo está apresentado na figura 4.

Figura 4 - Aderência mecânica - FUSCO (1995)



REHM (1961) afirma que nas barras lisas também existe aderência mecânica, devido às imperfeições oriundas do processo de laminação, conforme apresentado na figura 5:

Figura 5 - Acabamento superficial de fios e barras lisas - REHM (1961)



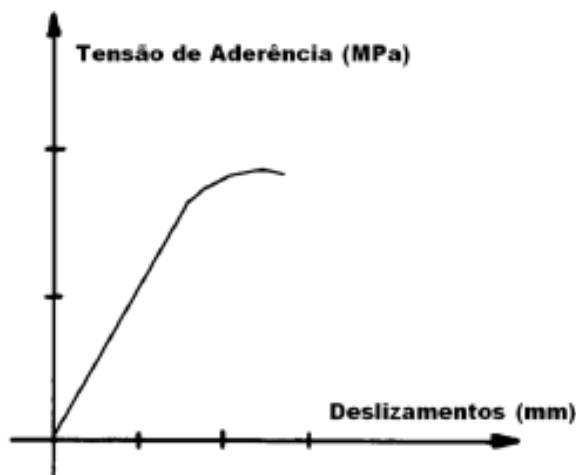
Segundo BARBOSA (2001), os tipos de aderência que existem em barras lisas são, predominantemente, por adesão e por atrito. Existe uma pequena parcela de aderência mecânica, devido às irregularidades existentes na superfície desse tipo de barra. De acordo com o ACI COMMITTEE 408 (2003), barras lisas já foram muito utilizadas, para concreto armado, na América do Norte e ainda são usadas em algumas regiões do mundo.

De acordo com TEPFERS (1979), em barras nervuradas, a aderência por atrito existe apenas quando se inicia o deslizamento da barra de aço. A adesão química possui uma pequena parcela e o tipo de aderência que garante o funcionamento da peça de concreto armado é, então, praticamente mecânico.

1.1.2. Comportamento da aderência aço-concreto

De acordo com DUCATTI (1993) o comportamento da aderência é representado pela relação entre a tensão de aderência e o deslizamento relativo entre a barra de aço e o concreto, conforme representado na figura 6.

Figura 6 - Representação do comportamento da aderência – Ducatti (1993)

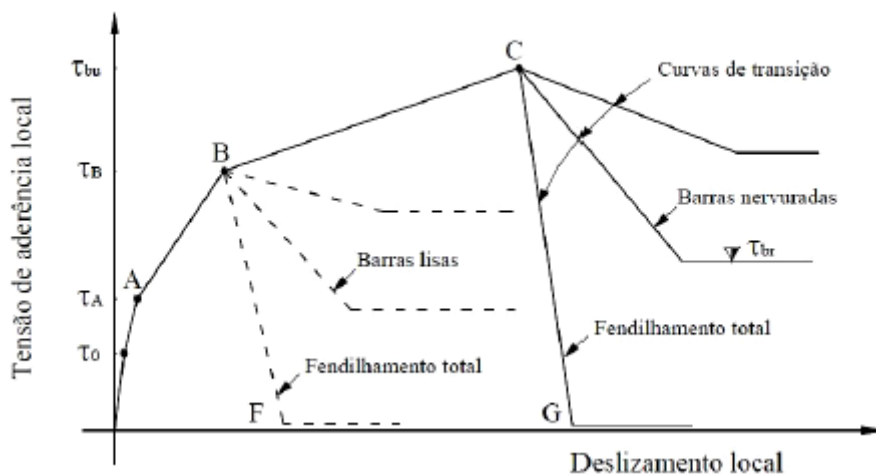


Em relação ao comportamento da aderência entre barras lisas e o concreto, COUTO (2007) e FUSCO (1995) explicam que a ruptura por aderência ocorre ao longo do perímetro da barra com o seu completo “arrancamento” do concreto, deixando o orifício quase intacto, já que, uma vez iniciado o escorregamento, logo se atinge a força última de ancoragem. Este comportamento leva à utilização de barras lisas, como armadura apenas com a utilização conjunta de outros dispositivos de ancoragem, como dobras, ganchos e barras transversais.

O modelo teórico proposto por TASSIOS (1979) é apresentado em diversos estudos, como os de BARBOSA (2001) e ROSSI (2002). Tal modelo relaciona, a partir do gráfico apresentado na figura 7, a tensão de aderência (de cisalhamento) na interface barra de aço e concreto com seus deslizamentos correspondentes e as fissurações

geradas, considerando todas as etapas de carregamento, com a finalidade de se compreender melhor o mecanismo de aderência.

Figura 7 - Curva de aderência de acordo com Tassios (1979) - FERNANDES (2000)



No início das solicitações de tração, o compósito ainda estaria no regime elástico. Portanto, até se atingir a tensão τ_0 , a aderência entre aço e concreto seria somente de origem química, ou seja, por adesão. Assim que ocorresse o acréscimo das solicitações, e o conseqüente acréscimo das tensões, esta seria rompida.

De acordo com ROSSI (2002), TASSIOS (1979) estimou uma resistência de aderência, suportada pela adesão, entre 0,5 e 1,5 MPa. Já conforme ACI COMMITTEE 408 (1991), a variação desta, está entre 0,48 e 1,03 MPa. Depois de finalizada a aderência química, se iniciaria, então, com o acréscimo de carregamento, o engrenamento mecânico da pasta com as barras lisas e das nervuras com a argamassa.

Aumentando-se novamente o carregamento, apareceriam as primeiras fissuras diagonais transversais, conforme ilustrado na figura 8, atingindo se τ_A com tensões de aderência estimadas entre 2,0 e 3,0 MPa. A inclinação, suavizada no trecho AB, indicaria maiores deslizamentos com menores acréscimos de tensões.

No momento que a tensão superasse τ_A apareceriam também fissuras longitudinais, chamadas de fendilhamento. A figura 9 esboça detalhes da formação das fissuras.

Figura 8 - Primeiras fissuras diagonais - FERNANDES 2000

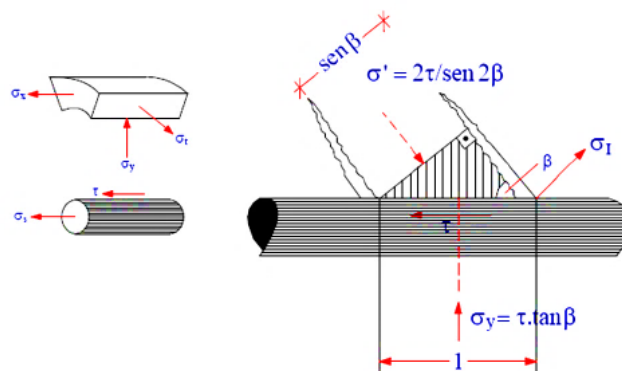
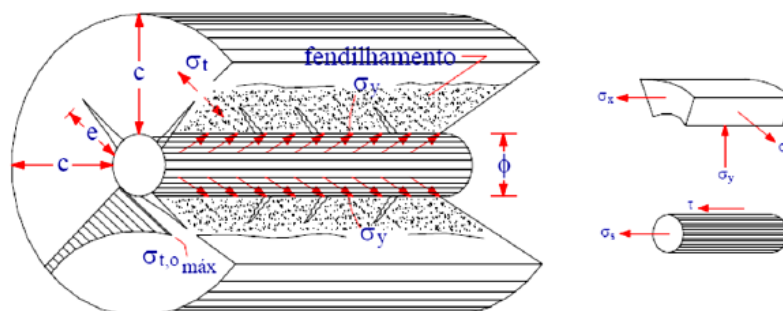


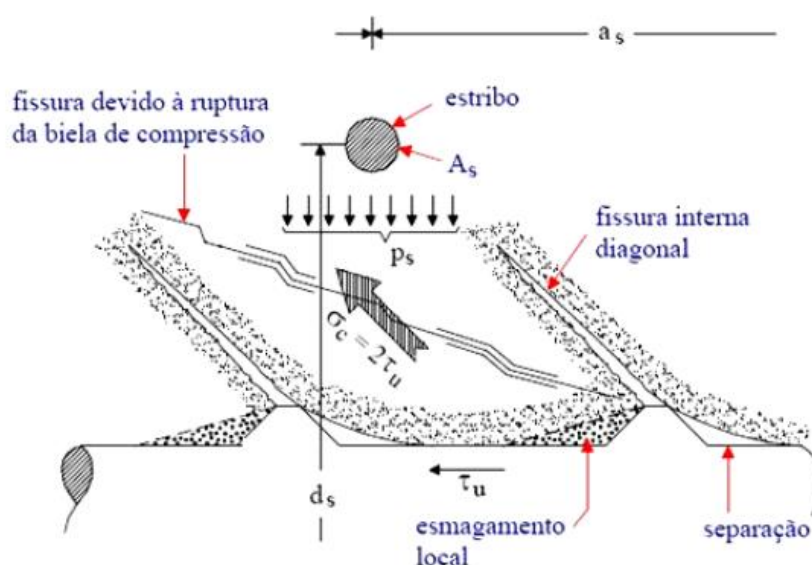
Figura 9 - Fissuras diagonais e de fendilhamento segundo Tassios (1979) - FERNANDES (2000)



Atingindo-se a tensão τ_B ocorreria o rompimento total das fissuras de fendilhamento longitudinal e neste momento as barras lisas seriam totalmente arrancadas do concreto que permaneceria praticamente ileso, sem a ocorrência de uma fissuração generalizada. Entretanto, se o concreto não fornecer bom confinamento, ocorreria uma falha da aderência pela total destruição do mesmo, ou seja, pelo completo fendilhamento e fissuração generalizada. Por outro lado, com o confinamento do concreto, o deslizamento da barra cresceria numa taxa mais acelerada para tensões crescentes, tal como representado no trecho BC.

A figura 10 representa, de acordo com TASSIOS (1979), a formação de fissuras e consequente ruptura da aderência entre barras nervuradas e o concreto quando está confinado.

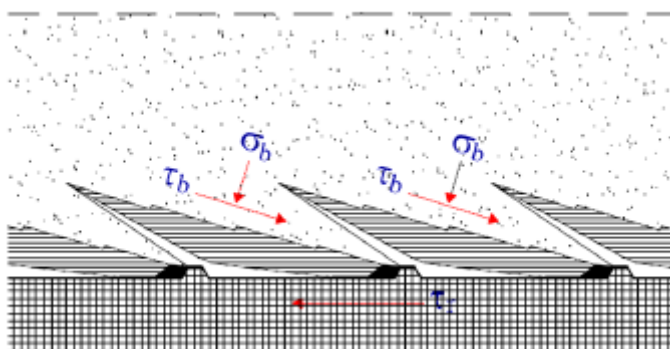
Figura 10 - Ruptura da aderência para concreto confinado com barras nervuradas de acordo com Tassios (1979) - FERNANDES (2000)



BARBOSA (2001) enfatiza que, quando as tensões estão entre τ_B e τ_c (τ_{bu}), com o crescente deslizamento, o principal mecanismo de aderência seria a engrenagem das nervuras em conjunto com a considerável destruição do concreto circundante.

ROSSI (2002) e BARBOSA (2001) explicam, ainda, que se as barras nervuradas forem solicitadas até a tensão última de aderência (τ_{bu}), poderia ocorrer o arrancamento perfeito das mesmas. O deslizamento seria impedido apenas pelo atrito concreto-concreto, o estágio final de tensões residuais τ_{br} . A figura 11 ilustra o mecanismo de resistência residual.

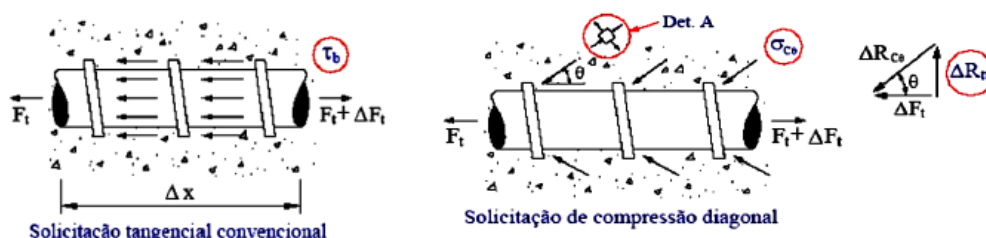
Figura 11 - Hipótese do mecanismo de resistência de aderência residual τ_r - TASSIOS (1979) - FERNANDES (2000)



FUSCO (1995) também explica como seria o processo de solidarização por aderência da barra de aço ao concreto. Ao contrário do que se intui, inicialmente, ocorre, segundo o mesmo, a geração de tensões diagonais de compressão e tensões

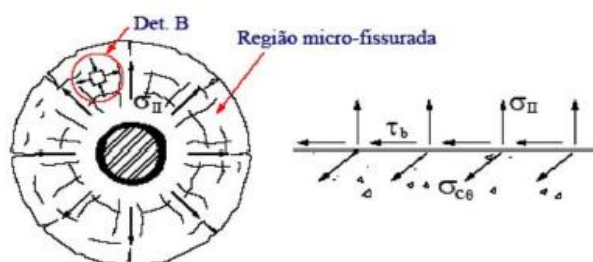
transversais de tração, simultaneamente, para o estabelecimento do equilíbrio tensões, e não pela mobilização de tensões tangenciais. Na figura 12, Fusco apresenta um esquema representando as tensões citadas.

Figura 12 - Tipos de sollicitações de acordo com FUSCO (1995)



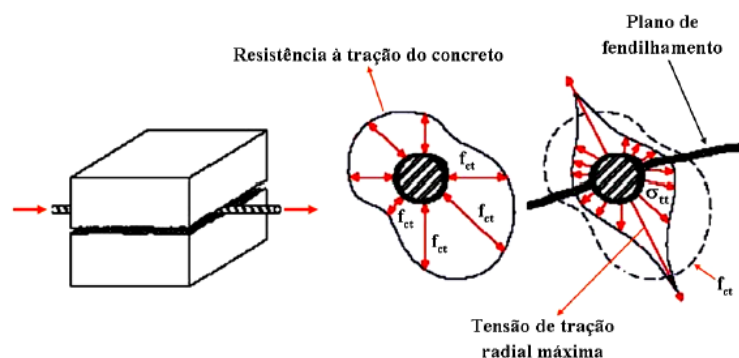
As tensões de tração produziram pressões no concreto em torno da barra, tornando a região micro fissurada, conforme representado na figura 13.

Figura 13 - Região micro fissurada devido às tensões de tração - FUSCO (1995)



Os esforços transversais gerados tenderiam a provocar a abertura de fendas paralelas ao eixo da armadura. A figura 14 ilustra o chamado fendilhamento.

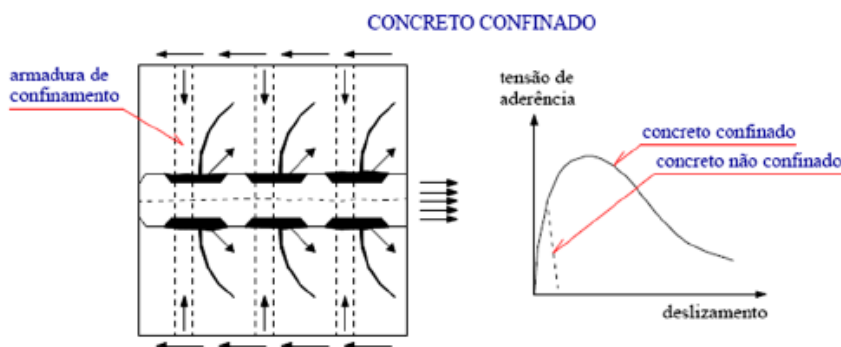
Figura 14 - Fendilhamento do concreto - FUSCO (1995)



FERNANDES (2000) aponta a existência de dois tipos de ruptura por arrancamento: direto ou por fendilhamento do cobrimento do concreto. O primeiro ocorre quando o

confinamento da armadura é considerado suficiente para reduzir a propagação e abertura de fissuras ocasionando, conseqüentemente, no arrancamento da barra. Esse tipo estaria relacionado, de maneira especial, com o tipo e geometria das nervuras e, ainda, com a resistência do concreto. O gráfico da figura 15 ilustra o tipo de ruptura citada.

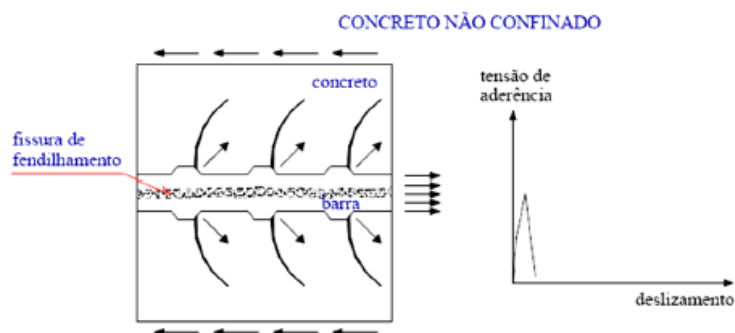
Figura 15 - Ruptura por aderência em concreto confinado - FERNANDES (2000)



O segundo tipo de ruptura, por fendilhamento do cobrimento, ocorreria devido ao confinamento considerado insuficiente para garantir o arrancamento completo da barra. Seria decorrente das forças de tração originadas pelas componentes radiais das tensões de compressão que transferem o esforço do aço para o concreto.

As fissuras por fendilhamento, segundo FERNANDES (2000), e conforme demonstrado também por FUSCO (1995) tendem a se propagar em direção às bordas, resultando na perda do cobrimento e da aderência, conforme demonstrado na figura 16. Os principais fatores que influenciariam a orientação das fissuras seriam a quantidade de barras e sua configuração ao longo do elemento.

Figura 16 - Ruptura por aderência em concreto não confinado - FERNANDES (2000)



1.2.Fatores que influenciam a aderência

1.2.1. Resistência do concreto

De acordo com FRANÇA (2004), a resistência do concreto é um dos fatores que influencia de maneira mais significativa à resistência de aderência. De modo geral, quanto maior a resistência do concreto, maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface aço-concreto.

Os resultados de SOROUSHIAN ET AL. (1991) citados por FRANÇA (2004) indicam que a resistência de aderência é proporcional à raiz quadrada da resistência a compressão. Outros autores, DUCATTT e AGOPYAN (1993) citados por FRANÇA (2004), observam comportamentos similares e isso se deve ao fato de que a resistência de aderência, em muitos casos é comandada pela resistência a tração, a qual é proporcional a raiz quadrada da resistência a compressão.

VIEIRA (1994) citado por FRANÇA (2004), afirma que a resistência à tração do concreto é o fator principal que condiciona a resistência de aderência quando a ruptura ocorre por fendilhamento. No entanto, no caso em que ocorre ruptura por arrancamento, o fator determinante é a resistência de compressão do concreto.

BARBOSA (1998) citado por FRANÇA (2004) evidencia o aumento da resistência da ligação de aderência com o aumento da resistência do concreto que envolve a armadura. De acordo com o autor, nota-se diferença somente sobre as leis de variação da tensão tangencial média última em função de f_c ou $f_c^{1/4}$.

De acordo com BARBOSA (2001) a presença de sílica aumenta a resistência à compressão e de aderência do concreto. Esse aumento na resistência e a aderência são atribuídos a densificação e a diminuição da espessura da zona de transição entre o concreto e a barra de aço.

1.2.2. Diâmetro da barra

Segundo análise de SOROUSHIAN & CHOI (1989) e REYNOLDS & BEDDY (1982) citado por BARBOSA (2001) o aumento do diâmetro das barras reduz a tensão máxima de aderência. Tal fato é justificável pela espessura da zona de transição, mais grossa nas barras de maior diâmetro. O diâmetro aliado às maiores dimensões das nervuras “seguram” mais água de amassamento na face inferior da barra (exsudação interna) proporcionando uma zona de transição de maior espessura; esse aumento enfraquece a ligação entre a matriz da argamassa e a armadura, tornando-a mais porosa e facilitando o seu esmagamento por compressão das nervuras.

Ressalta-se por diversos pesquisadores, como SORETZ (1972), SORATEZ ET AL. (1973), REYNOLDS & BEDDY (1982), ELIGEHAUSEN ET. al. (1983) citados por BARBOSA (2001), consideram essa variável de menor importância para barras de diâmetro nominal compreendido entre 8 e 32 mm, desde que o recobrimento e o comprimento de ancoragem sejam múltiplos do diâmetro da barra.

1.2.3. Posição das barras na concretagem

Segundo BARBOSA (2001) a diminuição da qualidade da aderência depende do fator água/cimento e da posição das barras em relação à superfície das formas, do sentido da concretagem e do sentido da extração das mesmas

Verifica-se que a segregação do concreto fresco faz com que haja um acúmulo de água sob as armaduras e, posteriormente, ao ser absorvida pelo concreto endurecido (ou desaparecer por evaporação) deixa vazios ou inúmeros poros na sua face inferior, prejudicando sensivelmente a aderência, pois compromete a zona de transição existente entre aço e o concreto (GHIO & MONTEIRO, 1997).

Pelo exposto, nota-se que a qualidade da aderência será reduzida, quando comparada com as barras na posição vertical. Essa redução depende do fator a água/cimento e da posição da barra em relação à fôrma ou em relação à camada de concreto endurecido devendo-se considerar essas diferenças.

A posição das barras horizontais que podem ser colocadas no topo ou no fundo do molde do corpo de prova também influencia a qualidade da aderência. Barras

concretadas na posição horizontal no fundo da fôrma apresentam melhor comportamento que aquelas concretadas no topo da fôrma, visto que as barra inferiores situam-se na zona onde o adensamento se faz sentir de maneira mais acentuada e, conseqüentemente, torna-se mais difícil a existência de argamassa porosa na metade inferior das barras.

DUCATT (1993) demonstrou que existe uma maior aderência em barras horizontais inferiores, comparadas às horizontais superiores e as verticais. Essa menor aderência para barras verticais se deve segundo o autor, à concordância das forças de arrancamento com o sentido de sedimentação do concreto nos moldes. Concluiu-se, também, que para o concreto de alta resistência as diferenças entre as tensões nas três barras (horizontais inferior, superior e verticais) são pequenas quando comparadas com as suas correspondentes para concretos com resistências normais.

1.2.4. Idade da carga

RIBEIRO (1985) citado por FRANÇA (2004) afirma que a influência da idade de carga sobre a aderência é a mesma que sobre a resistência à compressão ou tração do concreto. Esta afirmativa é sustentada pelo CEB (1968), MARTIN e NOAKOWSKI (1981), citado por FRANÇA (2004).

CHAPMAN e SHAH (1987) citado por VIEIRA (1994) concluíram que nas barras nervuradas, a idade de carga influencia de forma significativa as características de aderência; no entanto, o mesmo não ocorreu para as barras lisas, pois com o aumento da resistência à compressão, a resistência de aderência permaneceu a mesma.

1.2.5. Adensamento

A deficiência do adensamento pode prejudicar a aderência nas áreas com grande porcentagem de armadura, onde são maiores as dificuldades de concretagem e maiores as chances que seja deficiente.

Segundo RIBEIRO (1985) citado BARBOSA (2001) desde que seja adequada, a maneira com que é realizado (vibrado ou socado) o adensamento influencia da mesma forma como influencia na resistência à compressão.

1.2.6. Geometria e nível de tensões da armadura

A geometria das barras e, principalmente, a geometria das nervuras tem uma importância determinante no desempenho da aderência. Segundo WERNISH(1937) e GOTO (1971), diversos autores desenvolveram trabalhos de investigação no sentido de perceber a influência de diferentes tipos de barras na resistência da aderência entre as barras de aço e o concreto. A conclusão geral foi que diminuindo o espaçamento entre nervuras e aumentando a altura das mesmas, a resistência da aderência aumentava.

No caso de barras nervuradas, o melhor desempenho em termos de aderência pode ser obtido através da combinação apropriada de três fatores: altura das nervuras (a), espaçamento entre nervuras (S_R) e diâmetro da barra (d_b). Com base nesses fatores, a FIB BULLETIN 10 (2000) apresenta na equação 2-1 um coeficiente designado por área relativa das nervuras transversais (f_R), sendo (A_R) a área da projeção de uma nervura na seção transversal da barra.

$$f_R = \frac{A_R}{\pi \cdot d_b \cdot S_R} \quad \text{Equação 1-1}$$

Desde que a área relativa das nervuras transversais seja igual e o ângulo de inclinação das nervuras seja superior a 30° , pode-se esperar um comportamento próximo em termos de aderência. Valores de f_R entre 0,05 e 0,10 levam a um bom comportamento em termos de resistência, requisitos da indústria e comportamento para cargas de serviço.

Em Portugal, a geometria as nervuras deve respeitar as especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) que apresenta a seguinte expressão na equação 2-2 nas especificações das barras de aço:

$$f_R = \frac{2a(\pi\phi - \Sigma f_i)}{3\pi \cdot \phi \cdot c} \quad \text{Equação 1-2}$$

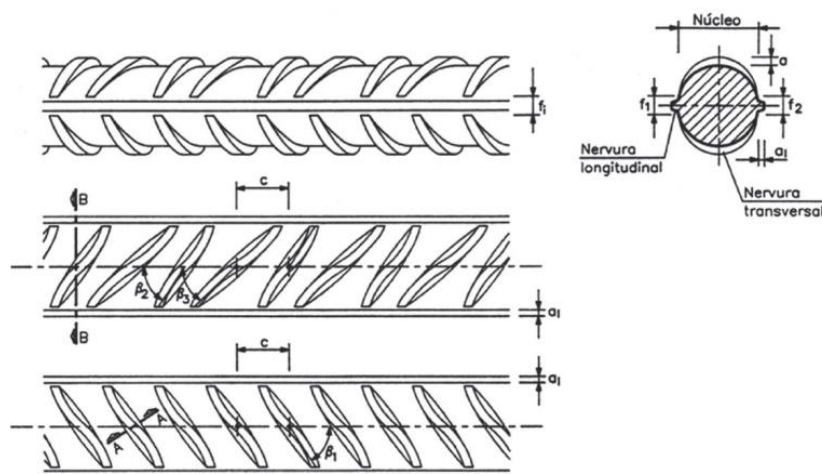
Onde:

Σf_i = o perímetro sem nervuras transversais

a = a média das alturas das nervuras transversais dos dois lados da barra

c = a média dos afastamentos das nervuras transversais dos dois lados da barra

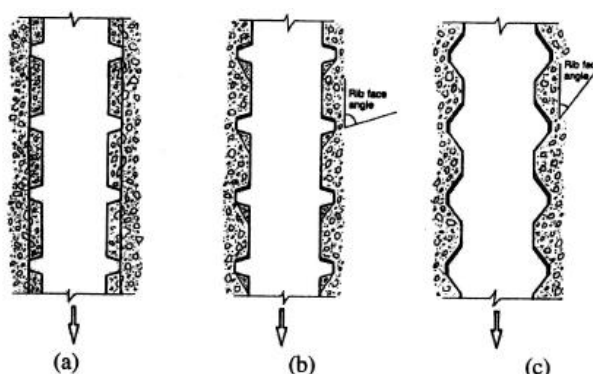
Figura 17 - Disposição das nervuras transversais e longitudinais de uma barra de aço, segundo LNEC



A inclinação da altura das nervuras é um fator muito importante. Se a inclinação entre a nervura e o eixo da barra for superior a 45° o escorregamento ocorre quase por inteiro devido ao esmagamento do concreto em contato com as nervuras.

O escorregamento é favorecido por pequenas inclinações. Para bons resultados, as nervuras deverão estar uniformemente espaçadas e o ângulo referido não deverá ser inferior a 45° .

Figura 18 - Modos de ruptura por aderência: (a) ruptura por "pull-out"; (b) ruptura por "pull-out" induzida por "splitting" com esmagamento do concreto abaixo das nervuras; (c) ruptura por "splitting" - FIB BULLETIN 10 (2000)



O CEB(1999) e o EUROCODE 2 (1993) propuseram uma fórmula simplificada para calcular a área relativa da nervura, a saber na equação 2-3:

$$f_R = (\gamma \cdot h_s) / S_n$$

Equação 1-3

Onde:

f_R = área relativa da nervura;

γ = constante que depende da geometria da barra (casos usuais = 0,5);

h_s = altura máxima da nervura transversal;

S_n = espaçamento entre as nervuras transversais, ou seja, distancia centro a centro entre duas nervuras consecutivas.

A normalização especifica o valor mínimo requerido para a área relativa da nervura, vide tabela 2. Salienta-se que quando o valor de f_R é satisfeito, os materiais são considerados de alta aderência. O LNEC também segue os valores mínimos propostos pelo CEB (1999)

DARWIN et al. (1996) e ELIGEHAUSEN & VLIET (1999) concluíram que à medida em que f_R aumenta, a tensão de aderência também irá aumentar.

Tabela 1 - Valores mínimos de f_R - CEB (1999)

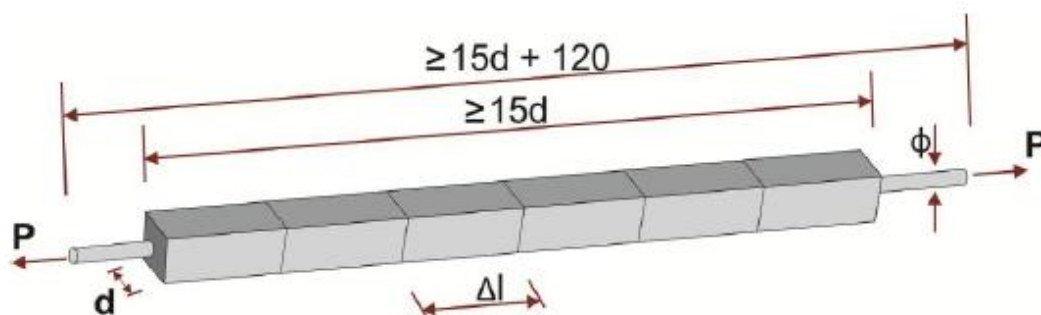
Φ (mm)	5-6	6,5-8,5	9-10,5	11-40
f_R	0,039	0,045	0,052	0,056

1.3. Ensaio de aderência

1.3.1. Ensaio de barras confinadas

O ensaio de barras confinadas é utilizado para se determinar o coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço, segundo as prescrições da ABNT NBR 7477 (1982) – “Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado”. Este ensaio consiste na aplicação de esforços de tração sobre a barra de aço, envolvida pelo concreto, em corpos de prova com características apresentadas na figura 19.

Figura 19 - Modelo do corpo de prova do ensaio de barras confinadas - FRANÇA 2010



Ao final do ensaio, o corpo de prova deve apresentar fissuras, conforme apresentado na figura 20.

Figura 10 - Modelo de corpo de prova segundo a ABNT NBR 7477 1982



Avaliando-se o afastamento e a abertura das fissuras formadas, pode-se determinar o coeficiente de conformação superficial η por meio da equação 2-4

$$\eta = \frac{2,25 \cdot d}{\Delta l_{medio}}$$

Equação 1-4

Sendo:

d = lado da seção do tirante

Δl_{medio} = distância média entre fissuras, considerando as quatro faces.

Segundo BARBOSA (2001) e FRANÇA (2004), barras lisas apresentam fissuras com aberturas maiores. Já as barras nervuradas apresentam fissuras com aberturas menores e mais próximas umas das outras.

MELO (2011) constatou, em pesquisa realizada com barras de aço lisas CA-60 de diâmetros de 5,0 mm e 6,0 mm, que esse ensaio pode não ser adequado para se obter o coeficiente de conformação superficial para barras finas. Além desse autor, BARBOSA (2001) e COSTA et al. (2006) constataram que não foram atingidos os valores determinados por essa norma para o coeficiente de conformação superficial em barras com diâmetros inferiores a 12,5 mm estudadas. Sendo assim, esse ensaio não é confiável para determinação do coeficiente de conformação superficial para barras finas.

1.3.2. Ensaio de arrancamento direto (“Pull-out Test”)

O “pull-out test” é considerado o ensaio de aderência mais tradicional e seu método consiste em extrair uma barra de aço, posicionada no centro de um corpo de prova cúbico de concreto, com auxílio de uma máquina de ensaio. As extremidades da barra são projetadas para fora do corpo de prova e é medida a força de tração, aplicada a um dos extremos, e os deslizamentos no outro. Esse ensaio é padronizado pela RILEM CEB RC6 (1983). A figura 21 ilustra esse tipo de ensaio.

A resistência última de aderência é calculada com base na força máxima de arrancamento. Os deslizamentos medidos durante o ensaio são relacionados aos

carregamentos correspondentes e, a partir desses valores, são obtidos gráficos de tensão de aderência versus deslizamento. Autores, como MONTROYA et al. (1974), definem e adotam alguns valores de deslizamento, considerados importantes na resistência de aderência. O deslizamento de 0,1 mm é descrito como o referente à tensão de serviço e o deslizamento de 1,0 mm é relacionado à tensão de ruptura convencional. Entretanto, a ruptura pode ocorrer antes ou após esse deslizamento de 1,0 mm, conforme apresentado nas figuras 22 e 23:

Figura 11 - Esquema do ensaio de arrancamento - RILEM CEB RC6 (1983)

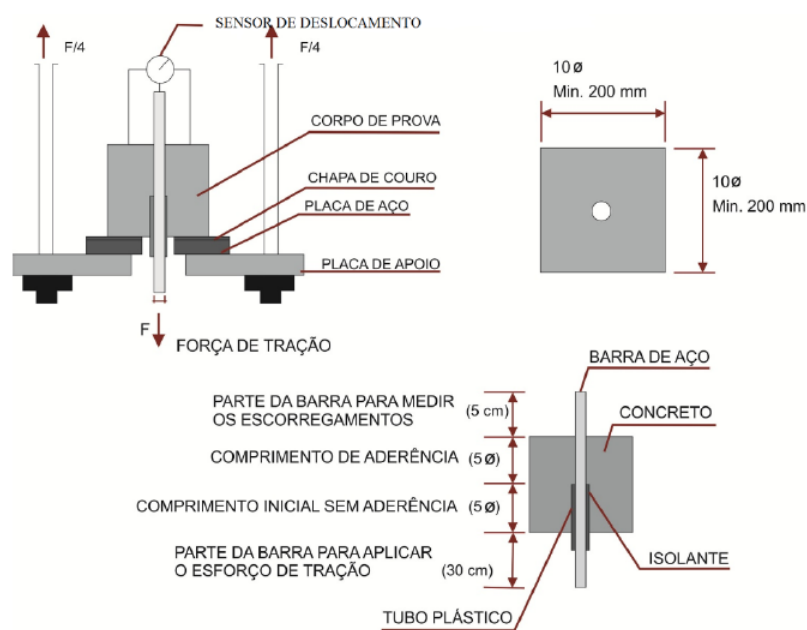


Figura 12 - Gráfico tensão por deslizamento com o máximo ocorrendo após 1,0 mm - FRANÇA (2010)

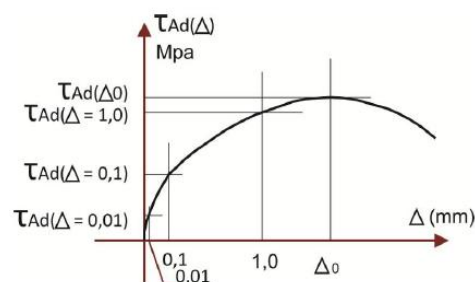
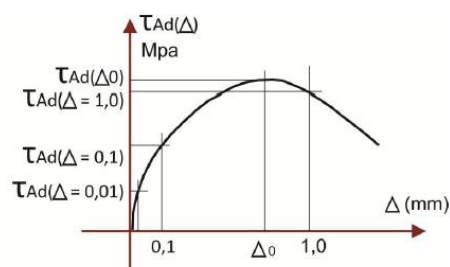


Figura 13 - Gráfico tensão por deslizamento com o máximo ocorrendo antes de 1,0mm - FRANÇA (2010)



FUSCO (1995) defende que, no ensaio de arrancamento, há deslocamentos desde o princípio da aplicação da força. Depois de iniciado o escorregamento de toda a barra, a força de aderência ainda pode aumentar. Esse aumento é pequeno para barras lisas, sendo maior para barras nervuradas, devido à maior capacidade de mobilização de aderência mecânica deste tipo de barra.

De acordo com BARBOSA (2001), o ensaio de arrancamento tem sido amplamente utilizado para identificar o comportamento de barras de diferentes diâmetros, em concreto com diferentes qualidades e idades. DUCATTI (1993) também concorda que esse método é adaptável ao uso em pesquisas, variando-se as condições de acordo com os objetivos em cada estudo.

Quanto aos modos de ruptura que podem ocorrer nesse ensaio, alguns autores, como FERNANDES (2000) e ALMEIDA FILHO (2006), definem dois tipos, como sendo os principais:

- Arrancamento: A ruptura acontece por escorregamento da barra de aço, uma vez que há um confinamento suficiente da mesma, permitindo o corte do concreto entre as nervuras.
- Fendilhamento: Ocorre quando o confinamento da barra pelo concreto é insuficiente para garantir o arrancamento desta.

1.4. Estudos sobre aderência

Diversos estudos em relação à aderência entre barras de aço e concreto convencional foram realizados desde a década de quarenta, com o intuito de se conhecer melhor o fenômeno. FRANÇA (2010) abordou resumidamente alguns desses estudos e BARBORA (2017) fez um levantamento dos estudos nacionais compreendidos entre 2006 e 2016. Será apresentado uma cronologia das principais pesquisas.

WATSTEIN (1941) foi um dos pioneiros a estudar aderência aço-concreto. Em sua pesquisa propôs o primeiro ensaio de arrancamento com o objetivo de estudar a distribuição da tensão de aderência, considerando corpos-de-prova cilíndricos de concreto envolvendo barras de aço. Analisou, também, a influência das características superficiais de barras lisas, obtidas por laminação a frio e a quente, e nervuradas, com quatro tipos de geometrias diferentes. Nas conclusões, se relaciona à obtenção dos dados relacionados à tensão de aderência e às correspondentes cargas aplicadas nas barras de aço que apresentaram variações crescentes, aproximadamente lineares, em todas as barras, exceto para as barras lisas obtidas por laminação a frio.

CLARK (1949) fez a comparação entre os dois tipos de ensaio, de flexão de vigas e de arrancamento em relação à resistência ao deslizamento das barras de aço no concreto. Analisou a influência da variação da resistência do concreto, geometria e diâmetro das barras e também posicionamento das mesmas na aderência. Uma das conclusões obtidas foi em relação à influência da geometria das barras, que afetou, similarmente, na aderência para os dois tipos de ensaio. Observou, também, os valores obtidos para resistência de aderência foram maiores em corpos de prova no quais as barras de aço foram posicionadas próximas ao fundo da forma antes da concretagem, em comparação com as posicionadas próximas ao topo.

MAINS (1951) estudou a influência das barras lisas e nervuradas, com e sem dobras, na distribuição da tensão de aderência. Os ensaios utilizados na pesquisa foram o de arrancamento e de flexão de vigas. Dentre as conclusões observadas no estudo pode-se citar o excessivo deslizamento das barras lisas, sem dobras, em relação ao concreto, para ambos os ensaios. Sendo que nos corpos-de-prova de arrancamento foi necessário um esforço de menor amplitude para a ocorrência de tal fato. Observou-se, também, que no caso de corpos-de-prova de vigas, as maiores tensões de aderência

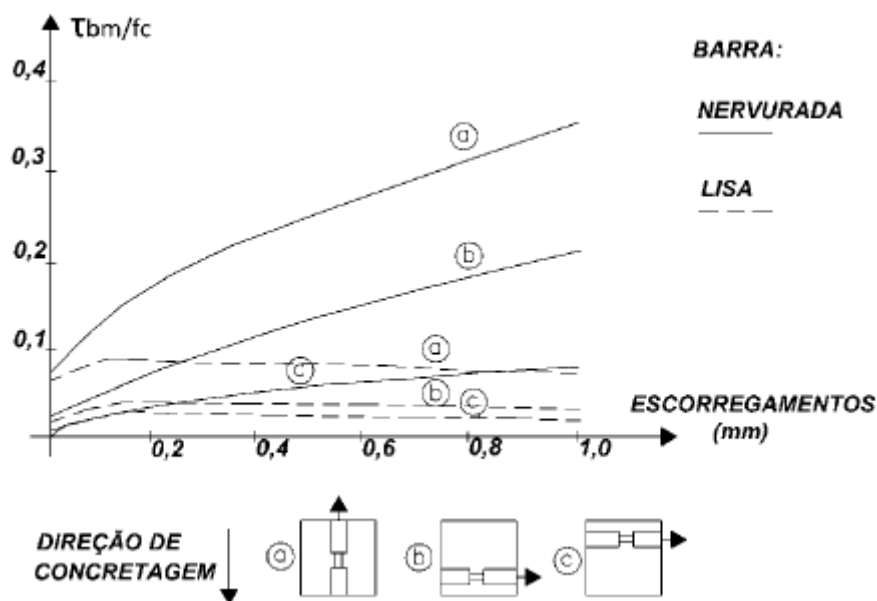
ocorreram em regiões de cisalhamento zero. Em todos os modelos em que se utilizaram barras nervuradas, com dobras, observou-se tensões de aderência suficientemente elevadas para produzir fissuras no concreto.

FERGUSON, TURPIN e THOMPSON (1954) abordaram, principalmente, em seus estudos, a influência do espaçamento mínimo entre as barras de aço e, também, o cobrimento destas na aderência. Para isso utilizaram ensaios de arrancamento considerando uma e duas barras excêntricas ao bloco de concreto. Também realizaram ensaios de flexão de viga. Uma das conclusões se deve ao fato do adequado espaçamento entre as barras e o apropriado cobrimento estar diretamente relacionado com o tamanho do agregado utilizado na composição do concreto e com a tensão de escoamento das barras de aço para uma perfeita transmissão de tensões cisalhantes na interface aço-concreto.

PERRY e THOMPSON (1966) estudaram a distribuição da tensão de aderência considerando três modelos diferentes de ensaios. No primeiro, utilizaram ensaios de arrancamento considerando a barra de aço excêntrica ao eixo do corpo-de-prova de concreto. No segundo empregaram vigas bi apoiadas, com as barras posicionadas nas extremidades do corpo-de-prova e ancoragem livre no centro. Os esforços foram aplicados em dois pontos diferentes. No terceiro modelo, também foram utilizadas vigas bi apoiadas, porém levou-se em consideração uma fissura no meio do vão e esforços aplicados em pontos diferentes. A barra de aço envolvida pelo concreto foi posicionada na parte inferior de todo o comprimento do corpo-de-prova. Concluíram que os três tipos de ensaios apresentaram tensões máximas de aderência semelhantes, para equivalentes tensões nas barras de aço, porém ocorreram em pontos diferentes.

REMH (1961) estudou o fenômeno da aderência através de ensaios de arrancamento e adotou, em seus estudos, barras com diâmetros superiores a 10 mm. O autor chegou a importantes conclusões em seus trabalhos científicos como, por exemplo, em relação à melhor condição de aderência obtida, considerando diferentes posições das barras de aço na forma. Segundo o autor, quando as barras são posicionadas verticalmente na forma, antes do lançamento do concreto, obtêm-se melhores resultados, considerando que aplicação de esforços, no ensaio, ocorre na direção contrária à sedimentação do concreto. A figura 24 apresenta o tratamento dos dados obtidos no estudo.

Figura 14- Posicionamento de barras de aço na concretagem - LEONHARDT & MONNING (1977)

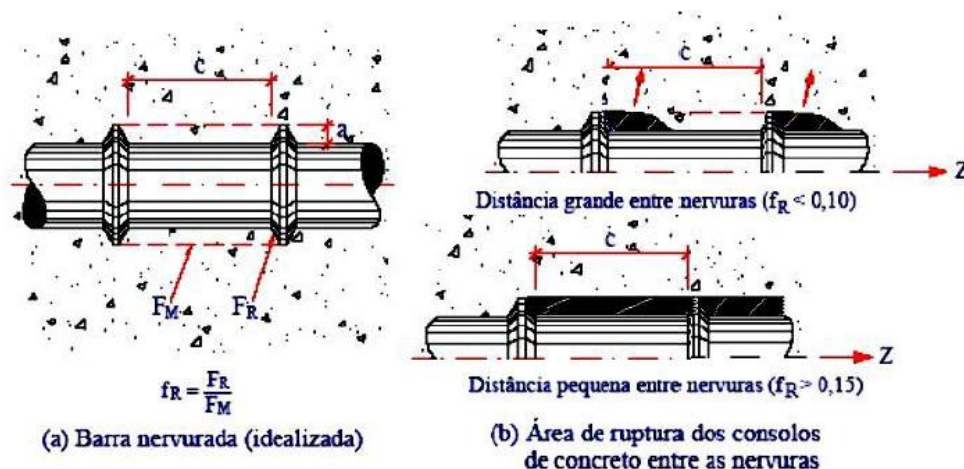


Quando a aplicação de esforços for realizada no mesmo sentido do enchimento da forma, os resultados de resistência de aderência obtidos seriam inferiores aos alcançados na situação anterior. Tal fato seria decorrente do acúmulo de argamassa porosa em baixo das nervuras, ou seja, a formação de espaços vazios com a segregação e acúmulo de água. O mesmo ocorre na metade inferior das barras posicionadas horizontalmente. E quando colocadas na parte superior, os resultados seriam ainda piores.

REMH (1961) realizou, também, um relevante estudo em relação ao comprimento da barra em contato com o concreto, denominado comprimento de aderência, no ensaio de arrancamento, e sua significativa influência nos resultados obtidos, conforme mencionado anteriormente.

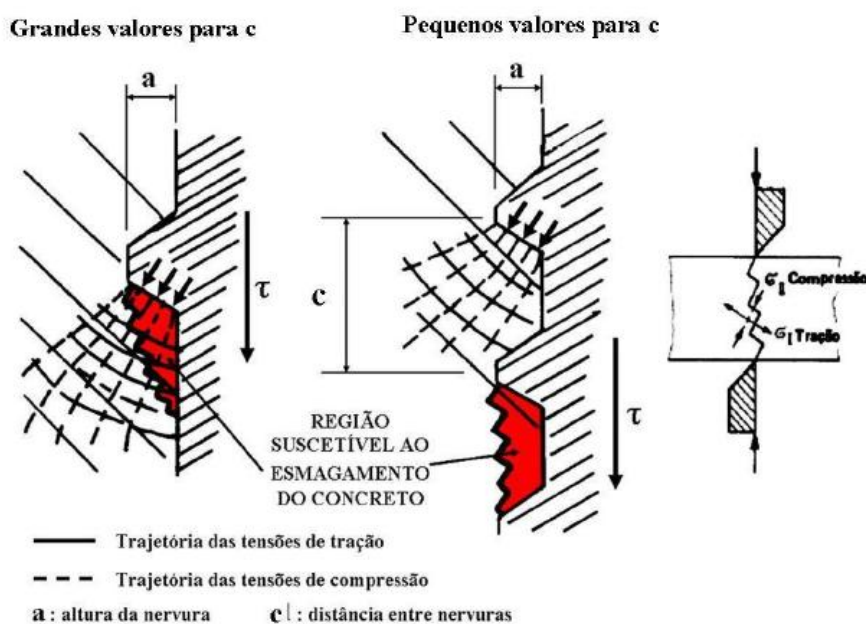
Analisou, ainda, as influências das nervuras, distância livre entre elas, forma e inclinação na resistência por aderência relacionando-as através da chamada, superfície nervurada relativa (f_R), que é uma medida de comparação para diferentes superfícies. Segundo Remh, esta medida seria a relação entre (f_R), área de concreto imediatamente em contato com as nervuras, e a superfície lateral (f_M) e não deve ser maior que 0,15 uma vez que isso significaria o não completo aproveitamento da resistência dos consolos. Conforme apresentado na figura 25.

Figura 15 - Barra ideal com nervuras anulares e possíveis áreas de ruptura dos consolos de concreto entre as nervuras - LEONHARDT & MONNING (1977)



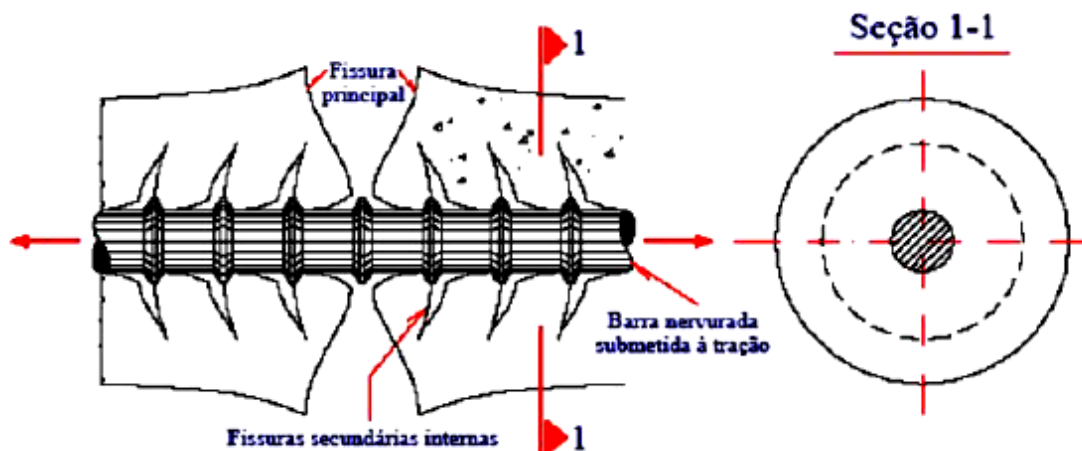
A figura 26 representa a superfície de ruptura dos consolos de concreto e as direções das tensões principais de tração e compressão.

Figura 16 - Trajetórias das tensões principais e da ruptura nos consolos de concreto - LEONHARDT & MONNING (1977)



GOTO (1971) fez um estudo aprofundado em relação à formação de fissuras, primárias e secundárias em um corpo de prova de concreto envolvendo uma barra de aço tracionada, conforme ilustrado na figura 27.

Figura 27 - Formação de fissuras secundárias entre fissuras principais em uma barra de concreto armado tracionada - LEONHARDT & MONNING (1977)



Relacionou a formação de fissuras longitudinais com o espaçamento entre fissuras primárias, e ainda, com a geometria das nervuras. Injetou tinta vermelha para melhor visualização da região fissurada. No estudo realizado foi evidenciado que o esforço de tração na barra ocasiona micro fissuração (fissuras secundárias) com ângulos de 60 graus em relação ao eixo da barra no concreto envolvente e, conseqüentemente, ocorre a perda de adesão. Concluiu, ainda, que a formação de fissuras longitudinais ocorre geralmente quando o espaçamento das fissuras principais é máximo. Adotou barras de diâmetros de 19 mm e 32 mm e concreto com 30 MPa de resistência.

MIRZA & HOUDE (1979) realizaram um estudo em corpos-de-prova prismáticos submetidos a esforços de tração nas extremidades da barra de aço envolvida por concreto. Neste estudo analisou-se o comportamento entre tensão de aderência e o deslizamento do aço, e também a formação e propagação das fissuras, considerando variáveis como o diâmetro das barras e a resistência à compressão do concreto. Observou que o deslizamento das barras de aço envolvidas pelo concreto aumentou linearmente com a tensão no aço.

JIANG, SHAH e ANDONIAN (1984) analisaram três tipos de ensaio de arrancamento com barras redondas, considerando metade da área da seção em duas extremidades do bloco cúbico de concreto. Uma barra inteira no centro do bloco cúbico de concreto. E uma barra de seção quadrada no centro de um corpo-de-prova prismático, para facilitar medições do deslocamento local, a formação de fissuras secundárias e a distribuição da tensão de aderência no concreto circundante. Adotaram

barras de 15,8mm e 19,1mm de diâmetro e concretos com resistências entre 34 MPa e 45 MPa. Concluíram que, muitos aspectos importantes do fenômeno da aderência, ao se realizar uma comparação dos modelos adotados com os mais comumente utilizados, se apresentaram idênticos.

RIBEIRO (1985) realizou ensaios de arrancamento considerando a variação do diâmetro das barras entre 6,3 mm e 20 mm. Além disso, realizou ensaios de extremos de viga com barras de diâmetros de 16 mm variando o percentual de estribos. Para ambos os ensaios foram adotados concretos de 15 MPa e 30 MPa de resistência. O objetivo do estudo foi apresentar os fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas. Com relação ao ensaio de arrancamento concluiu que as barras com diâmetros de 6,3 mm e 8 mm apresentaram um comportamento de aderência inferior aquele observado para barras com 16 mm de diâmetro, que pode ser explicado pela redução da área das nervuras quando passam pelo processo de retificação antes de chegarem ao consumidor. Em relação ao ensaio de extremo de viga, concluiu que a resistência última de aderência apresentou sensível melhora com o aumento do cobrimento, do percentual de estribos e com a melhoria da qualidade do concreto

KEMP (1986) realizou ensaios de meia viga (Half beam test) considerando duas barras de aço na parte inferior do corpo-de-prova de concreto a fim de simular a excentricidade da barra de aço na viga. Analisou a influência da distância entre as barras, do cobrimento de concreto e a influência mútua entre o cisalhamento e a flexão. Utilizou concreto com resistência de 28 MPa e barras com diâmetros de 35,81 mm.

Outros autores como BARBOSA (2001) e CAETANO (2008), realizaram estudos sobre a aderência aço-concreto, envolvendo uma gama maior de resistência do concreto e diâmetros de barras. A primeira entre 20 MPa e 100 MPa e barras com diâmetros entre 6,3 mm e 25,0 mm. A segunda, concreto entre 25 MPa e 65 MPa e barras com diâmetros entre 8,0 mm e 25,0 mm. BARBOSA (2001) utilizou barras quadradas e circulares, com o objetivo de avaliar a influência da geometria destas em ensaios de arrancamento e conformação superficial de barras. Uma das principais conclusões de seu estudo foi em relação ao aumento da tensão média de aderência em função do aumento da resistência do concreto. E o mesmo ocorre, segundo a autora, quando se aumenta o diâmetro das barras, porém observou que o esse aumento com o acréscimo da resistência do concreto favorece ao fendilhamento.

CAETANO (2008) adotou em sua pesquisa ensaios de arrancamento e de viga. Analisou o comportamento da aderência com ênfase para elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas. Além disso, abordou parâmetros de influência como a resistência do concreto, o diâmetro das barras e o tipo de nervuras. Fazendo-se uma síntese de suas conclusões, CAETANO (2008) observou primeiramente que exposições a altas temperaturas e a corrosão afetam significativamente na aderência. Sendo que, em relação à temperatura, ocorreu uma brusca redução do desempenho aderência para valores maiores de resistência à compressão do concreto, consideradas, com elevadas temperaturas. Em relação à corrosão observou um leve acréscimo da tensão de aderência para pequenos teores sendo que acima de 1,5% o avanço da corrosão comprometeria a aderência. E para a resistência do concreto, chegou a conclusões semelhantes às de BARBOSA (2001), ou seja, com o aumento da resistência do concreto houve um acréscimo da tensão de aderência, porém a resistência elevada do concreto levaria a rupturas frágeis favorecendo ao fendilhamento antecipado. Concluiu, ainda, que a aderência apresenta melhor desempenho para barras com diâmetros menores, considerando concreto com 30 MPa de resistência. E finalmente em relação ao tipo de nervuras, observou que alturas maiores das nervuras apresentam maiores tensões, quando comparadas a menores alturas em barras com 12,5 mm de diâmetro.

REYES e EL DEBS (2009) avaliaram a tensão de aderência em concretos convencionais, auto adensáveis e reforçados com fibras de aço, todos com resistência à compressão de 30 MPa e de 60 MPa, ensaiados aos 28 dias de idade. As barras de aço utilizadas foram do tipo CA-50, com diâmetros de 10,0 mm e 16,0 mm. Foram realizados ensaios de arrancamento adaptados da norma RILEM-CEB-FIP (1973) para ensaios de carregamento cíclicos. Os autores concluíram que o ensaio de arrancamento pode ser utilizado para analisar a deterioração da aderência em diversos tipos de concretos. A maior deterioração foi observada nos primeiros ciclos, com baixo carregamento aplicado. A resistência à compressão do concreto e o diâmetro das barras influenciam na deterioração da aderência, sendo que, quanto maior esses fatores, maior a força aplicada. Em quase todos os modelos de concreto convencional utilizados, o tipo de ruptura foi por fendilhamento, revelando que o confinamento do mesmo não foi adequado e suficiente. Concluíram ainda que, barras de maiores diâmetros e concretos com maior resistência à compressão, são mais resistentes à fadiga.

FRANÇA (2010) realizou ensaios de arrancamento e de barras confinadas, em aços do tipo CA-50 de 6,3 mm; 8,0 mm e 10,0 mm de diâmetro e concretos com resistência à compressão de 25 MPa e 40 MPa. Os resultados obtidos para o coeficiente de conformação superficial das barras estudadas, em geral, ficaram dentro dos valores especificados pela ABNT-NBR 7480 (2007). FRANÇA (2010) observou que o diâmetro das barras e a classe de resistência do concreto influenciam no valor de η . Em geral, aumentando-se esses fatores, o valor do η aumenta. Além disso, concluiu que há um incremento desse coeficiente, com o aumento do diâmetro das barras e da resistência à compressão do concreto.

SILVA (2010) efetuou uma análise comparativa dos ensaios POT e APULOT empregando duas classes de resistência de concreto (28 MPa e 49,9 MPa), e barras de aço CA-50, nervuradas, de diâmetro nominal de 8, 10 e 12.5 mm. Com os resultados obtidos nos ensaios efetuou-se uma regressão linear para determinação da tensão média de aderência aço-concreto.

MELO (2010) realizou ensaios de barras confinadas, em fios de aço lisos CA-60 com diâmetros de 5,0 e 6,0 mm e concreto com resistência à compressão de 40 MPa. Os corpos de prova ensaiados não apresentaram a quantidade mínima de cinco fissuras exigidas pela ABNT-NBR 7477 (1982), não sendo considerados, portanto, os coeficientes de conformação superficial desses fios.

VALE SILVA et al. (2011) estudaram a resistência de aderência em concreto convencional com resistência à compressão de 49,5 MPa e barras de aço com 8,0; 10,0; 12,5 e 16,0 mm de diâmetro. Realizaram modificações no ensaio de arrancamento e analisaram a correlação existente entre resistência última de aderência e resistência à compressão do concreto. Alteraram o CP utilizado no ensaio de arrancamento para uma garrafa PET que, de acordo com os autores, leva a uma diminuição da deformação lateral do CP. O comprimento de ancoragem adotado foi de seis vezes o diâmetro das barras de aço. Para aplicação da força, os autores utilizaram um maçado hidráulico de pistão vazado com capacidade de 600kN, conectado a uma bomba manual de pressão, onde foi aplicada a força. Como o molde utilizado foi o mesmo para todos os diâmetros, avaliaram o grau de confinamento das barras de aço dentro do concreto por meio da relação c/ϕ (cobrimento de concreto/diâmetro da barra de aço). Concluíram que a variação de cobrimento do concreto influencia na correlação entre a resistência última

de aderência e resistência à compressão do concreto, sendo mais evidente em cobrimentos menores. Concluíram, portanto, que os diâmetros das barras de aço e os cobrimentos de concretos possuem efeito significativo na resistência última de aderência.

LIMA et al (2012) empregou o ensaio POT em um concreto convencional (CC) de resistência 34,5 MPa e em um CAA com resíduo de marmoraria possuindo resistência de 35 MPa, além de empregar barras de aço CA-50, nervuradas, de 10 e 16mm. Verificando que a trabalhabilidade do concreto influencia o tipo de ruptura da aderência.

FERREIRA (2012) estudou o comportamento da aderência aço-concreto em aços lisos e entalhados, com diâmetros de 5,0; 6,0; 8,0 e 9,5 mm, e em aços nervurados com diâmetros de 6,3 mm; 8,0 mm e 10,0 mm, utilizando-se concreto com resistência à compressão de 40 MPa. Para tanto, foram realizados ensaios de barras confinadas, ensaios de arrancamento e ensaios de vigas rotuladas. Os resultados para os ensaios de barras confinadas não satisfizeram a norma, apresentando um número de fissuras menor que o estabelecido. Os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento e nos ensaios de vigas rotuladas foram satisfatórios e apresentaram variações coerentes com o apresentado pela literatura, para os fatores de influência analisados. Utilizou a norma francesa B.A.E.L. 91 (1994), para cálculo da resistência de aderência, que foi adaptada e proposta para cálculo do coeficiente de conformação superficial de aços, partindo-se dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento e de vigas rotuladas.

ARAÚJO et al (2013) investigou a influência da adição de fibras metálicas no comportamento da aderência, empregando o ensaio POT, concreto com resistência a compressão 20MPa, barras nervuradas de aço CA-50 de diâmetro 10, 12.5, 16 e 20mm e adição de 1% e 2% de fibras de aço ao concreto, constatando que a adição de 1% de fibras proporciona o incremento de cerca de 9% na tensão de aderência. Acima desse teor de fibras, não houve ganho na aderência.

SILVA et al (2014) avaliou a viabilidade do emprego do ensaio de aderência APULOT para a estimativa da resistência do concreto, visando um complemento do controle de qualidade destes e objetivando encontrar as estimativas de resistência a compressão a partir do ensaio POT, para estabelecer melhores bases para definição do

procedimento padrão do ensaio APULOT. Para tanto, foram utilizadas duas classes de concreto (25MPa e 45MPa), barras nervuradas de aço CA-50 de diâmetro nominal de 8, 10 e 12,5mm. Os resultados obtidos mostram que, sob condições padronizadas de ensaio, a correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão do concreto é satisfatória, em todas as idades ensaiadas, fortalecendo o propósito de consolidar este ensaio como uma alternativa complementar para controle de qualidade do concreto armado.

TUTIKIAN et al (2014) estabeleceu uma análise comparativa entre a armadura sem proteção e o aço galvanizado a quente, por meio do ensaio BT em concretos com resistência à compressão de 25MPa e barras de aço CA-50 nervuradas com diâmetro de 8, 12,5 e 16mm. Ao realizar o ensaio BT, de acordo com o procedimento de RILEM, de 1978, observou-se que não houve perda de aderência significativa em nenhum dos diâmetros, mostrando que a aderência entre o concreto e o aço galvanizado a quente não é inferior à dos aços sem proteção.

DE AVILA JACINTHO et al (2014) analisou a viabilidade do ensaio APULOT, para estimar a resistência compressão axial do concreto com adição de fibras de borracha (resistência de 25MPa) nos percentuais de 10, 15 e 20%, e barras de aço CA-50 de 8mm, comparados a um concreto de referência. A análise da resistência à compressão permitiu concluir que quanto maior a quantidade de borracha adicionada ao concreto, menor foi a tensão última de aderência, e que o ensaio de aderência APULOT é adequado para estimar a resistência à compressão axial do concreto.

TAVARES et al (2014), procurou conhecer o comportamento do fenômeno da aderência aço-concreto através da simulação numérica utilizando o código de cálculo ATENA, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Foram realizadas simulações com concretos com resistência à compressão de 27,8 MPa e 49,3 MPa e barras de aço CA-50 nervuradas de diâmetro de 8.0, 10.0 e 12.5 mm, verificando que a simulação numérica experimental em ambos os casos, e que o aumento do diâmetro da barra resultou em um aumento da tensão do concreto na zona de transição.

MARTINS e JACINTHO (2014), analisaram por meio do ensaio APULOT a aderência entre concretos com resistência de 20, 60 e 80 MPa e barras de aço CA-50 com diâmetro de 8mm, nervuradas. Concluindo ao final dos ensaios que, com exceção

do concreto de 20 MPa, os demais não alcançaram as tensões esperadas, verificando que a curva proposta por LORRAIN e BARBOSA (2008) pode não ser adequada para estimar a relação entre a resistência a compressão axial e a tensão de aderência para concretos da Classe II de resistência.

DORIA et al (2015) avaliou a aderência aço-concreto por meio do ensaio POT nas condições da barra inserida no concreto ainda fresco e quando inserida no concreto endurecido, com ponte de aderência de epóxi, simulando a situação de reposição ou adição de armadura em estruturas de concreto armado com barras de aço CA-50 nervuradas com 8, 12,5 e 20mm de diâmetro, em concretos com resistência de 30 MPa e 35 MPa. Percebeu-se uma perda insignificante na aderência quando se comparou os resultados dos ensaios dos corpos de prova que tiveram a barra de aço inserida no concreto no estado endurecido com ponte de aderência epóxi, com os que tiveram a barra inserida no concreto no estado fresco.

SARTORI et al (2015) descreveu o comportamento da aderência de um concreto leve estrutural com pérolas de EPS (CLEPE), com base no ensaio POT, empregando concretos com resistência a compressão de cerca de 43,18 MPa e barras de aço CA-50 e CA-60 de diâmetros de 5, 6,3, 8,0, 10,0 e 12,5 mm. Os resultados desses ensaios de CLEPE foram comparados com os de um concreto convencional (CC) e com valores baseados nas recomendações da ABNT, verificando que é possível usar o CLEPE em estruturas, no que diz respeito à adequada aderência da armadura do concreto.

ROSALES (2016) buscou obter os parâmetros fundamentais do comportamento da aderência aço-concreto por meio do ensaio POT em um concreto de resistência a compressão de 30MPa e com barras de aço CA-50, nervuradas, de diâmetro de 8, 10 e 12mm. Através dos resultados obtidos no ensaio POT, foi realizada a aplicação dos mesmos em modelos numéricos baseados no Método de Elementos Finitos (MEF) e os resultados do modelo proposto conseguiram representar com aceitável precisão o comportamento real da tensão de aderência.

MACEDO (2016) estudou as condições de aderência aço - concreto para avaliação do comprimento de aderência e da determinação do coeficiente de conformação superficial de aços da categoria CA-60, nervurados. Foram avaliadas barras de 3,4 mm e 4,2 mm, com comprimento de aderência igual a 5 e 10 vezes o diâmetro da barra e

executados os ensaios de arrancamento, para determinação do coeficiente de conformação superficial experimental baseado na norma francesa BAEL-91. Uma das conclusões foi que o comprimento de ancoragem tem grande influência no valor das tensões de aderência, pois o menor comprimento apresentou valores bastante discrepantes e essa diferença acentua-se para as barras de menor diâmetro. O uso de comprimentos de ancoragem de 10Φ resultou em resultados mais uniformes, estatisticamente mais confiáveis do que aqueles realizados com 5Φ .

KWAN (2018) fez uma análise de elementos finitos revelando a variação na distribuição de tensão dentro do bloco de concreto devido à pressão de contato desigual e ao atrito entre a superfície do bloco de concreto e da placa de aço da máquina de ensaio. Para minimizar os erros nos ensaios devidos tanto à pressão de contato desigual e ao atrito, a configuração dos ensaios foi redesenhada para se inserir uma placa de borracha e um filme plástico de PTFE na interface entre o bloco de concreto e a prensa da máquina de ensaio. Foi descoberto que o novo ensaio produziu resultados de menor rigidez da ligação. Este método de ensaio melhorado pode fornecer propriedades de ligações mais precisas para análise e estrutural e dimensionamento.

1.5. Prescrições normativas da tensão de aderência

A tensão de aderência pode ser obtida através de prescrições normativas e também a partir de algumas premissas consideradas por autores dentre eles MONTROYA et al (1974). Considera-se relevante descrever os métodos normativos, prescritos na ABNT NBR 6118 (2014), e experimentais adotados por alguns autores encontrados na literatura para se obter a tensão de aderência.

1.5.1. Norma brasileira ABNT NBR 6118 2014

Os valores de cálculo das resistências de aderência, consideradas em projeto, entre a armadura e o concreto na ancoragem de armaduras passivas, deve ser obtida a partir da equação 2-5.

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad \text{Equação 1-5}$$

Onde:

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

$$\eta_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{parabarras lisas} \\ 1,4 & \text{parabarras entalhadas} \\ 2,25 & \text{parabarras nervuradas} \end{cases}$$

$$\eta_2 = \begin{cases} 1,0 & \text{para situações de boa aderência} \\ 0,7 & \text{para situações de má aderência} \end{cases}$$

$$\eta_3 = \begin{cases} 1,0 & \text{para } \phi < 32,0 \text{ mm} \\ \frac{132 - \phi}{100} & \text{para } \phi > 32,0 \text{ mm} \end{cases}$$

Os valores para o coeficiente η_1 são relacionados com o coeficiente de conformação superficial, η_b mínimo, retirados da ABNT NBR 7480 (1996) na ABNT NBR 6118 (2014), conforme apresentado na tabela 4. Esse último é obtido por meio do ensaio de conformação superficial de barras, de acordo com a ABNT NBR 7477 (1982).

Tabela 3 - Relação entre η_b e η_1 de acordo com a ABNT NBR 7480 (1996) - ABNT NBR 6118 (2014)

Coeficiente de conformação superficial da ABNT NBR 7480:1996		
Tipo de barra	η_b ($\phi \geq 10,0 \text{ mm}$)	η_1
Lisa (CA-25)	1,0	1,0
Entalhada (CA-60)	1,2	1,4
Alta aderência (CA-50)	$\geq 1,5$	2,25

A nova ABNT NBR 7480, publicada em 2007, apresentou novidades concernentes aos diâmetros inferiores a 10 mm, reconhecendo existir lacunas técnicas quando ao conhecimento da conformação superficial η_b das barras e fios com esses diâmetros.

Tabela 4 - Coeficiente de conformação superficial - ABNT NBR 7480 (2007)

Coeficiente de conformação superficial da ABNT NBR 7480:2007		
CATEGORIAS	η	
	$\phi < 10,0 \text{ mm}$	$\phi \geq 10,0 \text{ mm}$
CA-25	1,0	1,0
CA-60	1,0	1,5
CA-50	1,0	1,5

1.5.2. Norma francesa BAEL-91

De acordo com a literatura corrente, observou-se que a norma brasileira NBR 6118 e a norma francesa BAEL-91 (1994) apresentam formulações para o cálculo da resistência de aderência que fornecem valores finais de projeto muito próximos. Segundo a NBR 6118, a resistência de cálculo da aderência aço-concreto para o concreto armado por ser determinada por equações simples.

A norma francesa preconiza que a resistência de aderência, $\bar{\tau}_s$, pode ser determinada utilizando-se a seguinte expressão:

$$\bar{\tau}_s = 0,6\psi_s^2 f_{tj} \quad \text{Equação 1-6}$$

Onde:

$f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{ck}$ é a resistência média estimada do concreto à tração

ψ_s = parâmetro experimental, adimensional, que associa a aderência aço-concreto com a rugosidade das barras ou fios, da seguinte forma:

- $\psi_s = 1$ para barras ou fios lisos;
- $\psi_s = 1,5$ para barras ou fios de alta aderência.

Com base nesta norma francesa, a tensão de aderência de projeto está diretamente relacionada com valores normativos do coeficiente de aderência ψ_s , e da resistência do concreto à tração f_{tj} .

1.6. Influência do diâmetro das barras e fios de aço na resistência de aderência

Embora o efeito do diâmetro ainda não seja considerado como um parâmetro importante para o cálculo da resistência de aderência de barras finas, ressalta-se que alguns autores têm investigado a influência desse parâmetro na resistência de aderência das peças de concreto armado (DUCATTI (1993), FERNANDES (2000), BARBOSA (2001), ALMEIDA FILHO (2006) e FRANÇA (2010)).

1.6.1. CEB

O CEB (1970) e MONTOYA et al. (1974) apresentaram as equações 2-7 e 2-8 para o cálculo da resistência de aderência média (τ_m) e máxima (τ_{max}), em função do diâmetro das barras:

$$\tau_m \geq (80 - 1,2\phi) \quad \text{Equação 1-7}$$

$$\tau_{max} \geq (130 - 1,9\phi) \quad \text{Equação 1-8}$$

Sendo o ϕ o diâmetro da barra utilizada, dado em milímetros.

1.6.2. Norma espanhola UNE 36740 (1998)

Na norma espanhola UNE 36740 (1998) é descrito o ensaio de viga, idêntico ao ensaio de viga RILEM CEB FIP, que tem como finalidade determinar a aderência aço-concreto. Na norma, recomenda-se que o valor da tensão de aderência média (τ_m) e da tensão de aderência na ruptura (τ_u) em MPa, função do diâmetro da barra em mm, seja verificado dentro dos limites apresentados:

$$\tau_m \geq \begin{cases} 6,88 \text{ para } \phi < 8 \\ 7,84 - 0,12\phi \text{ para } 8 \leq \phi \leq 32 \\ 4,00 \text{ para } \phi > 32 \end{cases} \quad \text{Equação 1-9}$$

$$\tau_r \geq \begin{cases} 11,22 \text{ para } \phi < 8 \\ 12,74 - 0,19\phi \text{ para } 8 \leq \phi \leq 32 \\ 6,66 \text{ para } \phi > 32 \end{cases} \quad \text{Equação 1-10}$$

1.7. Alternativa para a determinação experimental do coeficiente de aderência

Diante da relação histórica entre os coeficientes η_1 da NBR-6118, oriunda do CEB-90, e ψ_s da equação da BAEL-91, pelo mesmo motivo, percebe-se que o parâmetro ψ_s desta última, poderia ser utilizado para a avaliação experimental da conformação superficial das barras finas, com diâmetro inferior a 10,0 mm, em substituição do cálculo do parâmetro η_b da NBR 7477 (1982). Basta que se obtenha experimentalmente o valor da tensão de aderência de um determinado aço, bem como o valor da resistência à tração do mesmo concreto moldado para a confecção dos corpos de provas, ambos ensaiados no mesmo dia, com controle estatístico normalizado.

Obtendo-se experimentalmente as tensões de aderência e de tração do concreto, a equação definida pela norma francesa, de maneira inversa, pode servir para a determinação ou verificação do valor do coeficiente de aderência ψ_s . Ou seja, aquela

norma francesa pode ser ajustada para a obtenção indireta do coeficiente de aderência η_s ou ψ_s , da seguinte forma:

$$\eta_{s(ensaio)} \approx \psi_{s(ensaio)} = \sqrt{\frac{\bar{\tau}_{s(ensaio)}}{0,6f_{tj(ensaio)}}} \quad \text{Equação 1-11}$$

Onde:

$\eta_{(e)}$ = coeficiente de conformação superficial experimental para $\phi < 10,0$ mm para atender à norma NBR-7480;

$\psi_{s(e)}$ = coeficiente de aderência experimental das barras de aço, cujo quadrado teria uma correspondência direta com o coeficiente η_1 da NBR-6118;

$\bar{\tau}_{s(Me)}$ = valor médio da tensão de aderência máxima obtido no ensaio de arrancamento;

$f_{ctm(e)}$ = valor médio da resistência do concreto à tração obtido no ensaio de compressão diametral, no mesmo dia do ensaio de arrancamento.

Para avaliar o procedimento proposto acima, CUNHA et al (2012) calculou valores de $\psi_{s(e)}$ para as barras de aço tipo CA-50 E CA-60, utilizando-se os resultados dos ensaios de arrancamento apresentado nas tabelas 5 a 7:

a) Valores encontrados para as barras lisas, CA-60

Tabela 5 - Valores dos coeficientes de conformação superficial das barras lisas, calculados de acordo com a formulação da norma francesa BAEL 91.

Diâmetro Φ (mm)	f_{ctm} (MPa)	τ (Mpa)	Ψ_s -CA-60-Liso
5,0	3,34	1,14	0,75
6,0	2,89	2,02	1,08
8,0	3,32	1,44	0,85
9,5	3,05	2,19	1,09
Valores médios	3,15	1,70	0,94
τ =tensão de aderência obtida no ensaio de arrancamento e f_{ctm} = resistência media do concreto à tração, obtida no ensaio de compressão diametral			

Fonte: CUNHA, J.C. et al, 2012.

Observa-se que os resultados obtidos são inferiores ou iguais à unidade. E que os valores inferiores a 1 apresentam valores baixos de aderência e os maiores valores da resistência à tração, o que na equação da norma francesa resulta em menores valores do coeficiente de aderência.

b) Valores encontrados para as barras nervuradas, CA-50

Tabela 6 - Valores dos coeficientes de conformação superficial das barras nervuradas, CA-50, calculados de acordo com a formulação da norma francesa BAEL 91.

Diâmetro Φ (mm)	f_{ctm} (MPa)	τ (Mpa)	Ψ_s -CA-50-Nervurado
6,3	3,07	12,42	2,6
8,0	3,19	11,24	2,42
10,0	2,96	9,89	2,36
Valores médios	3,07	11,18	2,46
τ = tensão de aderência obtida no ensaio de arrancamento e f_{ctm} = resistência média do concreto à tração, obtida no ensaio de compressão diametral			

Fonte: CUNHA, J.C. et al, 2012.

Analisando-se o parâmetro de conformação superficial das barras finas tipo CA-50, pode-se considerar um valor $\psi_{s(e)-CA-50} = 2,46$. Como foi adotado o critério de que $\psi_s \approx \eta_b$, ou seja, o coeficiente de conformação superficial da norma francesa, ψ_s , é equivalente ao da norma brasileira NBR-7480 (2007), η_b , conclui-se que as barras deste aço apresentam um desempenho de aderência melhor do que o considerado na NBR-7480 (2007), em que é exigido que o coeficiente de conformação superficial seja $\eta_b > 1,5$.

c) Valores encontrados para as barras nervuradas, CA-60

Tabela 7 - Valores dos coeficientes de conformação superficial das barras nervuradas, CA-60, calculados de acordo com a formulação da norma francesa BAEL 91.

Diâmetro Φ (mm)	f_{ctm} (MPa)	τ (Mpa)	Ψ_s -CA-60-nervuradas
5,0	2,96	5,17	1,71

6,0	2,79	6,24	1,93
8,0	3,01	3,98	1,48
9,5	3,14	2,48	1,15
Valores médios	2,98	4,47	1,57
τ =tensão de aderência obtida no ensaio de arrancamento e f_{ctm} = resistência média do concreto à tração, obtida no ensaio de compressão diametral			

Fonte: CUNHA, J.C. et al, 2012.

Analisando-se o parâmetro de conformação superficial das barras finas tipo CA-60, pode-se considerar um $\psi_{s(médio)} = 1,57$. Como foi adotado o critério de que $\psi_s = \eta$, conclui-se que as barras apresentaram um desempenho de aderência melhor do que o considerado na NBR-7480 (2007) ($\eta > 1,0$).

Confirmando o que tem ocorrido em diversos laboratórios técnicos no Brasil, observou-se nos vários ensaios realizados pelos pesquisadores do CEFET-MG por CUNHA et al (2012), visando a determinar o coeficiente de conformação superficial η para barras e fios com o diâmetro inferior a 10,0mm, sobretudo para os aços CA-60 nervurados ou lisos, que os procedimentos preconizados pela NBR-7477 (1982) não são atendidos. Ou seja, não foi possível obter o número mínimo de 5 fissuras exigidos para o cálculo do coeficiente de conformação η . Desta forma não é possível atender ao que exige a NBR-7480 (2007), quando estabelece que tais valores ensaiados conforme a NBR-7477 (1982), norma de ensaios para a determinação da conformação superficial das barras, devem atender a um mínimo estabelecido de $\eta=1$.

Por outro lado, verificou-se que apesar dessa constatação os vergalhões denominados nervurados, do tipo CA-50 e CA-60 destinados ao concreto armado no Brasil, apresentam boas condições de aderência, sobretudo quando são submetidos a ensaios de arrancamento direto. Constatou-se também que esses aços possuem capacidade aderente superior, quando comparados aos resultados de aderência obtidos em barras lisas da categoria CA-60. Ou seja, os valores da tensão resistente de aderência aço-concreto medidos nos ensaios Pull-Out Test, para os tipos de aços analisados, mostraram ser suficientemente superiores aos valores encontrados nos mesmos ensaios para aços lisos da categoria CA-60.

Mediante essa constatação, a de que ao serem ensaiados pelos métodos baseados nos procedimentos internacionalmente aceitos da RILEM, os aços CA-60 ou CA-50, nervurados, apresentam valores relativos superiores e suficientes aos aços lisos, buscou-se um procedimento de ensaio que apresentasse resultados coerentes que pudessem comprovar a eficiência aderente desses aços para atender ao que determina a NBR-7480 (2007). Isto porque esta norma exige que os valores dos coeficientes de aderência η sejam determinados conforme os ensaios da NBR-7477 (1982), com resultados de aderência $\eta = 1$ para barras com diâmetro inferior a 10,0 mm. Mas como tal valor não pode ser medido por essa norma para aço de diâmetro < 10 mm, a solução encontrada é a de sugerir uma mudança na NBR-7477 (1982) em que a determinação do coeficiente de aderência ou de conformação superficial fosse feita a partir do ensaio de tração direta.

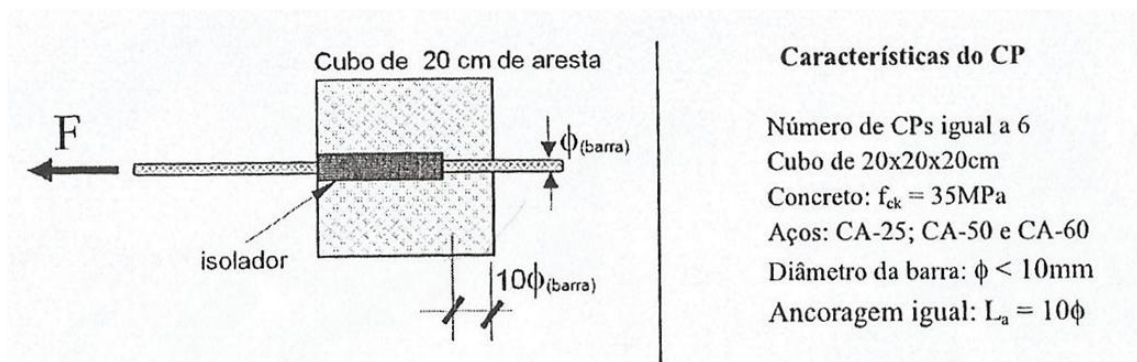
1.7.1. Escolha do método de ensaio da tensão de aderência, da amostragem e das dimensões dos corpos de prova

Tendo em vista que a norma NBR-7477 (1982) não se mostrou eficiente para a determinação do coeficiente de aderência ou de conformação superficial η para barras finas, sobretudo da categoria CA-60, ainda que tais barras tenham boa capacidade aderente comprovada por outras metodologias de ensaios, sugere-se que a mesma seja modificada de modo a separar os procedimentos para bitolas superiores e inferiores a 10,0 mm. No caso das barras com diâmetro superior ou igual a 10,0 mm, os procedimentos se manteriam como estão nesta norma, com base nas medidas de um número mínimo de fissuras e de seus espaçamentos relativos. Isto porque não há dificuldades em atender ao que preconiza a NBR-7480 (2007), para os valores de η .

Para bitolas inferiores a 10,0 mm, para todas as categorias de aço, este coeficiente seria calculado através de procedimentos complementares ao ensaio de arrancamento, semelhante ao ensaio de arrancamento “Pull-Out”, a partir da determinação da resistência de aderência aplicando-se o método RILEM, modificado apenas na consideração do comprimento de aderência. Este método foi escolhido no lugar do ensaio de Vigas Rotuladas também experimentado pela pesquisa do CEFET-MG, tendo em vista sua facilidade operacional e simplicidade. Entretanto, a recomendação implica

no emprego de um comprimento de aderência no ensaio igual a 10ϕ para reduzir a dispersão dos valores medidos e da variância no controle estatístico dos resultados, observados quando se utiliza o comprimento de aderência igual a 5ϕ do método RILEM convencional. A figura 28 apresenta os principais dados referentes ao do corpo de provas proposto para o ensaio de arrancamento chamado de Método RILEM Modificado.

Figura 18 - Corpo de provas de concreto proposto para o ensaio de arrancamento de barras finas com diâmetro inferior a 10 mm, chamado de Método RILEM Modificado.



Fonte: CUNHA, J.C. et al, 2012.

1.7.2. Descrição sucinta do Método RILEM Modificado

O controle das características do concreto à compressão e à tração indireta deve atender, respectivamente, às normas ABNT NBR 5739 e ABNT NBR7222, com as seguintes informações complementares:

- Brita zero
- Slump de 10mm
- Fator $a/c < 0,5$

O ensaio deve ser realizado aos 28 dias, ou mesmo aos 21 dias se o valor da resistência média à compressão superar o previsto e permitir o controle para a obtenção da resistência característica $f_{ck} = 35\text{MPa}$. No dia dos ensaios de arrancamento, deverão ser também realizados os ensaios de resistência à compressão e à tração do concreto.

O cálculo do coeficiente de aderência ou de conformação superficial experimental deverá ser feito com base na equação 2-11:

1.7.3. Verificação dos resultados e controle da conformação superficial

Calculado o coeficiente $\eta_{(e)}$, para cada um dado diâmetro ensaiado pelo Método RILEM Modificado, o controle deve ser feito da seguinte forma:

$\eta_{(e)} \geq 1$ para atender à NBR-7480, e

$(\eta_{(e)})^2 \geq \eta_1$ para atender à NBR-6118, nas seguintes condições:

$\eta_1=1,0$ para aços lisos, CA-25;

$\eta_1=1,4$ para aços entalhados, CA-60;

$\eta_1=2,25$ para aços nervurados, CA-50.

Essa verificação deve ser feita para cada diâmetro de modo a atender ao que preconizam as normas NBR7480 (2007) e NBR6118 (2014), sem a necessidade de se modificar nenhuma destas normas. Os resultados obtidos pelas pesquisas realizadas no CEFET-MG, sob controle técnico normalizado para esse tipo de ensaio, demonstraram que os aços nacionais ensaiados possuem características aderentes suficientes para atender ao que exige a norma de projetos de estruturas de concreto com a devida segurança. Ou seja, além disso, que tais características podem ser medidas com um ensaio que mede diretamente a capacidade aderente aço-concreto, cujos resultados são mais próximos do comportamento das barras de aço nas estruturas.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios para caracterização dos materiais, das propriedades mecânicas do concreto e os ensaios de aderências foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, no Rio de Janeiro – RJ. Neste capítulo, descrevem-se os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais que compõem os concretos em estudo e também as barras de aço utilizadas.

2.1. Caracterização dos materiais

2.1.1. Agregado miúdo

Na fabricação do concreto utilizado, utilizou-se areia natural lavada que foi caracterizada com base nas normas vigentes (NBR – 7217; NBR/NM – 52; NBR – 7810; NBR – 9776; NBR -7218; NBR/NM – 49) e apresentou os seguintes resultados na tabela 8:

Tabela 8 - Características físicas da areia

PENEIRAS		% Retida Média	% Retida Acumulada
n°	mm		
3/8"	9,5	0,00%	0,00%
1/4"	6,3	0,27%	0,27%
4	4,8	0,91%	1,18%
8	2,4	6,19%	7,37%
16	1,2	20,12%	27,50%
30	0,6	35,14%	62,64%
50	0,3	26,70%	89,34%
100	0,15	8,69%	98,02%
Fundo	<0,15	1,98%	100,00%
Módulo de finura			2,84
Dimensão máxima característica (mm)			4,8
Massa específica (g/cm ³)			2,56
Teor de umidade (%)			3,54
Massa unitária (g/cm ³)			1,45

2.1.2. Agregado graúdo

Como agregado graúdo, empregou-se a brita tipo 0 que foi caracterizada conforme as normas vigentes (NBR – 7217; NBR – 7810; NBR – 9937; NBR – 7218; NBR/NM – 49), apresentado na tabela 9;

Tabela 9 - Características físicas da brita 0

PENEIRAS		% Retida Média	% Retida Acumulada
n°	mm		
3/8"	9,5	11,75%	11,75%
1/4"	6,3	45,67%	57,42%
4	4,8	24,50%	81,91%
8	2,4	12,61%	94,52%
16	1,2	1,53%	96,05%
30	0,6	0,87%	96,93%
50	0,3	0,76%	97,68%
100	0,2	0,76%	98,45%
Fundo	0	1,55%	100,00%
Módulo de finura			3,03
Dimensão máxima característica (mm)			9,5
Massa específica (g/cm ³)			2,69
Teor de umidade (%)			0,17
Massa unitária (g/cm ³)			1,32

2.1.3. Cimento

Na dosagem do concreto foi utilizado o cimento Mauá CII F-32.

2.1.4. Água

A água utilizada para amassamento da mistura foi água potável da rede de abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro – RJ.

2.2. Dosagem do concreto

A dosagem dos materiais foi realizada segundo o método descrito pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) adaptado do método da ACI (American Concrete Institute), para agregados brasileiros. Foi utilizada a resistência à compressão de 40 MPa. O consumo de materiais por metro cúbico de concreto e o traço em massa está resumido na tabela 10.

Tabela 10 – Traço para o concreto

Material para 1m ³ (kg)		Unit. (kg)	1 saco de cimento (kg)	Volume (L)	Corrigido
Cimento	511	1,00	50,00	50,00	50,00
Areia	710	1,39	69,47	48,00	62,00
Brita 0	831	1,63	82,00	2,00	57,00
Água	230	0,45	23,00	22,60	22,60

2.3. Caracterização mecânica do concreto

Foram determinados a resistência à tração, resistência à compressão e módulo de deformação, seguindo os procedimentos estabelecidos pelas normas NBR 5739, NBR 7222 e NBR 8522 respectivamente. Na tabela 11 pode-se avaliar os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Figura 29 - Teste de abatimento "slump test"



Tabela 11 - Resultados obtidos dos ensaios de caracterização do concreto, aos 28 dias

Diâmetro do aço do CP (mm)	Tipo do aço	Resistencia (MPa)		
		f_{cm}	f_{ctm}	Slump (cm)
3.4	CA-60 liso	41,82	4,14	11,00
4.2		41,82	4,14	11,00
3,4	CA-60 nervurado	42,3	3,98	10,80
4,2		41,4	4,73	9,30
6		42,3	3,98	10,80
9,5		41,4	4,73	9,30
6,3	CA-50 nervurado	39,73	3,9	9,70
10		39,73	3,9	9,70
20		40,17	4,25	10,40
25		40,85	3,83	10,70
32		40,17	4,25	10,40

2.4.Armaduras

Utilizaram-se, nesta pesquisa, os seguintes diâmetros de aço apresentados na tabela 12, com seção circular das classes CA-50 e CA-60.

Tabela 12 - Barras de aço empregadas no programa experimental

Barras (mm)	Categoria
3,4	CA-60 Lisa
4,2	
3,4	CA-60 Nervurada
4,2	
6	
9,5	
6,3	CA-50 Nervurada
10	
20	
25	
32	

2.4.1. Caracterização das barras de aço

Os ensaios para caracterização do aço obedeceram à norma NBR 7480 (2007), a qual fixa as condições exigíveis na encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Os resultados obtidos estão ilustrados na tabela 13.

A NBR 7480 2007 estabelece, em relação à conformação geométrica, que:

Para barras CA-50:

- As barras são obrigatoriamente providas de nervuras transversais oblíquas;
- O eixo das nervuras transversais oblíquas devem formar, com a direção do eixo da barra, um ângulo entre 45° e 75°
- As barras devem ter pelo menos duas nervuras longitudinais contínuas e diametralmente opostas que impeçam o giro da barra dentro do concreto, exceto no caso em que as nervuras transversais estejam dispostas de forma a se oporem a esse giro;
- Para diâmetros nominais maiores ou iguais a 10,0 mm, a altura média das nervuras transversais ou oblíquas deve ser igual ou superior a 4% do diâmetro nominal e para diâmetros nominais inferiores a 10,0 mm, igual ou superior a 2% do diâmetro nominal.
- O espaçamento médio das nervuras transversais ou oblíquas, medido ao longo de uma mesma geratriz, deve estar entre 50% e 80% do diâmetro nominal;
- A projeção das nervuras transversais oblíquas na seção transversal deve abranger pelo menos 85% do perímetro nominal da seção transversal da barra.

Para barras CA-60:

- Os fios podem ser lisos, entalhados ou nervurados, observando-se o atendimento ao coeficiente de conformação superficial mínimo;
- Os fios de diâmetro nominal igual a 10,0 mm devem ter obrigatoriamente entalhes ou nervuras;

- Os valores de coeficiente de conformação superficial para cada diâmetro são determinados através de ensaios em laboratório, conforme a NBR 7477.

Para se obterem dados precisos a respeito do material, foram realizados ensaios referentes à conformação geométrica das barras em estudo. O ângulo de inclinação das nervuras foi determinado através de uma série de dez leituras de cada lado da barra e para cada diâmetro, obtendo o valor médio.

Tabela 13 - Caracterização das barras de aço estudadas

Φ (mm)	Tipo do aço	β°	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)
3,4	CA-60 Lisa	-	719,66	834,66	9,40
4,2		-	682,66	794,00	9,00
3,4	CA-60 Nervurada	55	520,36	801,27	8,62
4,2		56	665,93	795,16	10,46
6		52	714,59	759,62	7,73
9,5		53	793,56	856,91	7,86
6,3	CA-50 Nervurada	56	722,98	922,35	15,16
10		59	620,38	738,64	15,00
20		57	618,47	750,80	9,00
25		53	612,40	725,80	10,43
32		54	596,97	740,94	11,35

2.4.2. Área relativa de nervuras

As barras de aço foram avaliadas para obter o valor da área relativa de nervuras (f_r), que foi calculada através das duas formulações propostas no item 2.2.6. A primeira formulação apresentada na equação 2-2 é recomendada pelo LNEC e a segunda formulação está apresentada na equação 2-3 e é recomendada pelo CEB (1999).

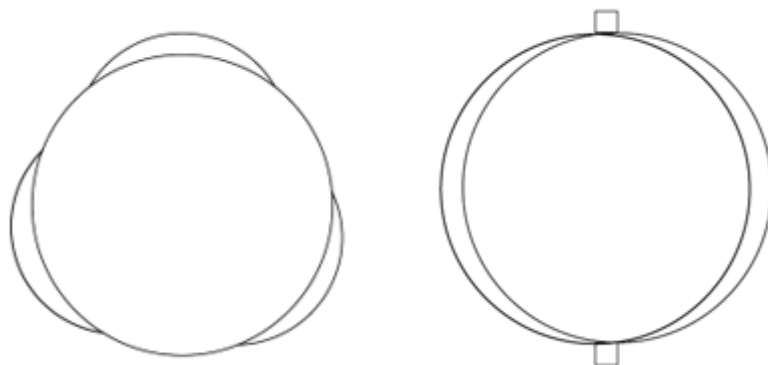
Tabela 14 - Características das barras de aço para o cálculo da área relativa de nervuras

ϕ (mm)	Tipo do aço	Altura da nervura (cm)	Distância entre nervuras (cm)	Perímetro da barra sem nervuras transversais (%)
3,4	CA-60 Lisa			-
4,2		-	-	-
3,4	CA-60 Nervurada	0,01	0,37	39,80
4,2		0,02	0,42	33,67
6		0,05	0,47	36,83
9,5		0,08	0,68	28,34
6,3	CA-50 Nervurada	0,04	0,40	0
10		0,08	0,61	0
20		0,11	0,98	0
25		0,21	1,46	0
32		0,27	2,15	0

As equações propostas consideram características da superfície da barra como a altura das nervuras e a distância entre as nervuras. A formulação proposta pelo LNEC, considera também a abrangência das nervuras no perímetro da barra. Tais características estão expostas na tabela 14.

Na figura 30, podemos observar a principal diferença entre a configuração geométrica da barra CA-50 para a barra CA-60. A barra CA-60 não apresenta nervura longitudinal e apresenta três espaços sem nervura no perímetro da barra.

Figura 20 - Disposição das nervuras para barras CA-60 e barras CA 50



A NBR 7480 (2007), no item 4.2.1.6, recomenda que, para barras de aço CA-50, a projeção das nervuras transversais oblíquas na seção transversal deva abranger pelo menos 85% do perímetro nominal da seção transversal da barra. Porém, não define valores de referência para barras CA-60.

A tabela 15 apresenta os valores calculados para a área relativa de nervura segundo o CEB (1999) e o EUROCODE 2 (1993), onde verifica-se que os aços estudados são considerados, segundo a normalização, como sendo de alta aderência, visto que satisfazem o valor mínimo requerido.

Tabela 15 - Valores obtidos para área relativa da nervura (f_r)

ϕ (mm)	Tipo do aço	Área relativa de nervura (CEB)	Área relativa de nervura (LNEC)	Valores mínimos, segundo CEB
3,4	CA-60 Lisa	-	-	-
4,2		-	-	-
3,4	CA-60 Nervurada	0,011	0,009	-
4,2		0,018	0,016	-
6		0,053	0,045	0,039
9,5		0,059	0,056	0,052
6,3	CA-50 Nervurada	0,050	0,067	0,045
10		0,067	0,090	0,052
20		0,056	0,075	0,056
25		0,072	0,096	0,056
32		0,063	0,084	0,056

Observa-se também que ao considerar a abrangência da projeção das nervuras transversais no perímetro da barra, as barras CA-50 apresentam área relativa de nervura maior que os aços CA-60.

2.5. Ensaio “Pull-out-test”

O ensaio de arrancamento foi realizado no Laboratório da Faculdade de Engenharia da UERJ.

Utilizaram-se transdutores de 10 mm de leitura.

Figura 21- Aparelho de medição digital

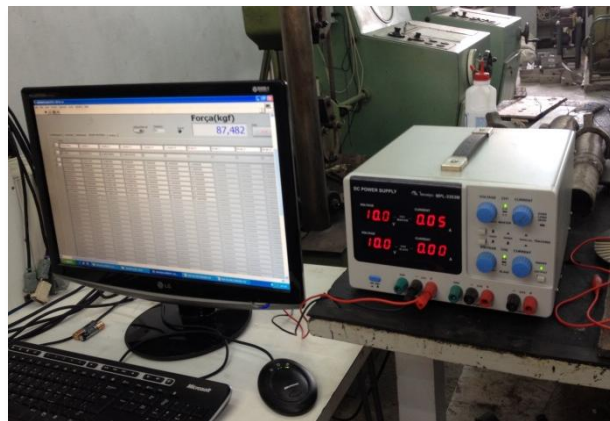
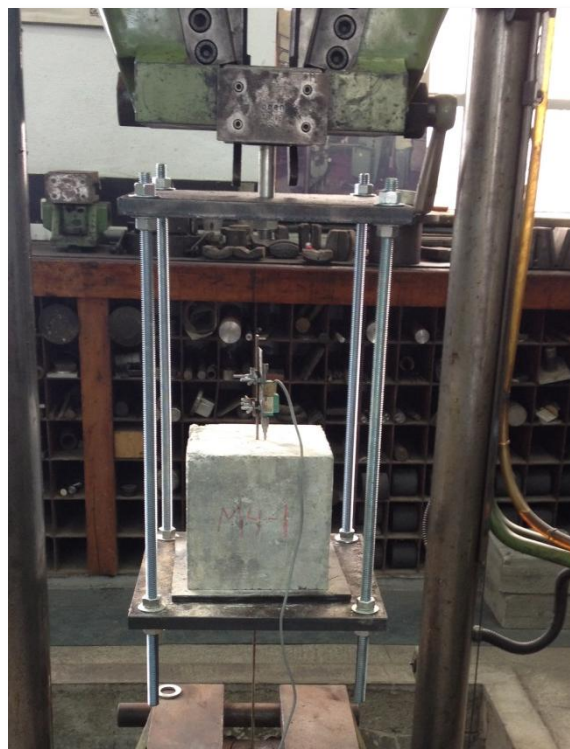


Figura 22 - Corpo de prova posicionado na gaiola para o ensaio de aderência



3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

3.1. Coeficiente de variação da amostra

Para realizar uma análise preliminar dos resultados obtidos nos ensaios utilizou-se a ferramenta estatística que mede a variabilidade das observações. O coeficiente de variação (CV) fornece a percentagem de variação dos dados de uma amostra. Esta análise é interessante quando se quer comparar as variabilidades de várias amostras com médias diferentes.

Para se calcular o coeficiente de variação é necessário obter o desvio padrão e a média da amostra a ser analisada. Para o cálculo do coeficiente de variação utilizou-se a equação 4-1.

$$CV = \frac{\text{desvio padrão}}{\text{média}} \cdot 100 \quad \text{Equação 3-1}$$

Para que os valores obtidos em uma mesma amostra sejam aceitáveis o valor do coeficiente de variação têm que ser menor que 25 %. Valores acima deste patamar indicam que a qualidade da amostra é considerada duvidosa. Quando se tem um CV acima de 25% é necessário que se aumente o número de amostras.

3.2. Cálculo da tensão de aderência

Os valores obtidos nos ensaios de arrancamento estão apresentados em gráficos e tabelas. Nessas tabelas são apresentados os valores das tensões medias e máximas, obtidos em função do deslizamento Δ (delta) medido em cada caso.

A tensão de aderência é calculada em função da carga aplicada (em Kgf) e da área de contato aderente da barra de aço e é determinada através da equação 4-2:

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot \phi \cdot La}$$

Equação 3-2

$$\text{Sendo } La = \begin{cases} 10\phi \text{ para barras } \leq 10,0 \text{ mm} \\ 5\phi \text{ para barras } > 10,0 \text{ mm} \end{cases}$$

Onde:

 τ = tensão de aderência; ϕ = diâmetro da barra; P = carga aplicada (Kgf); La = comprimento de ancoragem

3.1. Cálculo da tensão média de aderência

Para avaliação dos valores encontrados, autores espanhóis, dentre eles, H. MONTOYA (1974), sugerem que se devem avaliar as tensões de aderência medidas em ensaios do tipo aderência por flexão, em vigas articuladas, definindo-se uma tensão média (τ_m), função das tensões medidas para deslizamentos padronizados iguais a 0,01, 0,1 e 1,0 mm, respectivamente $\tau_{(\Delta=0,01)}$, $\tau_{(\Delta=0,1)}$ e $\tau_{(\Delta=1)}$, da seguinte forma segundo a equação 4-3:

$$\tau_m = (\tau_{(\Delta=0,01)} + \tau_{(\Delta=0,1)} + \tau_{(\Delta=1)})/3$$

Equação 3-3

Este mesmo autor recomenda que se deva também levar em conta o valor da tensão máxima ou de ruptura de aderência que, segundo ele, ocorreria para deslizamentos próximos a 3 mm. No presente estudo, a maioria dos valores de tensões máximas ou de ruptura ocorreu para valores de deslizamento próximos a 1,5 mm.

As tabelas 17 a 27 apresentam os valores da tensão de aderência, obtidos experimentalmente no ensaio de arrancamento, sendo esta a média dos seis corpos de prova.

Encontram-se no anexo A todos os resultados obtidos.

3.2. Modo de ruptura

Durante a execução dos ensaios, para os corpos de prova referentes as barras de aço acima de 16,0 mm (20,0 mm, 25,0 mm e 32,0 mm), a ruptura da aderência ocorreu pelo fendilhamento, conforme ilustrado na figura 33. A tabela 16 ilustra os tipos de ruptura de cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 16 - Tipo de ruptura dos corpos de prova empregados no ensaio de arrancamento

ϕ barra (mm)	Tipo de aço	f_c 40 Mpa
3.4	CA60-Liso	Deslizamento
4.2		Deslizamento
3.4	CA60-Nervurado	Deslizamento
4.2		Deslizamento
6.0		Deslizamento
9.5		Deslizamento
6.3	CA50-Nervurado	Deslizamento
10.0		Deslizamento
20.0		Fendilhamento
25.0		Fendilhamento
32.0		Fendilhamento

Figura 33 - Fendilhamento do concreto



A ruptura por fendilhamento é característica de corpos de prova ou que não possuem dimensões adequadas para suportar as tensões geradas durante a execução do ensaio e/ou oriunda da fragilidade do material.

3.3. Resultados experimentais

a) Para aços CA-60 lisos

Tabela 17– Ensaio de arrancamento – barra Φ 3,4 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 - 3,4 mm - CA-60 lisa					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	1,10	1,38	1,68	1,39	1,74
CP-2	0,14	0,41	2,09	0,88	2,15
CP-3	0,99	1,05	1,13	1,06	1,24
CP-4	0,14	1,10	2,20	1,15	2,48
CP-5	1,08	1,73	2,12	1,64	2,19
CP-6	1,18	1,53	2,37	1,69	2,62
τ média	0,77	1,20	1,93	1,30	2,07
Desvio Padrão	0,50	0,46	0,45	0,33	0,51
CV(%)	64,15	38,56	23,53	25,23	24,55

Tabela 18– Ensaio de arrancamento – barra Φ 4,2 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 - 4,2 mm - CA-60 lisa					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	0,72	0,90	0,99	0,87	1,12
CP-2	0,70	0,27	1,05	0,67	1,05
CP-3	0,22	0,22	1,17	0,54	1,44
CP-4	0,81	1,17	1,26	1,08	1,26
CP-5	0,27	0,63	1,21	0,70	1,32
CP-6	0,45	0,60	1,08	0,71	1,08
τ média	0,53	0,63	1,13	0,76	1,21
Desvio Padrão	0,25	0,37	0,10	0,19	0,16
CV(%)	47,66	57,97	9,21	24,89	12,79

b) Para aços CA-60 nervurados

Tabela 19– Ensaio de arrancamento – barra Φ 3,4 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 - 3,4 mm - CA-60 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	3,53	4,32	6,48	4,78	6,48
CP-2	2,44	5,12	7,23	4,93	7,29
CP-3	2,47	3,26	4,83	3,52	6,63
CP-4					
CP-5	3,47	3,49	4,69	3,88	4,69
CP-6					
τ média	2,98	4,05	5,80	4,28	6,27
Desvio Padrão	0,60	0,85	1,25	0,68	1,12
CV(%)	20,28	20,96	21,53	15,99	17,78

Tabela 20– Ensaio de arrancamento – barra Φ 4,2 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 - 4,2 mm - CA-60 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	3,24	3,36	3,63	3,41	3,63
CP-2	3,50	3,56	3,91	3,66	3,91
CP-3	0,89	2,40	4,11	2,46	4,14
CP-4	1,96	2,13	2,77	2,29	3,22
CP-5	1,89	2,20	3,76	2,61	3,76
CP-6	2,29	2,73	3,63	2,89	3,73
τ média	1,07	0,68	0,52	0,61	0,35
Desvio Padrão	46,75	24,84	14,20	21,08	9,26
CV(%)	3,24	3,36	3,63	3,41	3,63

Tabela 21– Ensaio de arrancamento – barra Φ 6,0 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 - 6,0 mm - CA-60 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	2,43	3,95	5,56	3,98	5,70
CP-2	2,24	3,21	5,58	3,68	5,83
CP-3	3,08	3,40	4,07	3,52	4,14
CP-4	3,41	3,68	4,44	3,84	4,90
CP-5	3,69	3,75	4,85	4,10	4,85
CP-6	2,00	2,90	6,91	3,94	6,96
τ média	2,81	3,48	5,24	3,84	5,40
Desvio Padrão	0,68	0,39	1,02	0,21	0,99
CV(%)	24,29	11,13	19,42	5,54	18,27

Tabela 22– Ensaio de arrancamento – barra Φ 9,5 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 –9,5 mm - CA-60 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	5,66	8,13	12,00	8,60	12,43
CP-2	5,51	5,75	11,55	7,60	13,04
CP-3	8,97	11,29	11,65	10,64	14,17
CP-4	6,98	7,26	13,59	9,28	15,28
CP-5	7,52	7,74	11,93	9,06	13,38
CP-6	9,83	10,53	16,05	12,14	16,55
τ média	7,41	8,45	12,80	9,55	14,14
Desvio Padrão	1,74	2,08	1,76	1,61	1,54
CV(%)	23,50	24,66	13,74	16,80	10,87

c) Para aços CA-50 nervurados

Tabela 23– Ensaio de arrancamento – barra Φ 6,3 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 –6,3 mm - CA-50 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	6,73	11,21	16,25	11,40	16,68
CP-2	8,28	9,95	10,57	9,60	12,19
CP-3	7,01	9,39	11,99	9,47	12,79
CP-4	5,16	8,34	8,36	7,29	11,76
CP-5	4,64	6,22	11,75	7,53	12,65
CP-6	8,98	11,40	13,59	11,32	14,25
τ média	6,80	9,42	12,08	9,43	13,39
Desvio Padrão	1,70	1,94	2,68	1,77	1,82
CV(%)	24,94	20,59	22,18	18,76	13,60

Tabela 24– Ensaio de arrancamento – barra Φ 10,0 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 –10,0 mm - CA-50 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	12,73	13,18	14,79	13,57	14,87
CP-2	12,25	13,31	12,74	12,76	13,73
CP-3	6,02	9,22	15,92	10,39	16,47
CP-4	9,29	10,03	15,09	11,47	15,19
CP-5	11,69	11,76	12,62	12,02	12,81
CP-6	11,80	12,39	13,71	12,63	13,71
τ média	10,63	11,65	14,15	12,14	14,46
Desvio Padrão	2,55	1,69	1,34	1,11	1,31
CV(%)	24,01	14,47	9,47	9,18	9,04

Tabela 25– Ensaio de arrancamento – barra Φ 20,0 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 –20,0 mm - CA-50 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	5,03	6,41	18,37	9,94	19,54
CP-2	5,38	7,53	16,95	9,95	16,95
CP-3	4,70	8,54	17,44	10,23	17,44
CP-4	5,80	6,07	19,91	10,59	21,43
CP-5	8,70	9,54	16,58	11,61	16,58
CP-6	6,77	11,47	17,70	11,98	17,70
τ média	6,06	8,26	17,83	10,72	18,27
Desvio Padrão	1,48	2,04	1,19	0,88	1,86
CV(%)	24,38	24,70	6,69	8,17	10,16

Tabela 26– Ensaio de arrancamento – barra Φ 25,0 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 –25,0 mm - CA-50 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	5,00	7,33	13,99	8,77	13,99
CP-2	4,84	7,13	15,48	9,15	15,48
CP-3	5,21	8,38	13,90	9,16	13,90
CP-4	3,80	5,44	11,30	6,85	11,30
CP-5	4,52	7,07	10,38	7,32	10,38
CP-6	4,90	7,75	13,09	8,58	13,09
τ média	4,71	7,18	13,02	8,31	13,02
Desvio Padrão	0,50	0,98	1,88	0,98	1,88
CV(%)	10,58	13,71	14,46	11,84	14,46

Tabela 27– Ensaio de arrancamento – barra Φ 32,0 mm – concreto C40

Ensaio de Arrancamento - Tensão de aderência (MPa) - C40 –32,0 mm - CA-50 nervurada					
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ média	τ máxima
CP-1	4,59	4,74	5,21	4,85	5,21
CP-2	5,96	7,25	7,25	6,82	7,25
CP-3	5,87	5,95	5,95	5,93	5,95
CP-4	5,43	7,42	7,54	6,80	7,54
CP-5	5,02	7,37	7,48	6,62	7,48
CP-6	5,32	5,50	5,50	5,44	5,50
τ média	5,37	6,37	6,49	6,08	6,49
Desvio Padrão	0,52	1,14	1,05	0,81	1,05
CV(%)	9,7	17,9	16,3	13,4	16,3

A seguir estão dispostos, na tabela 28 a 29, todos os resultados obtidos em relação às tensões de aderência máxima e média, para todas as amostras.

Tabela 28 - Tensão de aderência máxima obtida nos ensaios

ϕ barra (mm)	Tipo do aço	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Desvio padrão	CV	τ máxima (MPa)
3.4	CA-60 lisa	1,74	2,15	1,24	2,48	2,19	2,62	0,51	24,55	2,07
4.2		1,12	1,05	1,44	1,26	1,32	1,08	0,16	12,79	1,21
3,4	CA-60 nervurada	6,48	7,29	6,63		4,69		1,12	17,78	6,27
4,2		3,63	3,91	4,14	3,22	3,76		0,35	9,26	3,73
6,0		5,70	5,83	4,14	4,90	4,85	6,96	0,99	18,27	5,40
9,5		12,43	13,04	14,17	15,28	13,38	16,55	1,54	10,87	14,14
6,3	CA-50 nervurada	16,68	12,19	12,79	11,76	12,65	14,25	1,82	13,60	13,39
10,0		14,87	13,73	16,47	15,19	12,81	13,71	1,31	9,04	14,46
20,0		19,54	16,95	17,44	21,43	16,58	17,70	1,86	10,16	18,27
25,0		13,99	15,48	13,90	11,30	10,38	13,09	1,88	14,46	13,02
32,0		5,21	7,25	5,95	7,54	7,48	5,50	1,05	16,3	6,49

Tabela 29 - Tensão de aderência média obtida nos ensaios

ϕ barra (mm)	Tipo do aço	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Desvio padrão	CV	τ média (Mpa)
3.4	CA-60 lisa	1,39	0,88	1,06	1,15	1,64	1,69	25,23	0,33	1,30
4.2		0,87	0,67	0,54	1,08	0,70	0,71	24,89	0,19	0,76
3,4	CA-60 nervurada	4,78	4,93	3,52		3,88		15,99	0,68	4,28
4,2		3,41	3,66	2,46	2,29	2,61		21,08	0,61	2,89
6,0		3,98	3,68	3,52	3,84	4,10	3,94	5,54	0,21	3,84
9,5		8,60	7,60	10,64	9,28	9,06	12,14	16,80	1,61	9,55
6,3	CA-50 nervurada	11,40	9,60	9,47	7,29	7,53	11,32	18,76	1,77	9,43
10,0		13,57	12,76	10,39	11,47	12,02	12,63	9,18	1,11	12,14
20,0		9,94	9,95	10,23	10,59	11,61	11,98	8,17	0,88	10,72
25,0		8,77	9,15	9,16	6,85	7,32	8,58	11,84	0,98	8,31
32,0		4,85	6,82	5,93	6,80	6,62	5,44	13,4	0,81	6,08

3.4. Resultados experimentais dos Laboratórios comerciais Concremat e Falcão Bauer

Tabela 30 - Tensão de aderência média e tensão de aderência máxima obtida nos resultados - CONCREMAT

ϕ barra (mm)	TIPO DO AÇO	CV	τ média	CV	τ última
5	CA 60 LISO	46,00	0,75	38,70	2,57
6,3	CA 50 NERVURADO	57,16	2,18	46,26	5,18
8		18,53	1,90	16,24	5,35
10		24,29	4,60	21,38	6,95
3,4	CA 60 NERVURADO	34,50	1,67	27,07	4,08
4,2		66,36	0,82	55,30	2,68
5		38,05	3,98	27,95	8,17
6		49,49	0,70	16,00	2,92
8		34,88	4,03	22,90	8,72
9,5		14,48	4,08	17,28	6,53

Tabela 31 - Tensão de aderência média e tensão de aderência máxima obtida nos ensaios - FALCÃO BAUER

ϕ barra (mm)	TIPO DO AÇO	CV	τ média	CV	τ última
3,4	CA 60 LISO	122,89	0,08	73,32	0,25
4,2		69,52	0,16	87,06	0,38
5		26,99	0,08	20,83	0,13
6,3	CA 50 NERVURADO	27,17	2,03	23,12	6,23
8		16,50	4,48	12,61	11,13
10		26,15	4,60	10,99	12,16
3,4	CA 60 NERVURADO	102,31	0,87	81,81	1,89
4,2		68,99	0,17	87,06	0,38
5		28,64	0,90	31,47	3,24
6		24,48	0,87	19,06	2,47
8		29,73	2,72	19,74	8,75
9,5		59,69	4,53	15,24	10,26

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Tensões de aderência

4.1.1. Resultados experimentais x Normalização brasileira

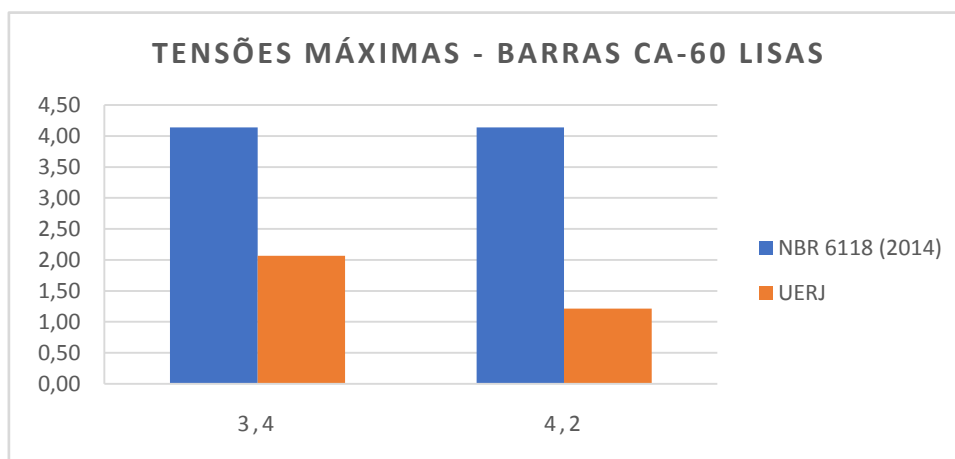
As tabelas 32 a 34 comparam os resultados segundo a NBR 6118, conforme item 2.5.1 e a equação 2-5.

a) Barras CA-60 lisas UERJ

Tabela 32 - Resistência de aderência, em MPa, segundo a NBR 6118 (2014), para aços CA-60 lisos

ϕ barra (mm)	NBR 6118 (2014)	Experimentais
	f_{bd}	τ máxima (ensaio)
3,4	4,14	2,07
4,2	4,14	1,21

Figura 34 - Gráfico de resistência de aderência NBR 6118 e barras lisas CA-60

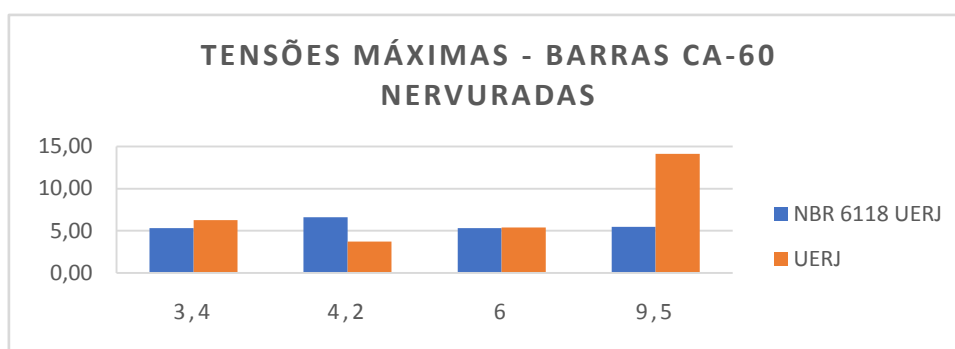


b) Barras CA-60 nervuradas UERJ

Tabela 33 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a NBR 6118 (2014), para aços CA-60 nervurados

ϕ barra (mm)	NBR 6118 (2014)		UERJ
	f_{bd}	f_{ctd}	τ máxima (ensaio)
3,4	5,31	3,79	6,27
4,2	6,62	4,73	3,73
6	5,31	3,79	5,40
9,5	5,46	3,90	14,14

Figura 35 - Gráfico de resistência de aderência NBR 6118 e barras nervuradas CA-60

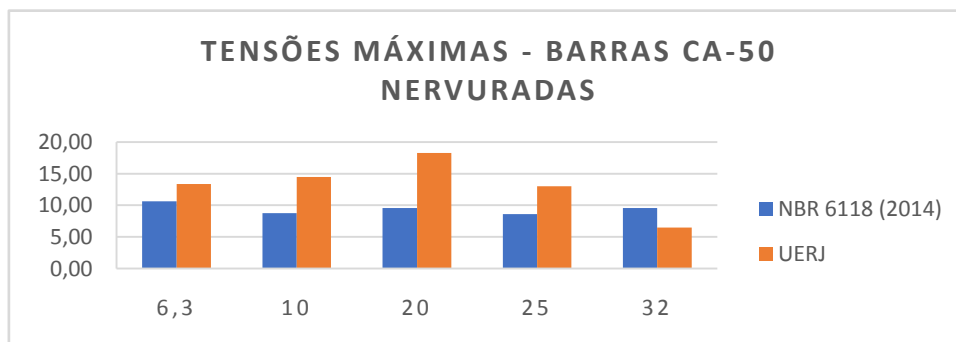


c) Barras CA-50 nervuradas UERJ

Tabela 34 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a NBR 6118 (2014), para aços CA-50 nervurados

ϕ barra (mm)	NBR 6118 (2014)		UERJ
	f_{bd}	f_{ctd}	τ máxima (ensaio)
6,3	10,64	4,73	13,39
10	8,78	3,90	14,46
20	9,56	4,25	18,27
25	8,62	3,83	13,02
32	9,56	4,25	6,49

Figura 36 -Gráfico de resistência de aderência NBR 6118 e barras nervuradas CA-50



4.1.2. Resultados experimentais x BAEL 91

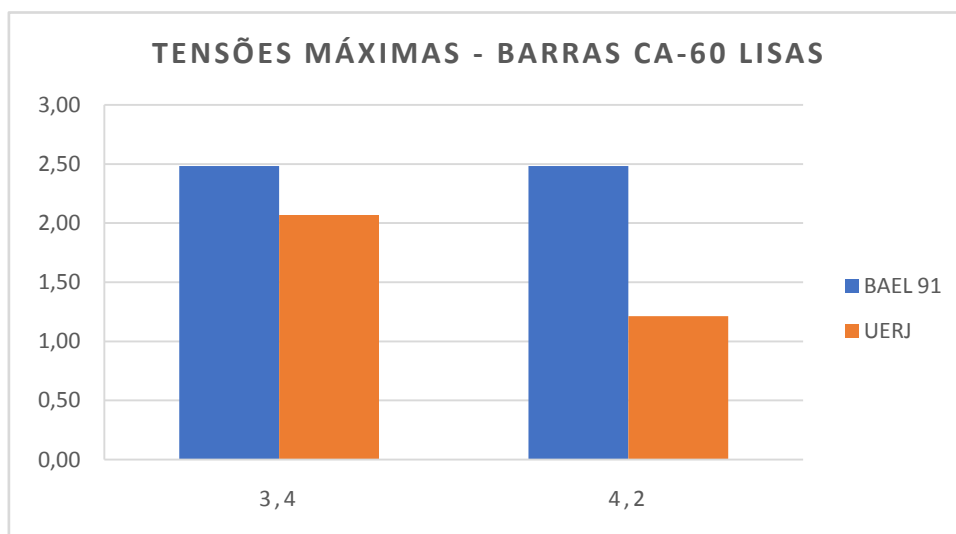
As tabelas 35 a 37 comparam os resultados com a norma francesa BAEL80 conforme apresentado no item 2.5.2, equação 2-6

a) Barras CA-60 lisas UERJ

Tabela 35 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a BAEL-91, para aços CA-60 lisos

ϕ barra (mm)	BAEL 91	Experimentais	
	τ	f_{tj}	τ máxima (ensaio)
3,4	2,48	4,14	2,07
4,2	2,48	4,14	1,21

Figura 37 - Gráfico de resistência de aderência BAEL91 e barras lisas CA-60

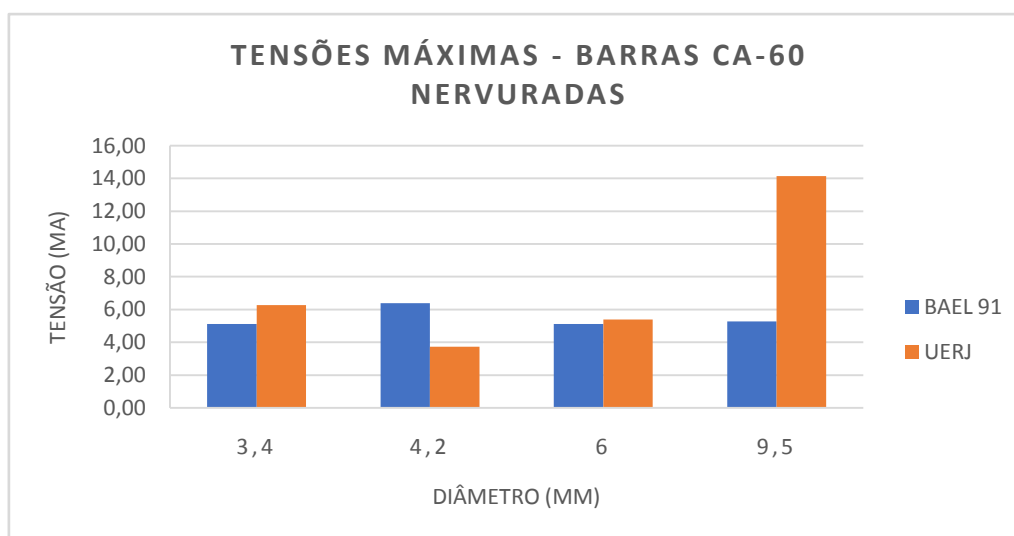


b) Barras CA-60 nervuradas UERJ

Tabela 36 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a BAEL-91, para aços CA-60 nervurados

ϕ barra (mm)	BAEL 91	UERJ	
	τ	f_{tj}	τ máxima (ensaio)
3,4	5,12	3,79	6,27
4,2	6,39	4,73	3,73
6	5,12	3,79	5,40
9,5	5,27	3,90	14,14

Figura 38 - Gráfico de resistência de aderência BAEL91 e barras nervuradas CA-60

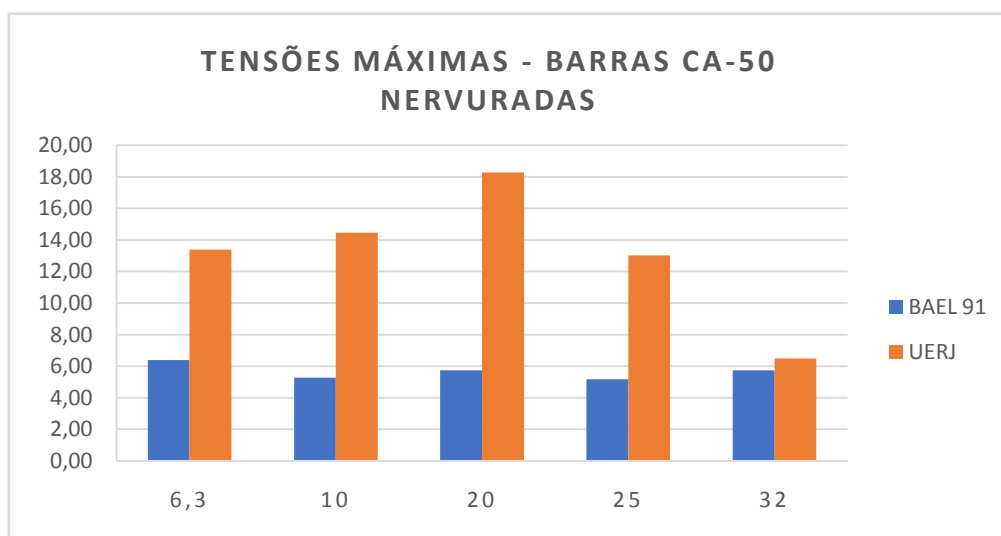


c) Barras CA-50 nervuradas UERJ

Tabela 37 - Resistencia de aderência, em MPa, segundo a BAEL-91, para aços CA-50 nervurados

ϕ barra (mm)	BAEL 91	UERJ	
	τ	f_{tj}	τ máxima (ensaio)
6,3	6,39	4,73	13,39
10	5,27	3,90	14,46
20	5,74	4,25	18,27
25	5,17	3,83	13,02
32	5,74	4,25	6,49

Figura 39 - Gráfico de resistência de aderência BAEL91 e barras nervuradas CA-50



4.2. Influência do diâmetro nas tensões de aderência

4.2.1. Resultados experimentais x CEB

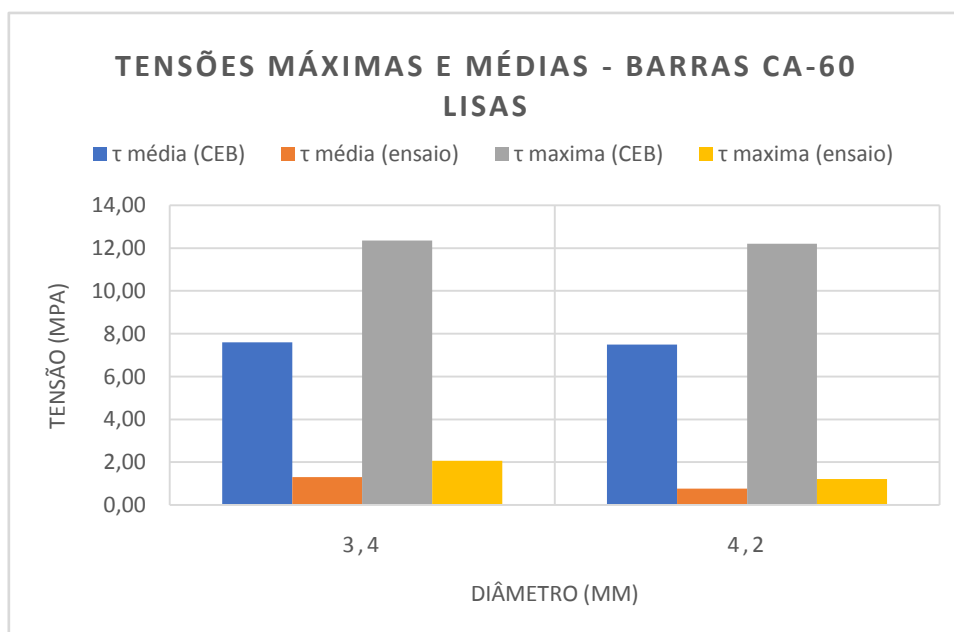
Conforme apresentado na seção 2.6.1, os resultados experimentais serão avaliados segundo o CEB – RILEM/CEB/FIP (1983), sendo a tensão média de aderência apresentada na equação 2-7 e a tensão última apresentada na equação 2-8

a) Barras CA-60 lisas UERJ

Tabela 38 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo o CEB, para aços CA-60 lisos

φ barra (mm)	CEB (1970)		Experimentais	
	τ média	τ máxima	τ média (ensaio)	τ máxima (ensaio)
3,4	7,59	12,35	1,30	2,07
4,2	7,50	12,20	0,76	1,21

Figura 40 - Gráfico tensões médias e máximas CEB e barras lisas CA-60



b) Barras CA-60 nervuradas UERJ

Tabela 39 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo o CEB, para aços CA-60 nervurados

ϕ barra (mm)	CEB (1970)		UERJ	
	τ média	τ máxima	τ média (ensaio)	τ máxima (ensaio)
3,4	7,59	12,35	4,28	6,27
4,2	7,50	12,20	2,89	3,73
6	7,28	11,86	3,84	5,40
9,5	6,86	11,20	9,55	14,14

Figura 41 - Gráfico tensões médias CEB e barras nervuradas CA-60

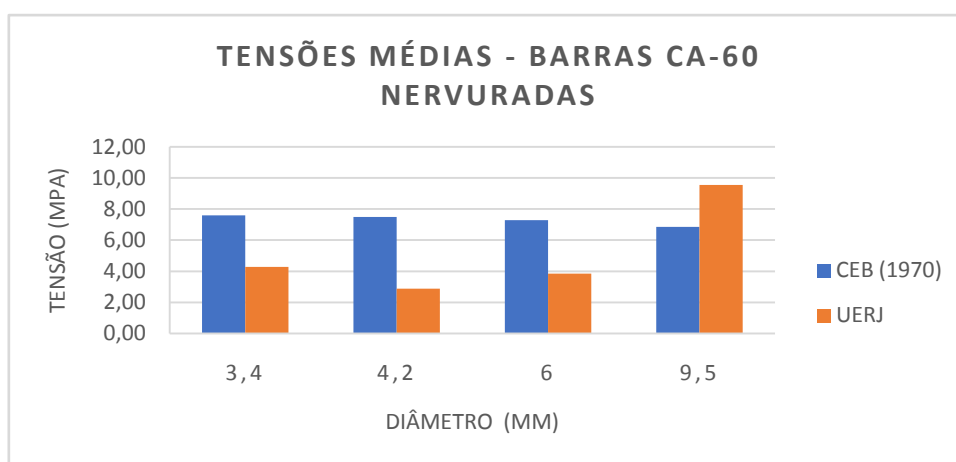
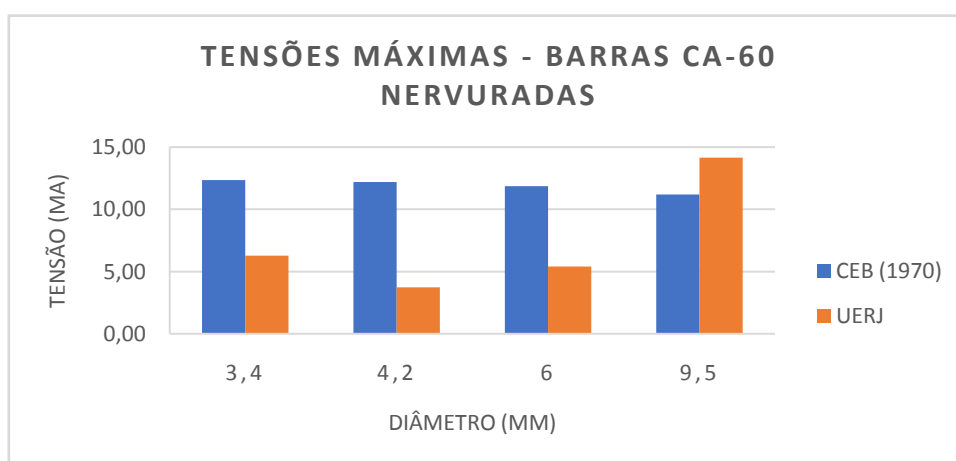


Figura 42 - Gráfico tensões máximas CEB e barras nervuradas CA-60



c) Barras CA-50 nervuradas UERJ

Tabela 40 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo o CEB, para aços CA-50 nervurados

ϕ barra (mm)	CEB (1970)		UERJ	
	τ média	τ máxima	τ média (ensaio)	τ máxima (ensaio)
6,3	7,24	11,80	9,43	13,39
10	6,80	11,10	12,14	14,46
20	5,60	9,20	10,72	18,27
25	5,00	8,25	8,31	13,02
32	4,16	6,92	6,08	6,49

Figura 43 - Gráfico tensões médias CEB e barras nervuradas CA-50

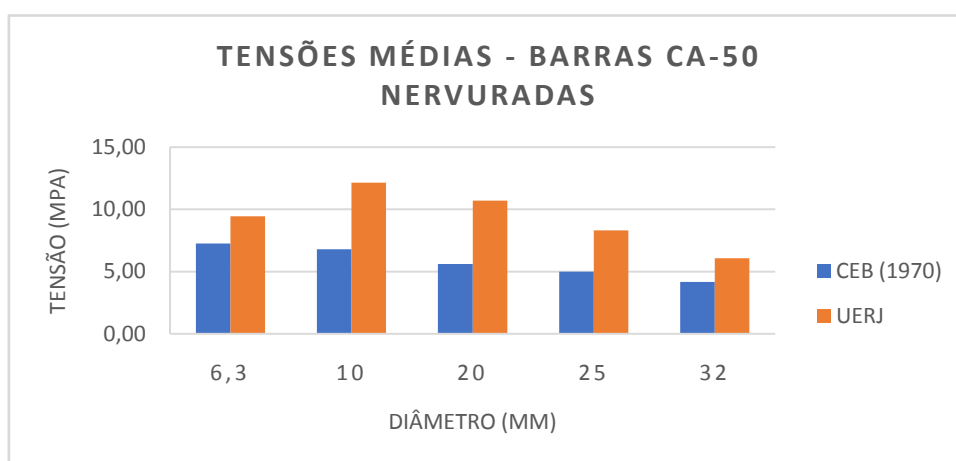
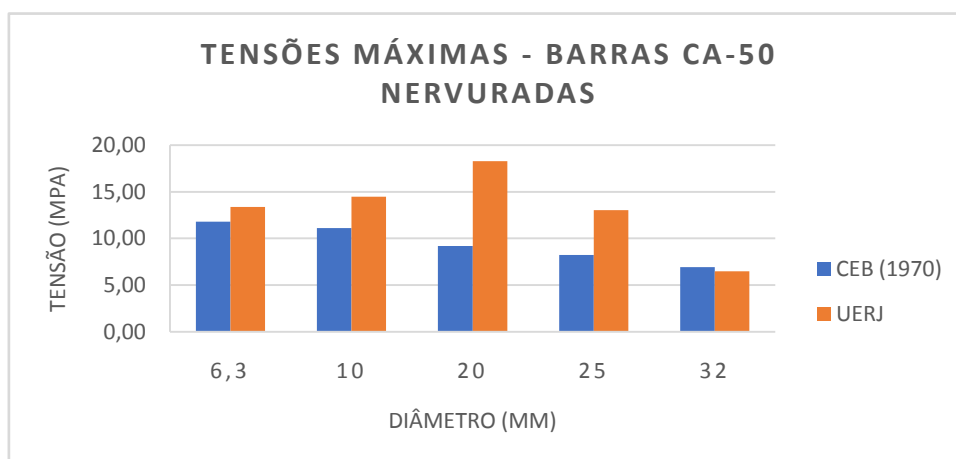


Figura 44- Gráfico tensões máximas CEB e barras nervuradas CA-50



4.2.2. Resultados experimentais x UNE 36740

Apresenta-se nas tabelas 41 a 43 o valor da tensão de aderência média (τ_m) conforme a equação 2-9 e da tensão de aderência na ruptura (τ_u) de acordo com a equação 2-10, em MPa, função do diâmetro da barra em mm, verificado dentro dos limites apresentados na norma espanhola UNE 36740:1998, conforme apresentado no item 2.6.2.

a) Barras CA-60 lisas UERJ

Tabela 41 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo a UNE 36740, para aços CA-60 lisos

ϕ barra (mm)	UNE 36740 (1998)		Experimentais	
	τ média	τ máxima	τ média (ensaio)	τ máxima (ensaio)
3,4	6,88	11,22	1,30	2,07
4,2	6,88	11,22	0,76	1,21

Figura 45 - Gráfico tensões médias UNE 36740 e barras lisas CA-60

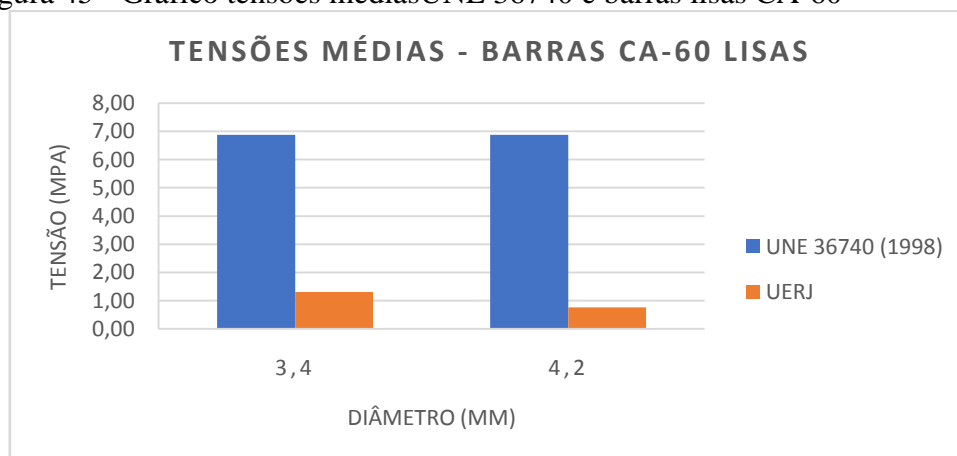
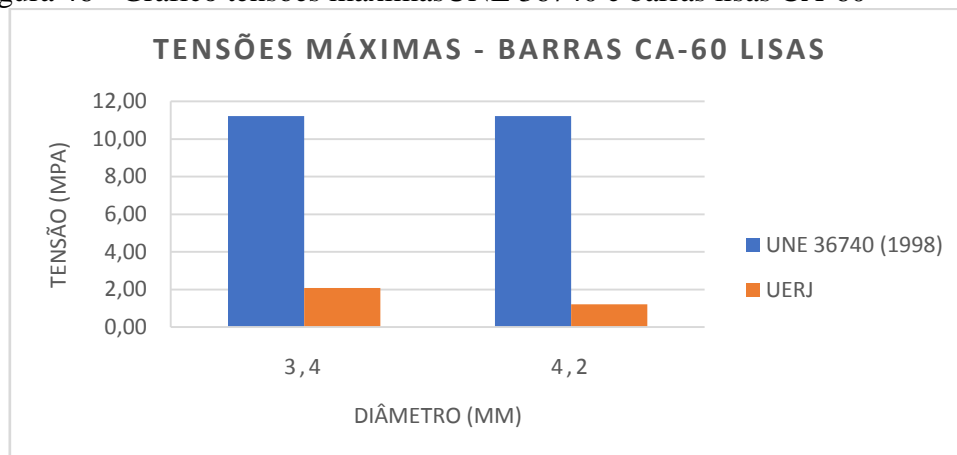


Figura 46 - Gráfico tensões máximas UNE 36740 e barras lisas CA-60



b) Barras CA-60 nervuradas UERJ

Tabela 42 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo a UNE 36740, para aços CA-60 nervurados

φ barra (mm)	UNE 36740 (1998)		UERJ	
	τ média	τ máxima	τ média (ensaio)	τ máxima (ensaio)
3,4	6,88	1,52	4,28	6,27
4,2	6,88	1,52	2,89	3,73
6	6,88	1,52	3,84	5,40
9,5	6,70	10,94	9,55	14,14

Figura 47 - Gráfico tensões médias UNE 36740 e barras nervuradas CA-60

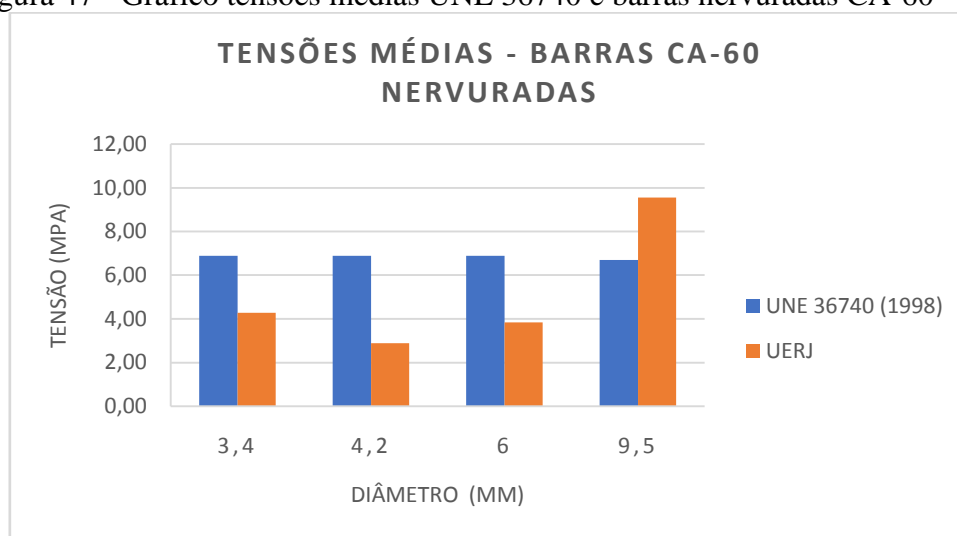
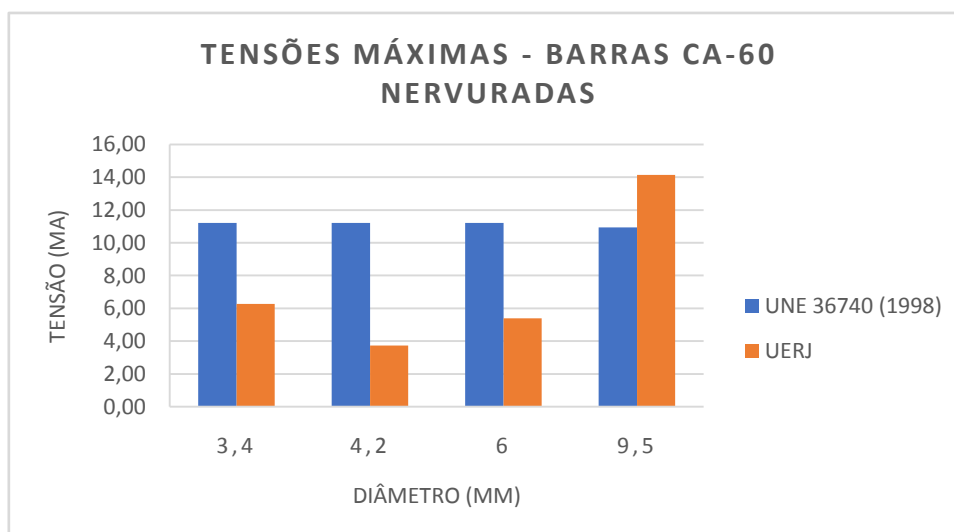


Figura 48 - Gráfico tensões máximas UNE 36740 e barras nervuradas CA-60



c) Barras CA-50 nervuradas UERJ

Tabela 43 - Tensão média e tensão de ruptura, em MPa, de aderência segundo a UNE 36740, para aços CA-50 nervurados

ϕ barra (mm)	UNE 36740 (1998)		UERJ	
	τ média	τ máxima	τ média (ensaio)	τ máxima (ensaio)
6,3	6,88	1,52	9,43	13,39
10	6,64	10,84	12,14	14,46
20	5,44	8,94	10,72	18,27
25	4,84	7,99	8,31	13,02
32	4,00	6,66	6,08	6,49

Figura 49 - Gráfico tensões médias UNE 36740 e barras nervuradas CA-50

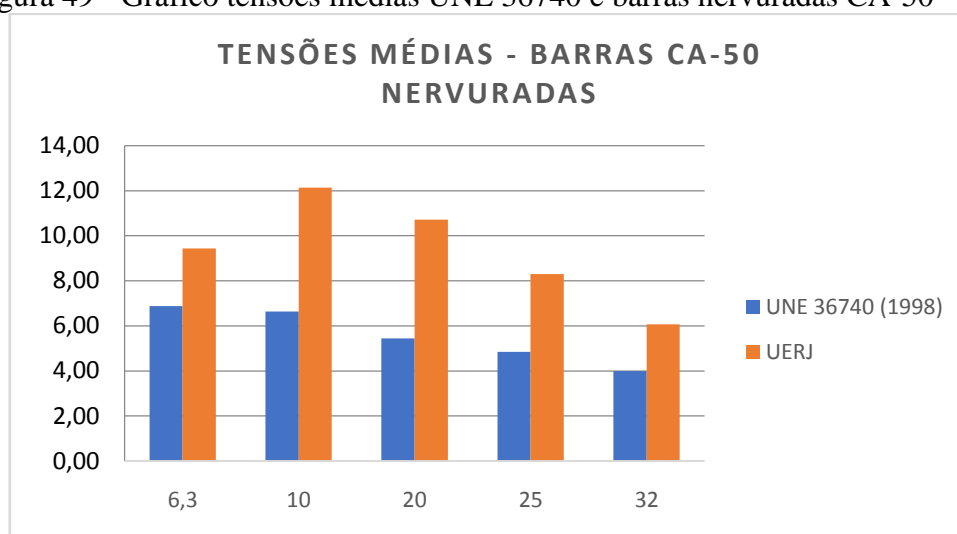
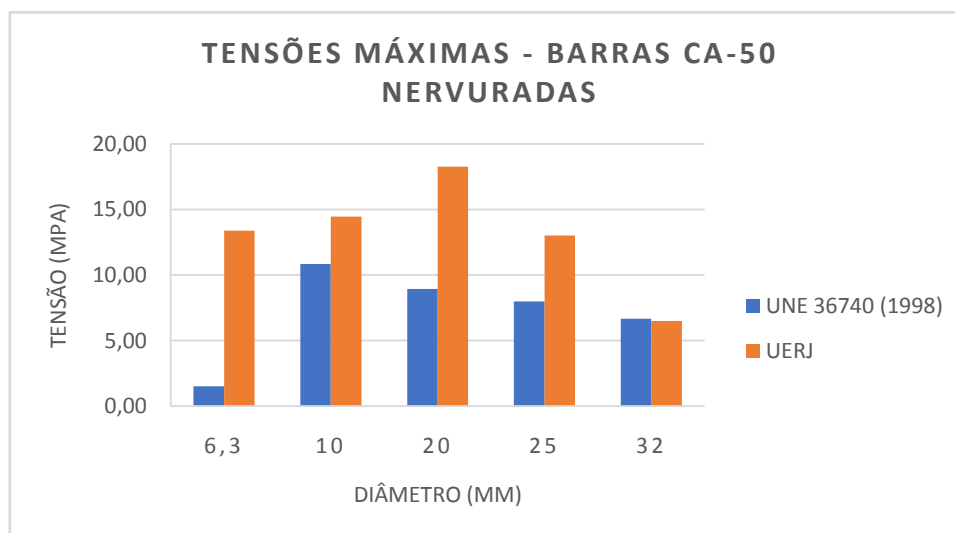


Figura 50 - Gráfico tensões máximas UNE 36740 e barras nervuradas CA-50



4.3. Determinação experimental do coeficiente de aderência

Utilizando a equação 2-11 definida pela norma francesa BAEL-91, apresentada no item 2.7, calcula-se o coeficiente $\eta_{(e)}$, para cada um dado diâmetro ensaiado pelo Método RILEM Modificado e faz-se uma comparação com as normas NBR 7480 e NBR 6118:

$\eta_{(e)} \geq 1$ para atender à NBR-7480, e

$(\eta_{(e)})^2 \geq \eta_1$ para atender à NBR-6118, nas seguintes condições:

$\eta_1 = 1,0$ para aços lisos, CA-25;

$\eta_1 = 1,4$ para aços entalhados, CA-60;

$\eta_1 = 2,25$ para aços nervurados, CA-50.

4.3.1. Barras lisas CA-60

Tabela 44 - Barras de aço lisas CA-60

ϕ barra (mm)	$\eta_{experimental}$	$\eta^2_{experimental}$	f_c 40 MPa
			τ_u (ensaio)
3,4	0,91	0,82	2,07
4,2	0,70	0,49	1,21

4.3.2. Barras nervuradas CA-60

Tabela 45 - Barras de aço nervuradas CA-60

ϕ barra (mm)	$\eta_{experimental}$	$\eta^2_{experimental}$	f_c 40 MPa
			τ_u (ensaio)
3,4	1,66	2,76	6,27
4,2	1,15	1,32	3,73
6	1,54	2,37	5,40
9,5	2,46	6,05	14,14

4.3.3. Barras nervuradas CA-50

Tabela 46- Barras de aço nervuradas CA-50

ϕ barra (mm)	$\eta_{experimental}$	$\eta^2_{experimental}$	f_c 40 MPa
			τ_u (ensaio)
6,3	2,17	4,71	13,39
10	2,49	6,20	14,46
20	2,68	7,18	18,27

25	2,38	5,66	13,02
32	1,60	2,56	6,49

Como foi adotado o critério de que $\psi_s = \eta$, as barras apresentam um desempenho de aderência melhor do que o considerado na NBR 7480 ($\eta > 1$).

Os valores das barras de alta aderência obedecem à NBR 6118 $(\eta_{(e)})^2 \geq \eta_1 = 2,25$, exceto para a barra de 4,2 mm. Os resultados das barras lisas não atingem aos valores mínimos requeridos.

4.4. Resultados experimentais de diferentes laboratórios

4.4.1. Avaliação do coeficiente de variação de amostras

Tabela 47 – Coeficiente de variação de amostras para os laboratórios

CA 60 LISO								
φ barra (mm)	UERJ		CEFET		FALCAO BAUER		CONCREMAT	
	CV	τ última	CV	τ última	CV	τ última	CV	τ última
3,4	25,23	2,07			73,32	0,25		
4,2	24,89	1,21			87,06	0,38		
5			18,23	1,14	20,83	0,13	38,70	2,57
CA 60 NERVURADO								
φ barra (mm)	UERJ		CEFET		FALCAO BAUER		CONCREMAT	
	CV	τ última	CV	τ última	CV	τ última	CV	τ última
3,4	15,99	6,27			81,81	1,89	27,07	4,08
4,2	21,08	3,73			87,06	0,38	55,30	2,68
6	5,54	5,14	18,18	6,24	19,06	2,47	16,00	2,92
9,5	16,80	14,00	24,75	2,32	15,24	10,26	17,28	6,53
CA 50 NERVURADO								
φ barra (mm)	UERJ		CEFET		FALCAO BAUER		CONCREMAT	
	CV	τ última	CV	τ última	CV	τ última	CV	τ última
6,3	18,76	13,34	21,01	12,42	23,12	6,23	46,26	5,18
10	9,18	15,31	13,35	9,89	10,99	12,16	21,38	6,95

Observa-se na tabela 47 que a variação estatística é maior para as barras lisas e para os ensaios executados nos laboratórios comerciais do que para os laboratórios universitários. Essa diferença mostra que a metodologia de ensaio deve ser bem definida para que possa ser repetida por laboratórios comerciais.

4.4.2. Avaliação das tensões de aderência

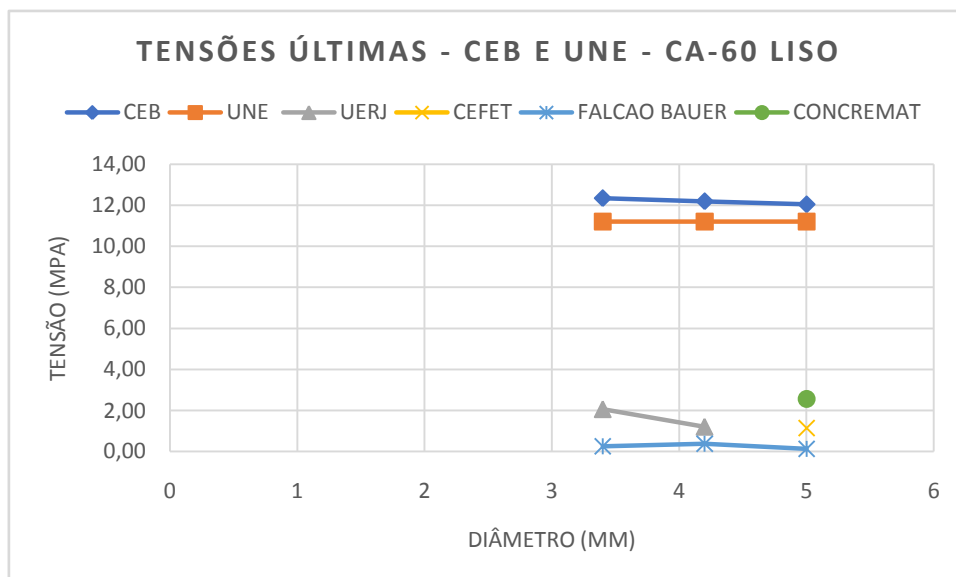
4.4.2.1. Influência do diâmetro

a) Barras CA-60 lisas

Tabela 48 – Influência do diâmetro barras de aço CA-60 lisas

φ barra (mm)	CEB		UNE		UERJ		CEFET		FALCAO BAUER		CONCREMAT	
	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u
3,4	7,59	12,35	6,88	11,22	1,30	2,07			0,08	0,25		
4,2	7,50	12,20	6,88	11,22	0,76	1,21			0,16	0,38		
5	7,40	12,05	6,88	11,22			0,66	1,14	0,08	0,13	0,75	2,57

Figura 41 - Gráfico de influência do diâmetro barras de aço CA-60 lisas



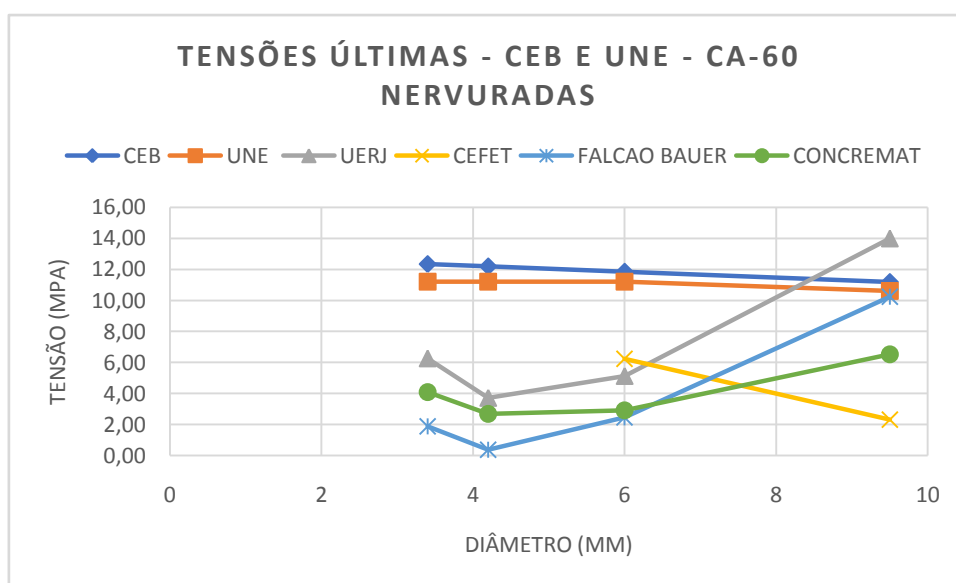
Observa-se que nenhum resultado dos quatro laboratórios apresentados atinge aos valores recomendados para as barras lisas.

b) Barras CA-60 nervuradas

Tabela 49 - Influência do diâmetro barras de aço CA-60 nervuradas

ϕ barra (mm)	CEB		UNE		UERJ		CEFET		FALCAO BAUER		CONCREMAT	
	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u
3,4	7,59	12,35	6,88	11,22	4,28	6,27			0,87	1,89	1,67	4,08
4,2	7,50	12,20	6,88	11,22	2,89	3,73			0,17	0,38	0,82	2,68
6	7,28	11,86	6,88	11,22	3,60	5,14	2,78	6,24	0,87	2,47	0,70	2,92
9,5	6,86	11,20	6,50	10,61	9,45	14,00	1,20	2,32	4,53	10,26	4,08	6,53

Figura 42 - Gráfico de influência do diâmetro barras de aço CA-60 nervuradas



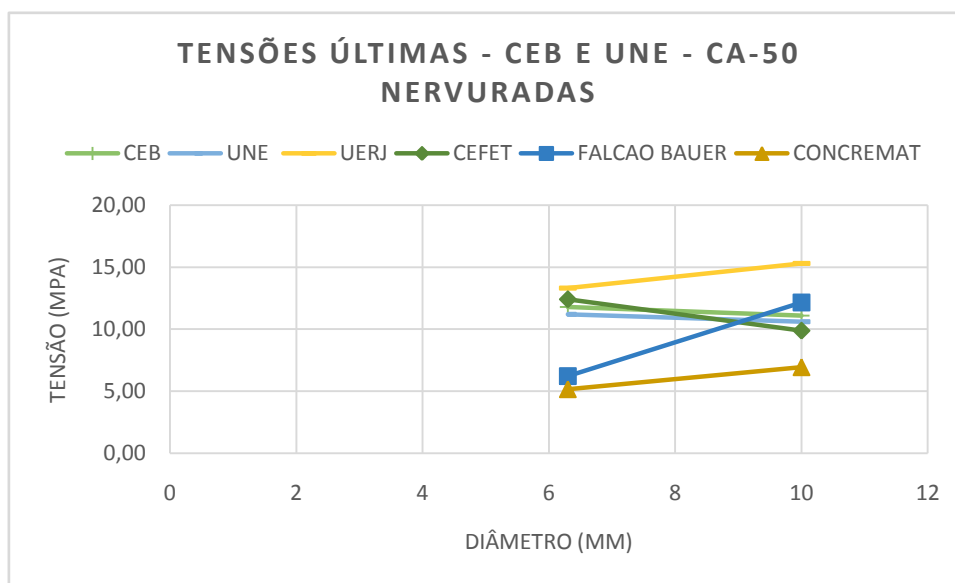
Observa-se que os resultados não atingem os valores recomendados. A barra de diâmetro 9,5, exceto pelo CEFET, apresenta maiores valores de tensão enquanto as barras de 6,0, 4,2 e 3,4 mm estão mais distantes da curva recomendada.

c) Barras CA-50 nervuradas

Tabela 40 - Influência do diâmetro barras de aço CA-50 nervuradas

ϕ barra (mm)	CEB		UNE		UERJ		CEFET		FALCAO BAUER		CONCREMAT	
	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u	τ_m	τ_u
6,3	7,24	11,80	6,88	11,22	9,20	13,34	7,37	12,42	2,03	6,23	2,18	5,18
10	6,80	11,10	6,51	10,63	12,90	15,31	6,01	9,89	4,60	12,16	4,60	6,95

Figura 43 - Gráfico de influência do diâmetro barras de aço CA-50 nervuradas



Pode-se observar que o laboratório UERJ atinge aos valores recomendados pelas duas normas. O laboratório CEFET, apresenta a curva bem próxima da curva recomendada, não atingindo apenas a tensão última da barra de 10,0 mm. Os laboratórios comerciais ficam mais distantes dos valores propostos, atendendo apenas o laboratório Falcão Bauer para a barra de 10,0 mm.

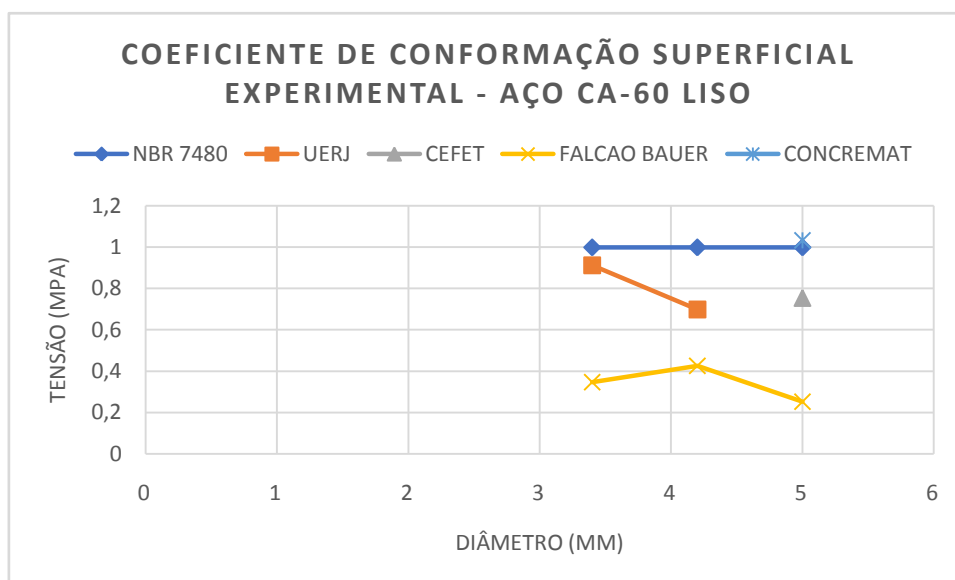
4.4.3. Coeficiente de conformação superficial

a) Barras CA-60 lisas

Tabela 41 – Coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-60 lisos

ϕ barra (mm)	NBR 7480	UERJ	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT
	η	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$
3,4	1	0,91		0,35	
4,2	1	0,70		0,43	
5	1		0,75	0,25	1,03

Figura 44 – Gráfico do coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-60 lisos



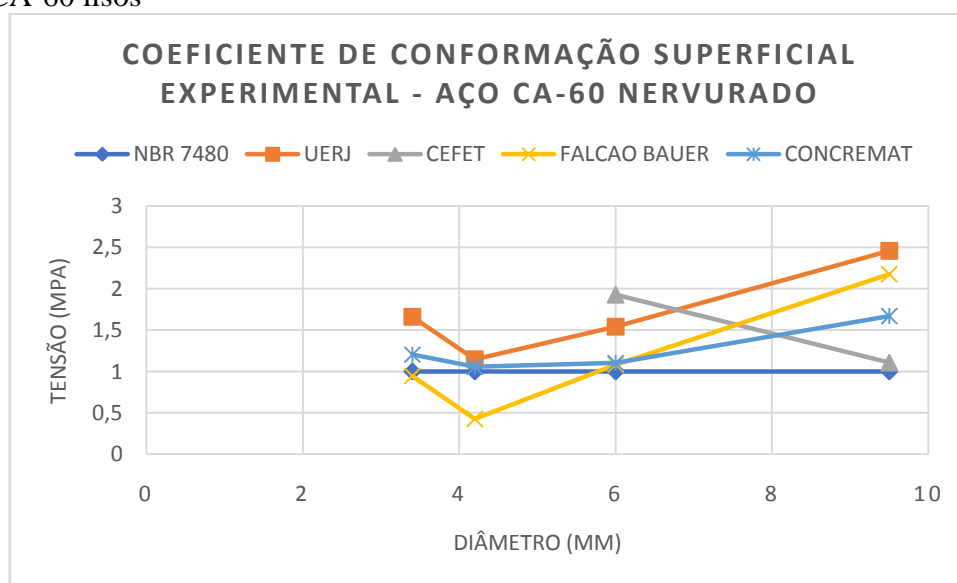
Observa-se que as barras de aço lisas não atingem ao coeficiente igual a um, exceto a barra de 5,0 mm do laboratório Concremat.

b) Barras CA-60 nervuradas

Tabela 42 - Coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-60 nervurados

φ barra (mm)	NBR 7480	UERJ	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT
	η	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$
3,4	1	1,66		0,95	1,20
4,2	1	1,15		0,43	1,06
6	1	1,54	1,93	1,08	1,10
9,5	1	2,46	1,11	2,18	1,67

Figura 45 - Gráfico do coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-60 lisos



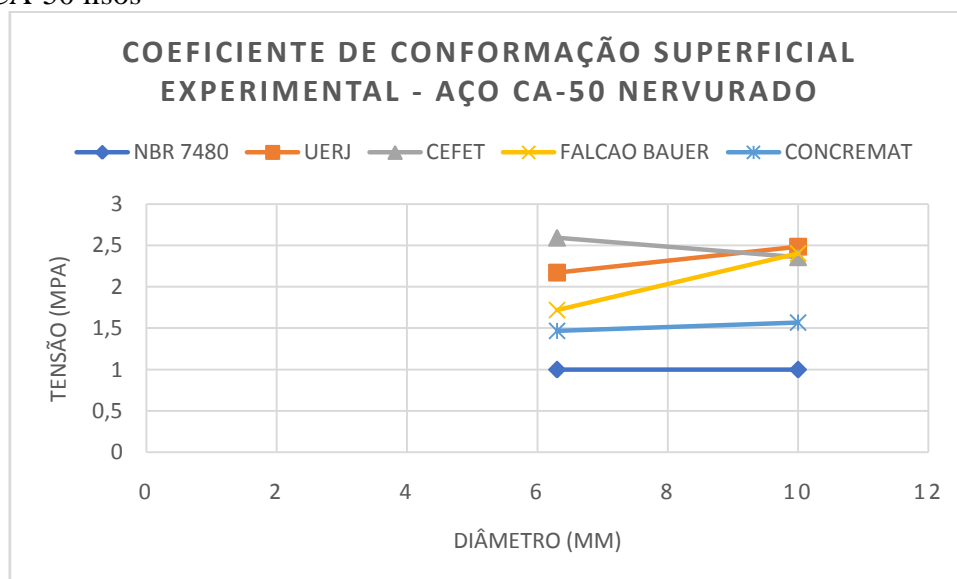
Apenas o laboratório Falcão Bauer, para as amostras mais finas de 3,4 e 4,2 mm não atingiram o coeficiente mínimo. Observa-se que para barras nervuradas, obtêm-se melhores resultados.

c) Barras CA-50 nervuradas

Tabela 43 - Coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-50 nervurados

ϕ barra (mm)	NBR 7480	UERJ	CEFET	FALCAO BAUER	CONCREMAT
	η	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$	$\eta_{experimental}$
6,3	1	2,17	2,60	1,72	1,47
10	1	2,49	2,36	2,41	1,57

Figura 46 - Gráfico do coeficiente de conformação superficial experimental para aços CA-50 lisos



As barras nervuradas CA-50 apresentam os melhores resultados. Todos os laboratórios atingem ao valor mínimo requerido.

4.5. Ganho de desempenho entre barras nervuradas e lisas

Analisando as tensões últimas de aderência entre as barras CA-60 lisas e nervuradas, verifica-se um ganho de desempenho para as barras nervuradas quanto à tensão última e quando o coeficiente de conformação superficial..

Tabela 44 – Ganho de desempenho de tensão última para barras lisas e nervuradas CA-60

ϕ barra (mm)	$\tau_{\text{última}}$		Ganho de desempenho
	barras lisas CA-60	barras nervuradas CA-60	
3,4	2,07	6,27	3,03
4,2	1,21	3,73	3,08
5	1,14	4,85	4,25
6	2,02	6,24	3,09
8	1,44	4,20	2,92
9,5	2,19	14,00	6,39
Valores médios	1,68	6,55	3,79

Tabela 45 - Ganho de desempenho do coeficiente de conformação superficial para barras lisas e nervuradas CA-60

ϕ barra (mm)	$\eta_{\text{experimental}}$		Ganho de desempenho
	barras lisas CA-60	barras nervuradas CA-60	
3,4	0,91	1,66	1,82
4,2	0,70	1,15	1,64
5	0,75	1,71	2,28
6	1,08	1,93	1,79
8	0,85	1,48	1,74
9,5	1,09	2,46	2,26
Valores médios	0,90	1,73	1,92

5. Conclusões e sugestões para pesquisas futuras

Os resultados experimentais apresentam grande influência quanto ao tipo da barra de aço utilizada. Foram definidos três grupos distintos: as barras CA-60 lisas, CA-60 nervuradas e CA-50 nervuradas.

➤ Comentários sobre os grupos de aço em geral

As barras CA-60 lisas não atingiram os valores recomendados pelas normalizações em questão de tensões de aderência pela NBR 6118 e BAEL 91, influência do diâmetro pelas normas CEB e UNE 36740 e não atingiram ao valor de coeficiente de conformação superficial igual a um. Apresentam, assim, um comportamento experimental inferior ao prescrito pela NBR 7480 e NBR 6118.

Das barras CA-60 nervuradas, apenas o diâmetro de 9,5 mm atende às especificações de tensões de aderência pela NBR 6118 e BAEL 91, influência do diâmetro pelas normas CEB e UNE 36740. Porém, todas atingem ao valor de coeficiente de conformação superficial igual a um e atendem à NBR 7480. Quanto à recomendação da NBR 6118, as barras nervuradas devem apresentar o coeficiente experimental ao quadrado igual à 2,25. Somente a barra de diâmetro 4,2 mm não atendeu à solicitação.

As barras CA-50 nervuradas apresentaram melhor comportamento em todas as avaliações. Somente no que diz respeito à comparação da resistência de aderência da NBR 6118, a barra de 32,0 mm obteve uma tensão média e última pouco inferior ao recomendado..

➤ Coeficiente de variação de amostras

Observou-se grande discrepância para os resultados das amostras CA-60 lisas e também para as barras de 3,4 e 4,2 mm CA-60 nervuradas. Essas amostras apresentam maiores dificuldades na realização dos ensaios por serem muito finas. O comprimento de ancoragem, apesar de já ter sido aumentado para 10Φ , continua sendo pequeno para obter resultados mais convergentes. Exige um cuidado maior na metodologia do ensaio,

pois qualquer contato com a barra de aço no transporte e no preparo do ensaio já pode alterar os resultados. As demais amostras apresentam uma variação dentro do limite aceitável.

➤ Influência da área relativa de nervuras

A geometria das nervuras apresenta grande influência nos resultados obtidos. Segundo DARWIN et al. (1996) e ELIGEHAUSEN & VLIET (1999), a medida que a área relativa de nervuras aumenta, a resistência de aderência também aumenta. As barras lisas apresentam resultados muito inferiores aos valores prescritos em normalizações, pois não possuem nervura na sua superfície. Desta forma, perde-se a resistência adquirida devido à aderência mecânica.

Observa-se que as amostras CA-50 tem um desempenho melhor que as amostras CA-60, ainda que sejam as duas nervuradas.

A NBR 6118 recomenda valores de coeficiente de conformação superficial diferentes para barras lisas, entalhadas e nervuradas. Porém, ao comparar duas barras nervuradas os resultados são diferentes.

Observamos na tabela 14e na figura 30que as barras CA-50 apresentam abrangência de nervuras em quase 100% do perímetro da barra. Já as barras CA-60 tem uma configuração geométrica diferente, onde trechos do perímetro da barra são lisos. As Especificações do LNEC consideram essa abrangência de nervuras na equação 2-2. Deste modo, apresentam-se valores de área relativa de nervura maiores para as barras nervuradas CA-50.

➤ Resultados entre laboratórios

Ao observar os resultados dos laboratórios universitários (UERJ e CEFET) e dos laboratórios comerciais (Concremat e L.A. Falcão Bauer), constata-se que há maior discrepância nos resultados dos laboratórios comerciais. Este fato pode ser explicado pela necessidade de ter procedimentos bem definidos, pois conforme apresentado no capítulo 2, são muitos os fatores que influenciam no comportamento da aderência. Por mais que fossem comparados o mesmo tipo de aço com o mesmo diâmetro, outras variáveis podem ter tido influência nos resultados.

➤ Barras finas

As barras finas CA-60, com diâmetros abaixo de 6,3 mm não atingem ao coeficiente de conformação superficial proposto. O coeficiente um admitido na NBR 7480 não parece estar correspondendo com a realidade experimental para essas barras, visto que foram feitos diversos ensaios em diferentes laboratórios.

➤ Avaliação de desempenho entre barras finas lisas e nervuradas CA-60

Observa-se no item 5.5 que as barras de aço de mesma categoria e mesmas bitolas, quando comparadas apresentam um ganho de desempenho para as barras nervuradas. Quando à tensão última de aderência, verificamos uma razão média de 3,79 e quanto ao coeficiente de conformação superficial, uma razão de 1,92 entre barras nervuradas e lisas.

➤ Barras grossas

O fato das barras grossas romperem por fendilhamento com tensão menor que a última, não significa que não possuam aderência suficiente, pois elas atendem as prescrições da NBR 6118 e NBR 7480 quanto ao coeficiente de conformação superficial.

O ensaio de arrancamento para os diâmetros 25 e 32 mm com o corpo de prova de concreto de 20cm está fora da recomendação RILEM. Foram executados estes ensaios para avaliar o padrão do ensaio e se estas barras poderiam atingir às especificações de conformação superficial, apesar de não chegar a tensão última por conta do fendilhamento do concreto. A RILEM recomenda o tamanho do corpo de prova igual a 10Φ para barras acima de 16,0 mm para evitar o fendilhamento. As barras de 25 e 32 mm, obterão melhores resultados quando ensaiadas em corpos de prova com as dimensões de 25 e 32 cm, respectivamente.

➤ Coeficiente de conformação superficial e o método de ensaio

De maneira geral, o método de ensaio proposto foi eficiente para obter experimentalmente o coeficiente de conformação superficial de barras grossas e finas.

Os laboratórios comerciais conseguiram reproduzir os ensaios e obter resultados, porém deve-se trabalhar para refinar a metodologia do ensaio e diminuir a discrepância de resultados.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes de. (2006). Contribuição para estudos de aderência e concretos auto adensáveis. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI COMMITTEE 318M. Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI 318M-11) And Commentary. 2011, 503 pp.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI COMMITTEE 408. Abstract of: State-of-Art-Report: Bond Under Cyclic Loads. ACI Materials Journal, v.88, n.6, p.669-73, Nov/Dec, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforced steel, C 234, Philadelphia, 1991

ARAÚJO, D. L., DANIN, A. R., MELO, M. B., RODRIGUES, E P. F., Influência da adição de fibras de aço na tensão de aderência de barras de aço retilíneas, UFG, IFET-GO e Furnas Centrais Elétricas S. A., 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT,R.J. NBR 8522 : Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estatística e Diagrama Tensão-Deformação – maio de 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – especificação: NBR 7222. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado – especificação: NBR 7480. Rio de Janeiro, 2007

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado – especificação: NBR 7477. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7810: Agregado em Estado Compactado e Seco – Determinação da Massa Unitária. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos Por Meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9937: Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7480: Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM 52: Agregado Miúdo – Determinação de Massa Específica e Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – especificação: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

B.A.E.L. 91 (1994). Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions em béton armé, suivant la méthode des états limites. Troisième tirage, 328 pages, Éditions Eyrolles. Paris, 1994.

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

BARBOSA, M.P. Uma Contribuição Experimental e Numérica sobre Estruturas de Concreto Armado de Elevado Desempenho: Estudo da Aderência-Ancoragem e o comportamento de Vigas Fletidas. Ilha Solteira,1998. 174pps. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

CAETANO, Luciane Fonseca. Estudo do Comportamento da Aderência de Elementos de Concreto Armado em Condições Extremas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

CHAPMAN, R., SHAH, S., “Early-age bond strength in reinforced concrete”, ACI Materials Journal, v. 84, n. 6 (Nov-Dec), pp. 501-510,1987.

CLARK, A. P. .Bond of concrete reinforcing bars. ACI Journal,Proc. Vol. 46, November, pp. 161-184, 1949.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, Bond action and bondbehaviour of reinforcement, Paris, Bulletin d’information, 151, 1982.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB – FIP Model Code 1990.Bulletin d’information n. 204, July, 1991.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, Recommandation RC 5: Bondtest reinforcement steel - BEAM TEST, Concrete Reinforcement Technology,Paris, Georgi Publishing Company, 1983.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, Reinforcement, Bond andAncorage, Paris, Bulletin d’information, 118, 1979

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, Structural Concrete, Paris,Bulletin n.2, July, 1999.

COSTA, Odair José; BARBOSA, Mônica Pinto; SALLES, Flávio Moreira. Avaliação da Zona de Interface entre o Aço e o Concreto Auto-Adensável Através dos Ensaio de Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial das Barras de Aço. Anais do 48º Congresso Brasileiro Do Concreto, Rio de Janeiro, 22 set. 2006.

COUTO, Iara Andrade. Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

CUNHA, J.C. et al. Projeto aderência aço-concreto CEFET-MG/IABr. Ensaio de barras lisas-Relatório final. 49p. Junho de 2012.

DARWIN, D.; Tholen, M; Idun, E; Zuo, J. Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars. Structural Engineering and Engineering Materials, SL Report 95-3, Lawrence, KS, USA, mar. 1995.

DUCATTI, V.A. (1993). Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura. São Paulo. 273p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DUCATTI, V.A. (1993). Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura. São Paulo. 273p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DUCATTI, Vitor Antônio; AGOPYAN, Vahan. Concreto de Elevado Desempenho: Estudo da Aderência com Armadura. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP-113. São Paulo, 1993.

ELIGEHAUSEN, R., POPOV, E. P., BERTERO, V. V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations, Report n. UCB/ EERC – 83/23, University of California, Berkeley, Oct, 1983.

ELIGEHAUSEN, R., VLIET, A. B., 1999, “Bond behaviour and models”, CEB-Structural Concrete, Bulletin 1, (July), pp. 127-187.

Eurocode 2 (EC2) ; “Design of concrete structures – Part1-1: General rules and rules for buildings”, Dezembro, 2004.

EUROPEAN STANDARD. EUROCODE 2: Design Of Concrete Structures - Part 1: General Rules And Rules For Buildings. Bruxelas, Novembro 2002.

Ferguson, P.M.; Turpin R.D.; Thompson, J.N. (1954) “Minimum bar spacing as a function of bond and shear strength”, ACI Journal, Vol.50, nº10, pp. 869-888.

FERNANDES, Rejane, M.. A Influência das Ações Repetidas na Aderência Aço Concreto. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

FIB Bulletin 10; “Bond of Reinforcement in Concrete”, State-of-the-artReport, 2000.

FRANÇA, Marcela Bruna Braga. Estudo Experimental da Aderência Aço-Concreto para Barras Finas de Aço CA-50. 2010. 80 f. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG, Belo Horizonte, 2010.

FRANÇA, V.H. (2004) Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha. 128p.Dissertação de mestrado. UNESP. Ilha Solteira, SP.

FUSCO, P. B.. Técnica de Armar as Estruturas de Concreto. São Paulo, PINI, 1995.

GHIO, V.; MONTEIRO, P.J.M. (1997). Bond Strength of Reinforcing Bars in Reinforced Shotcrete. ACI Materials Journal.

GOTO, Y. Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars. Journal of the ACI, (Apr), pp. 244-251, 1971.

JACINTHO, A. E. P. DE A., PIMENTEL, L. L., BARBOSA, M.P., FONTANINI, P.S.P., Aderência aço concreto : uma contribuição ao estudo do método APULOT usando concreto com borracha, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2014.

JIAN, D. H., SHAH, S., P.; ANDONIAN, A. T. Study of the transfer of tensile forces by bond. ACI Journal, 1984.

KEMP, E. L. Bond in reinforced concrete: behavior and design criteria. ACI Journal. Proc. Vol. 83, January-February, pp. 50-57, 1986.

CHU, S.H., KWAN, A.K.H (2018). A new method for pull out test of reinforcing bars in plain and fibre reinforced concrete. Engineering Structures. Volume 164, Pages 82-9. 2018.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. (1977). Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. VI. Rio de Janeiro: Interciência.

LORRAIN, M.; PINTO BARBOSA, M., Controle de Qualidade dos Concretos Estruturais:Ensaio de Aderência Aço-Concreto. Revista Concreto. Julho-Agosto-Set 2008, pgs 55-60.

MACEDO, B. N. T. (2016) Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras finas para revisão da NBR 7477. 2015.86f.Projeto final (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MAINS, R.. Measurement of distribution of tensile and bond stress along reinforcing bars. Journal of ACI. (Nov), pp. 225-252, 1951.

MARTIN, H.; NOAKOWSKI, P., “Verbundverhalten von Betonstahl Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen”, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 319, pps. 99 – 175, 1981.

MELO, João Paulo Marinho de. Avaliação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras Finas de Aço CA-60 Lisas. 2011. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Título de Engenheiro de Produção Civil) - Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG, Belo Horizonte, 2011.

MIRZA, S. M., HOUDE, J. Study bond stress-slip relationship in reinforced concrete. Journal of the ACI. v. 76, n. 1, (Jan), pp. 19-46, 1979.

MONTEIRO, P. J. M., Microstructure of Concrete and its influence on the mechanical properties, California 1985. 197pps.Tese (Doutorado).. University of California, Berkeley.

MONTOYA, P.J., MESEGUER, A.G. e CABRE, F.M. Hormigon Armado. Madri, 1974.

NETO, Joaquim Marins. (2006). Análise do deslizamento entre aço e concreto. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas - Unicamp. Campinas.

OLIVEIRA, M. J. E. de; ASSIS, C. S. de. (2006). Aderência do aço-concreto produzido com agregado reciclado. São Paulo, v. 4, n. 1, p. 135-141, jan./jun, 2006.

PERRY, E. S.; THOMPSON, J. N. (1996). Bond stress distribution on reinforcing steel in beams and pullout specimens; ACI Journal. Proc. Vol. 63, August, pp. 865-875.

RECOMENDACIONES INTERNACIONALES. CEB FIP 1970. Publicadas por La Cement and Concrete Association. Londres, 1970.

REHM, G. (1961). The basics Principales of the Bond Between Steel and Concrete. C &CA Library Translation n.134 (Über die Grundlagem des Verbundes Zwischen Stahl und Beton. Deutscher Ausschuss Fur Stahlbeton, Heft 138, p.59, 1961), 1968.

REYES; Fredy Enrique Garzón. EL DEBS, Ana Lúcia Homce de Cresce. Deterioração da Tensão de Aderência entre Barras de Aço e Concretos (CC, CAA E CAAFA), Sob Influência de Ações Cíclicas. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 11, n. 50, p. 91-112, 2009.

REYNOLDS, G. C., BEDDY, A., “Bond Strength of deformed bars”, In: Bond and Concrete 23°, Londres, P. Bartoz, 1982.

RIBEIRO, J. L. D. (1985). Análise Experimental dos fatores que influenciam a aderência em barras nervuradas. Tese de Mestrado. CPGEC/ UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

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

RILEM/CEB/FIP; “Bond Test for Reinforcement Steel: 1. Beam test (RC5), 2. Pull-Out Test (RC6)”, CEB Manual on Concrete Reinforcement technology, 1983.

ROSALES, Y. M., Análise numérico - experimental do comportamento da aderência aço – concreto, UnB, 2016.

ROSSI, Nelson (2002). Resistência de Aderência aço-concreto: Efeitos da resistência à compressão do concreto e do comprimento de aderência. Dissertação de Mestrado Unicamp. Campinas.

SANTANA, L. Abi-Samara (2004). Estudo da Aderência entre concretos de diferentes idades. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campo dos Goytacazes.

SARTORI, A. L., PINHEIRO, L. M., DA SILVA, R. M., FREITAS, S. B., T. G. CESAR, Aderência entre barras de aço e concreto leve com pérolas de EPS, UNASP, EESC-USP, 2015

SIMPLÍCIO, M.A.S. (2008). Estudo sobre a aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras. 263p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SORETZ, S., “A comparison of beam test and pull-out test”, *Matériaux et Constructions*, v. 5, n. 28, (July-Aug), pp. 261-264, 1972.

SOROUSHIAN, P., CHOI, K., 1989, “Local Bond of Deformed Bars with Different Diameters in Confined Concrete”, *ACI Structural Journal*, v.86, n. 2, (Mar-Apr), pp. 217-222.

SOROUSHIAN, P., CHOI, K., PARK, G., ASLANI, F., “Bond of deformed bars to concrete: effects to confinement and strength of concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 3, (May/June), pp. 227-232, 1991.

TASSIOS, T. (1979). Properties of Bond Between Concrete and Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions. In: *CEB - Symposium*, v. 1, (CEB - Bulletin d'information n. 131), Rome, pp. 67-122.

TUTIKIAN, B. F., HILGERT, T., HOWLAND, J. J., Comparativo da aderência do concreto com aço sem proteção e o aço galvanizado a quente, Unisinos e Instituto Superior Politécnico “Jose Antonio Echeverría”, 2014.

UNE 36740; “Determinación de la adherencia de las barras y alambres de acero para armaduras de hormigón armado – Ensayo de la viga”, AENOR, Fevereiro, 1998.

VALE SILVA, Bruno do; BARBOSA, Mônica Pinto; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da; LORRAIN, Michel; BOSCO, Victor Ivan Dal. Correlação Entre a Tensão Última de Aderência e a Resistência do Concreto Usando Ensaio “APULOT”:

Avaliação do Efeito de Variação do Cobrimento do Concreto ao Redor da Barra de Aço. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, 2011.

VIEIRA, F.M.P. (1994). Estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microssílica. 107p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

WATSTEIN (1941). D. .Bond stress in concrete pull-out specimens; ACI Journal, Proc. Vol. 38, September, pp. 37-50.

Wernisch G.R.; "Bond Studies of Different Types of Reinforcing Bars", ACI-Journal, Vol 34, Detroit, 1937, pp.145-164.

Anexo A – Resultados experimentais do ensaio de arrancamento

TABELA - A1 - Ensaio de Arrancamento - Lisas-3.4 mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Sma x
M9-1	1,10	1,38	1,68	1,39	1,74	3,25
M9-2	0,14	0,41	2,09	0,88	2,15	3,88
M9-3	0,99	1,05	1,13	1,06	1,24	5,30
M9-4	0,14	1,10	2,20	1,15	2,48	3,57
M9-5	1,08	1,73	2,12	1,64	2,19	4,04
M9-6	1,18	1,53	2,37	1,69	2,62	5,33
τ MÉDIA (Mpa)	0,77	1,20	1,93	1,30	2,07	4,23
Desvio	0,50	0,46	0,45	0,33	0,51	0,88
CV(%)	64,15	38,56	23,53	25,23	24,55	20,9 3

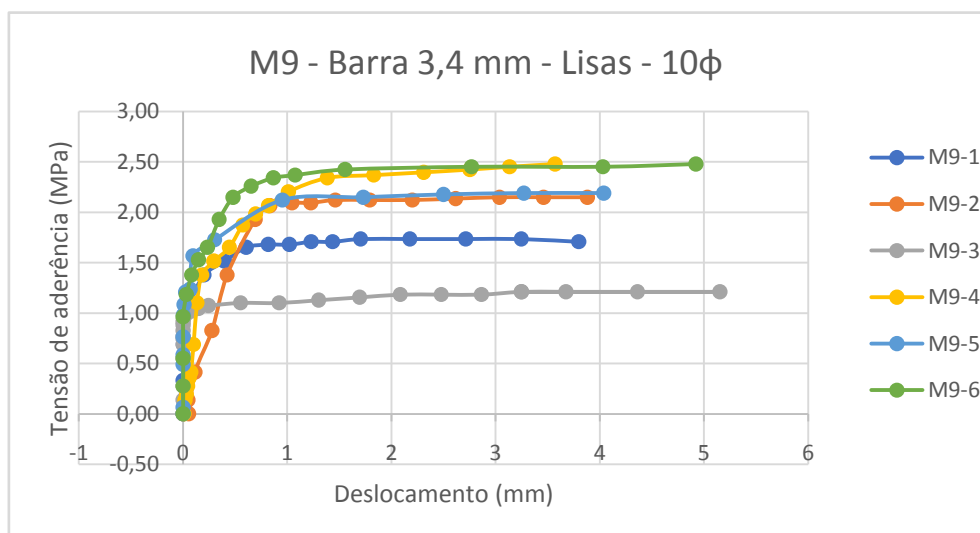


TABELA -A2 - Ensaio de Arrancamento - Lisas-4.2 mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M10-1	0,72	0,90	0,99	0,87	1,12	2,69
M10-2	0,70	0,27	1,05	0,67	1,05	2,10
M10-3	0,22	0,22	1,17	0,54	1,44	1,10
M10-4	0,81	1,17	1,26	1,08	1,26	2,07
M10-5	0,27	0,63	1,21	0,70	1,32	1,98
M10-6	0,45	0,60	1,08	0,71	1,08	2,17
τ MÉDIA (Mpa)	0,53	0,63	1,13	0,76	1,21	2,02
Desvio	0,25	0,37	0,10	0,19	0,16	0,52
CV(%)	47,66	57,97	9,21	24,89	12,79	25,61

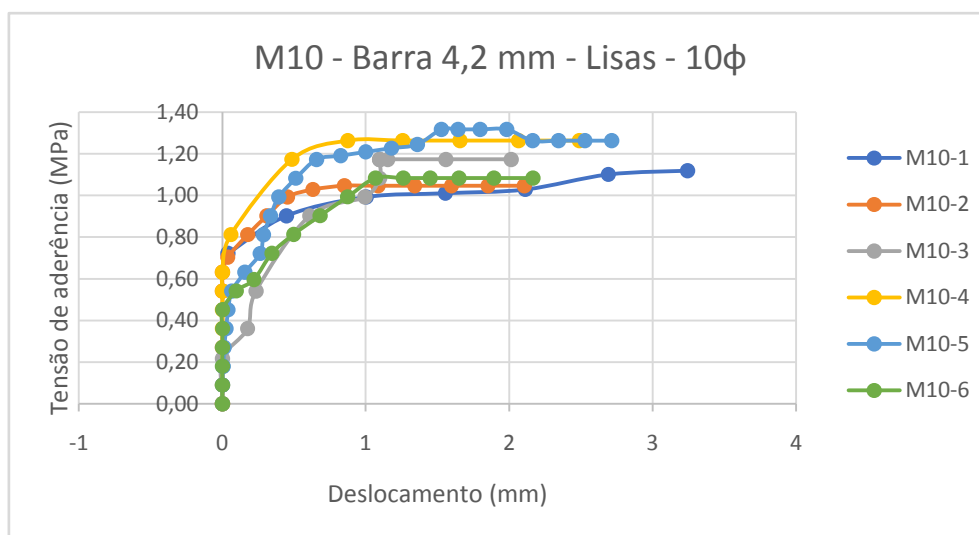


TABELA - A3 - Ensaio de Arrancamento - Nervuradas-3.4 mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ ULTIMA (Mpa)	Smax
M5-1	3,53	4,32	6,48	4,78	6,48	1,09
M5-2	2,44	5,12	7,23	4,93	7,29	1,05
M5-3	2,47	3,26	4,83	3,52	6,63	1,62
M5-4						
M5-5	3,47	3,49	4,69	3,88	4,69	1,01
M5-6						
τ MÉDIA (Mpa)	2,98	4,05	5,80	4,28	6,27	1,19
Desvio	0,60	0,85	1,25	0,68	1,12	0,29
CV(%)	20,28	20,96	21,53	15,99	17,78	24,36

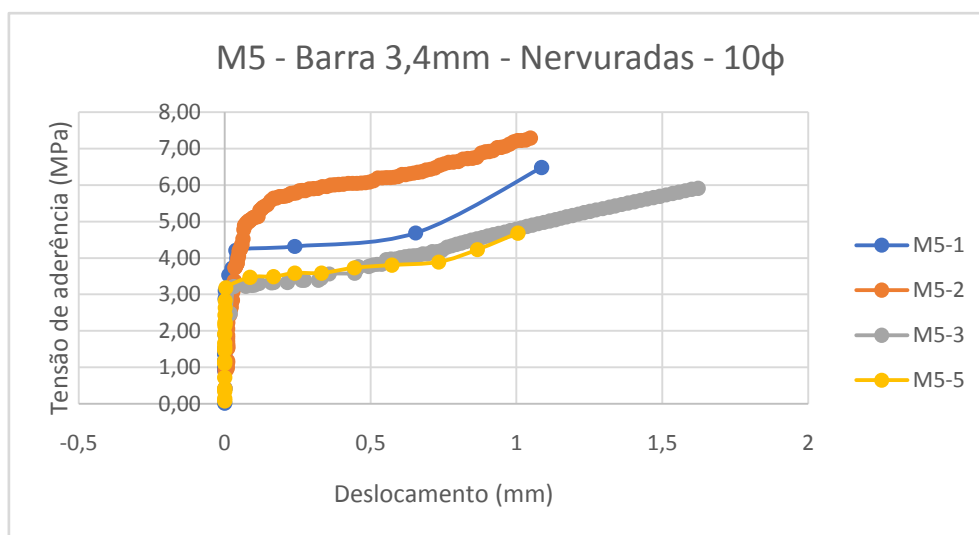


TABELA - A4 - Ensaio de Arrancamento - Nervuradas-4.2 mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M3-1	3,24	3,36	3,63	3,41	3,63	1,02
M3-2	3,50	3,56	3,91	3,66	3,91	1,30
M3-3	0,89	2,40	4,11	2,46	4,14	1,20
M3-4	1,96	2,13	2,77	2,29	3,22	1,31
M3-5	1,89	2,20	3,76	2,61	3,76	0,97
τ MÉDIA (Mpa)	2,29	2,73	3,63	2,89	3,73	1,16
Desvio	1,07	0,68	0,52	0,61	0,35	0,16
CV(%)	46,75	24,84	14,20	21,08	9,26	13,50

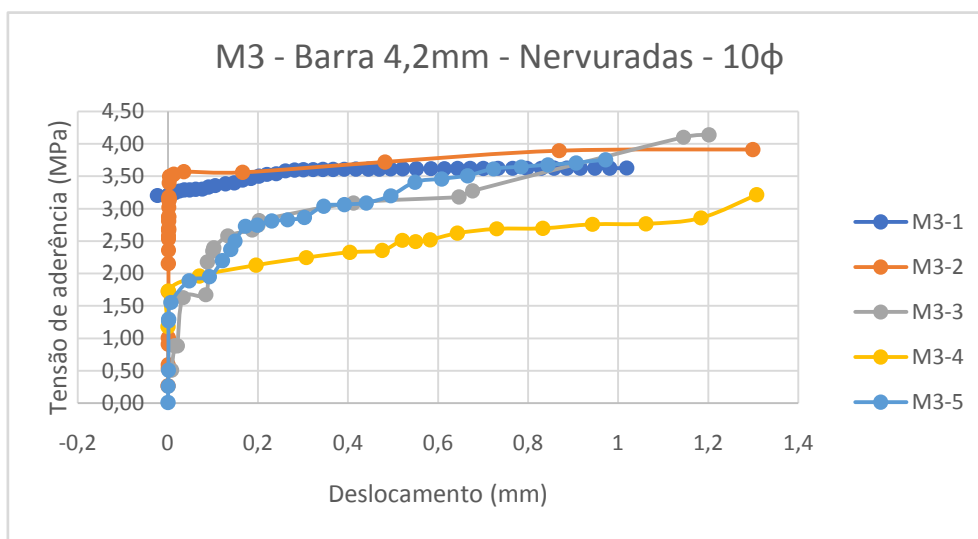


TABELA -A5 - Ensaio de Arrancamento - 6.0 mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M6-1	2,43	3,95	5,56	3,98	5,70	1,04
M6-2	2,24	3,21	5,58	3,68	5,83	1,48
M6-3	3,08	3,40	4,07	3,52	4,14	1,35
M6-4	3,41	3,68	4,44	3,84	4,90	1,38
M6-5	3,69	3,75	4,85	4,10	4,85	0,89
M6-6	2,00	2,90	6,91	3,94	6,96	1,05
τ MÉDIA (Mpa)	2,81	3,48	5,24	3,84	5,40	1,20
Desvio	0,68	0,39	1,02	0,21	0,99	0,24
CV(%)	24,29	11,13	19,42	5,54	18,27	19,78

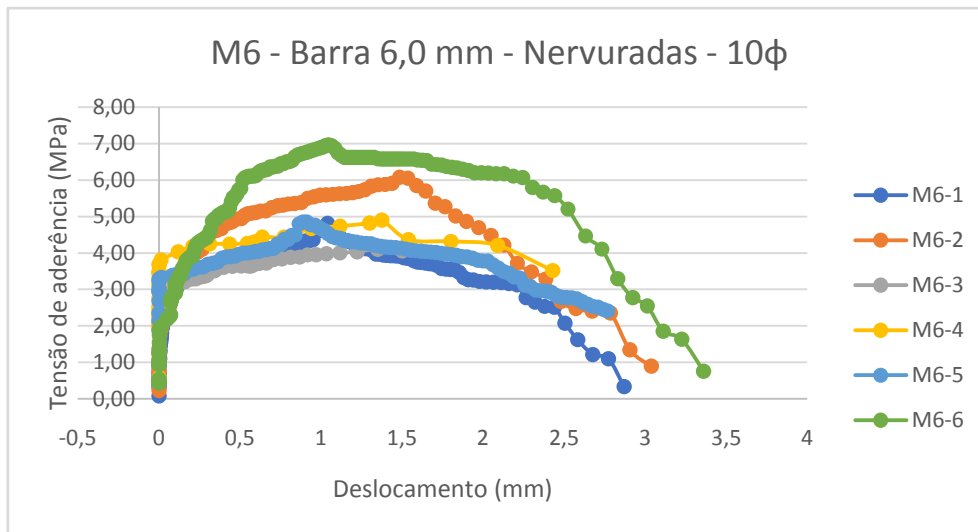


TABELA - A6 - Ensaio de Arrancamento - 6.3 mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M1-1	6,73	11,21	16,25	11,40	16,68	1,02
M1-2	8,28	9,95	10,57	9,60	12,19	1,01
M1-4	7,01	9,39	11,99	9,47	12,79	1,00
M1-6	5,16	8,34	8,36	7,29	11,76	1,02
M1-7	4,64	6,22	11,75	7,53	12,65	1,00
M1-8	8,98	11,40	13,59	11,32	14,25	1,05
τ MÉDIA (Mpa)	6,80	9,42	12,08	9,43	13,39	1,02
Desvio	1,70	1,94	2,68	1,77	1,82	0,02
CV(%)	24,94	20,59	22,18	18,76	13,60	1,70

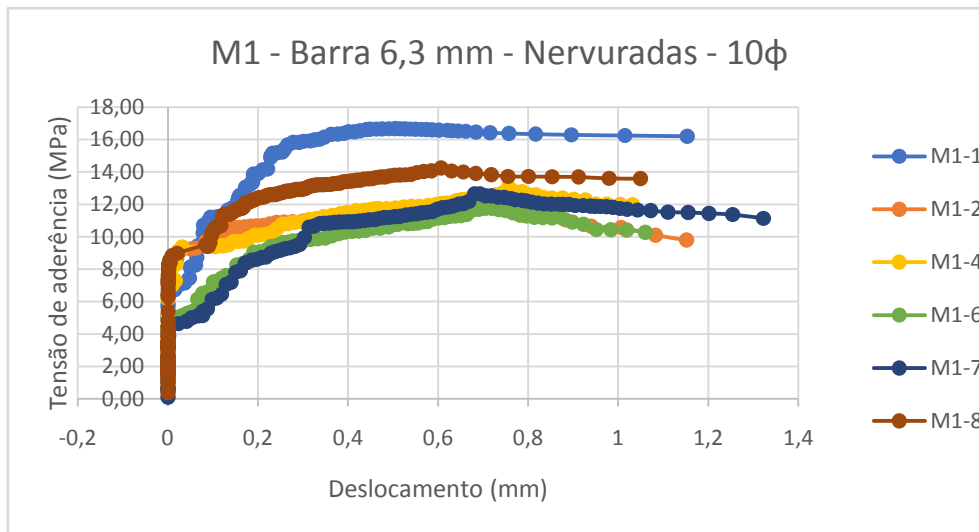


TABELA - A7 - Ensaio de Arrancamento -9.5mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M4-1	5,66	8,13	12,00	8,60	12,43	1,04
M4-2	5,51	5,75	11,55	7,60	13,04	2,09
M4-3	8,97	11,29	11,65	10,64	14,17	1,33
M4-4	6,98	7,26	13,59	9,28	15,28	1,81
M4-5	7,52	7,74	11,93	9,06	13,38	1,84
M4-6	9,83	10,53	16,05	12,14	16,55	1,57
τ MÉDIA (Mpa)	7,41	8,45	12,80	9,55	14,14	1,61
Desvio	1,74	2,08	1,76	1,61	1,54	0,38
CV(%)	23,50	24,66	13,74	16,80	10,87	23,61

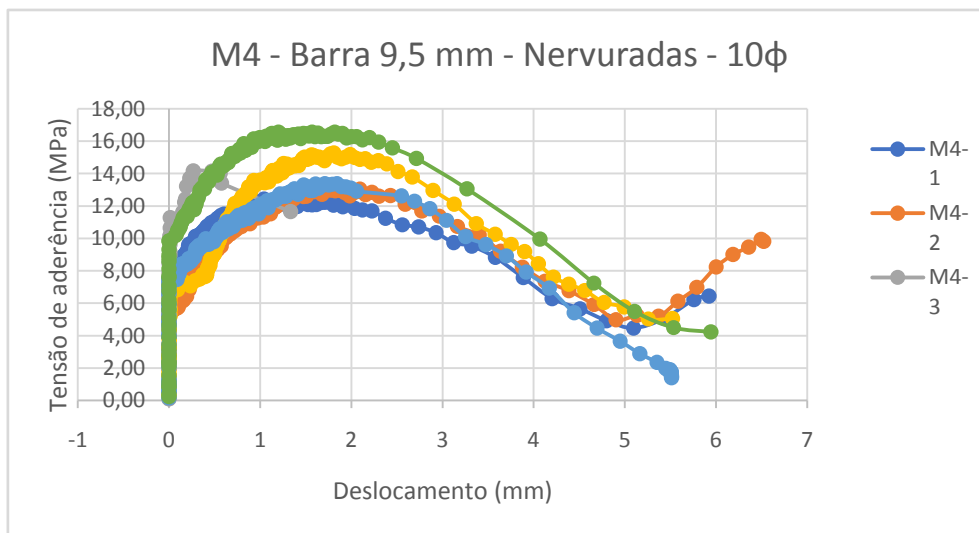


TABELA - A8 - Ensaio de Arrancamento -10.0mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M2-1	12,73	13,18	14,79	13,57	14,87	0,96
M2-2	12,25	13,31	12,74	12,76	13,73	0,84
M2-4	6,02	9,22	15,92	10,39	16,47	0,81
M2-5	9,29	10,03	15,09	11,47	15,19	1,09
M2-6	11,69	11,76	12,62	12,02	12,81	1,23
M2-8	11,80	12,39	13,71	12,63	13,71	0,95
τ MÉDIA (Mpa)	10,63	11,65	14,15	12,14	14,46	0,98
Desvio	2,55	1,69	1,34	1,11	1,31	0,16
CV(%)	24,01	14,47	9,47	9,18	9,04	16,16

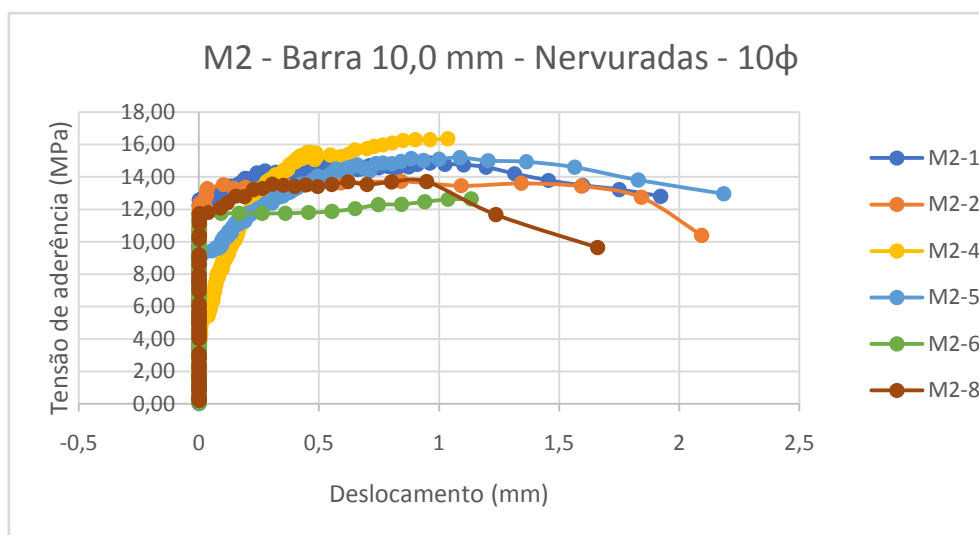


TABELA - A9 - Ensaio de Arrancamento -20.0mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M7-1	5,03	6,41	18,37	9,94	19,54	1,20
M7-2	5,38	7,53	16,95	9,95	16,95	0,86
M7-3	4,70	8,54	17,44	10,23	17,44	1,00
M7-4	5,80	6,07	19,91	10,59	21,43	1,21
M7-5	8,70	9,54	16,58	11,61	16,58	0,63
M7-6	6,77	11,47	17,70	11,98	17,70	0,82
τ MÉDIA (Mpa)	6,06	8,26	17,83	10,72	18,27	0,95
Desvio	1,48	2,04	1,19	0,88	1,86	0,23
CV(%)	24,38	24,70	6,69	8,17	10,16	23,80

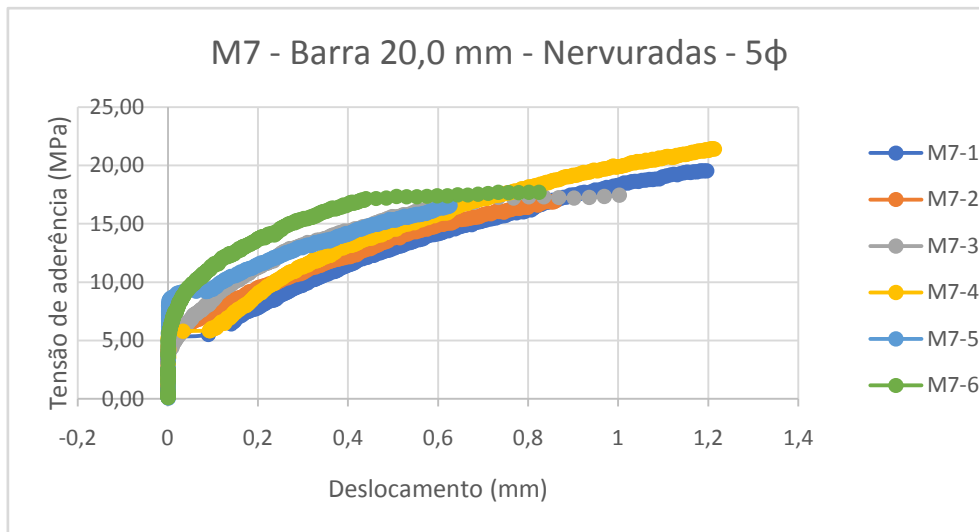


TABELA - A10 - Ensaio de Arrancamento -25.0mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M8-1	5,00	7,33	13,99	8,77	13,99	0,55
M8-2	4,84	7,13	15,48	9,15	15,48	0,74
M8-3	5,21	8,38	13,90	9,16	13,90	0,52
M8-4	3,80	5,44	11,30	6,85	11,30	0,41
M8-5	4,52	7,07	10,38	7,32	10,38	0,78
M8-6	4,90	7,75	13,09	8,58	13,09	0,54
τ MÉDIA (Mpa)	4,71	7,18	13,02	8,31	13,02	0,59
Desvio	0,50	0,98	1,88	0,98	1,88	0,14
CV(%)	10,58	13,71	14,46	11,84	14,46	24,12

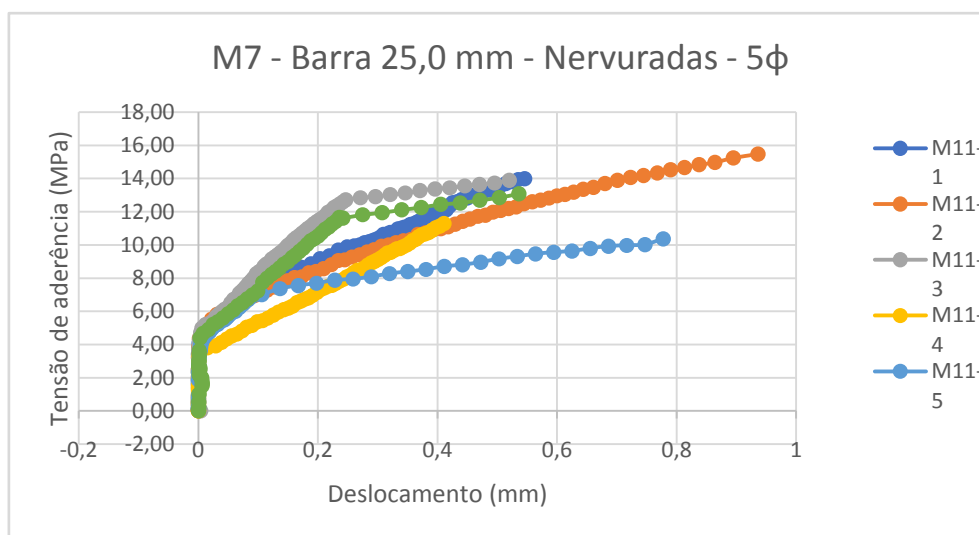


TABELA - A11 - Ensaio de Arrancamento -32.0mm - 20x20x20						
CP'S	$\Delta = 0,01$ mm	$\Delta = 0,1$ mm	$\Delta = 1$ mm	τ MÉDIA (Mpa)	τ MAX (Mpa)	Smax
M8-1	4,59	4,74	5,21	4,85	5,21	0,13
M8-2	5,96	7,25	7,25	6,82	7,25	0,11
M8-3	5,87	5,95	5,95	5,93	5,95	0,09
M8-4	5,43	7,42	7,54	6,80	7,54	0,10
M8-5	5,02	7,37	7,48	6,62	7,48	0,17
M8-6	5,32	5,50	5,50	5,44	5,50	0,15
τ MÉDIA (Mpa)	5,37	6,37	6,49	6,08	6,49	0,13
Desvio	0,52	1,14	1,05	0,81	1,05	0,03
CV(%)	9,7	17,9	16,3	13,4	16,3	23,0

