

MARCELA PALHARES MIRANDA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS
CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA NO ENSAIO
DE ARRANCAMENTO (*PULL-OUT TEST*)**

Orientadora: Prof.^a Dra. Eliene Pires Carvalho

Belo Horizonte, 2018

MARCELA PALHARES MIRANDA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS
CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA NO ENSAIO
DE ARRANCAMENTO (*PULL-OUT TEST*)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

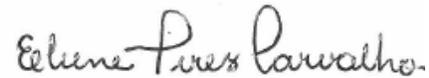
Orientadora: Prof.^a Dra. Eliene Pires Carvalho

Belo Horizonte, Fevereiro de 2018

MARCELA PALHARES MIRANDA

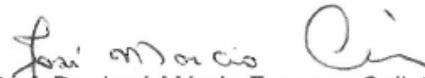
**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS
CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA NO ENSAIO DE
ARRANCAMENTO (PULL-OUT TEST)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil



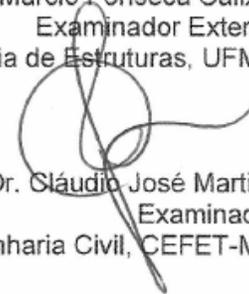
Prof.^a Dra. Eliene Pires Carvalho
Orientadora

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. José Márcio Fonseca Calixto
Examinador Externo

Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG



Prof. Dr. Cláudio José Martins
Examinador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Nilton da Silva Maia
Examinador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Belo Horizonte, 06 de Fevereiro de 2018

M672a Miranda, Marcela Palhares
Avaliação experimental da influência das características do corpo de prova no ensaio de arrancamento (Pull-out test). / Marcela Palhares Miranda. -- Belo Horizonte, 2018.
xiii, 84 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2018.
Orientador: Profa. Dra. Eliene Pires Carvalho.

Bibliografia

1. Concreto Armado. 2. Projeto Estrutural. 3. Ancoragem por Aderência. I. Carvalho, Eliene Pires. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 693.54

Elaboração da ficha catalográfica pela Biblioteca-Campus II / CEFET-MG

“Só é útil o conhecimento que nos torna melhores”
(Sócrates)

Agradecimentos

Agradeço a todos que colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

À DEUS e à minha família, pelo apoio, suporte e motivação.

À professora Dra. Eliene, pelos ensinamentos, orientação e a grande oportunidade. Aos professores Dr. Cláudio (DEC-CEFET-MG), Dr. José Calixto (DEES-UFMG) e ao Dr. Nilton (DEC-CEFET-MG) pelas colaborações e sugestões para enriquecimento deste trabalho.

Ao Ivan e a todos os colaboradores dos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG que auxiliaram nas moldagens e ensaios empregados neste trabalho.

Aos meus amigos, em especial à Danielle, Guilherme, Pedro e aos demais que auxiliaram para a execução desta pesquisa. E a todos que participaram indiretamente, contribuindo com incentivo e auxílio.

As empresas responsáveis pelo fornecimento dos materiais utilizados neste trabalho:

Belgo Bekaert Arames pelo fornecimento das barras de aço CA-50;

BetonMix e Mineração Santiago pelo fornecimento dos agregados,

e

MC-Bauchemie pelo fornecimento do aditivo superplastificante.

Ao CEFET-MG e a CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

A aderência entre aço e concreto é a propriedade que garante viabilidade das estruturas de concreto armado, impedindo que as barras de aço deslizem no interior do concreto. A avaliação da aderência é realizada por meio de ensaios mecânicos, sendo o Ensaio de Arrancamento o mais utilizado em estudos sobre a aderência. A geometria do corpo de prova (CP) do ensaio de arrancamento é um parâmetro em destaque na literatura, já que estudos indicam melhorias na distribuição de tensões no interior do corpo de prova com geometria cilíndrica. No que diz respeito ao diâmetro das barras, poucos estudos avaliam o fenômeno considerando apenas as barras finas de aço, que apresentam destaque na construção civil. Dessa forma, este trabalho avaliou a aderência entre barras finas de aço CA-50 (6,3; 8,0 e 10 mm) e concreto C30. Foi adotado o ensaio de arrancamento, utilizando corpos de prova cúbicos de dimensões (20x20) cm e cilíndricos de dimensões (15x15) cm, com comprimentos de ancoragem das barras iguais a 10ϕ .

As tensões de aderência obtidas para a geometria cilíndrica foram mais próximas aos valores teóricos, em comparação aos modelos cúbicos, e apresentaram baixa variabilidade. Todos os corpos de prova apresentaram ruptura por arrancamento, conforme indicou a avaliação analítica entre as tensões experimentais e teóricas. O cálculo do parâmetro do coeficiente de conformação superficial, a partir de dados de ensaio, apontou um ganho de desempenho de aderência para as barras estudadas, já que o valor obtido foi superior ao prescrito pela norma ABNT NBR 7480 (2007).

Palavras chave

Aderência, Ensaio de Arrancamento, Barras finas de aço, Geometria dos corpos de prova.

Abstract

The bond between steel and concrete is an essential property for the existence of reinforced concrete structures, avoiding that steel bars slip inside concrete. The evaluation of bond is carried out through mechanical test and the Pull-out Test is the most used technique in bond studies. The specimens geometry selection for this test is a relevant parameter in literature, since some studies have already shown best stress distributions when cylindrical specimens are used. Concerning the bars diameters, few studies have evaluated the bond phenomenon considering the case that only thin steel bars are used for concrete reinforcement, which is usually adopted in civil construction. Therefore, this work evaluated the bond between thin steel bars CA-50 (6.3, 8.0 and 10 mm) and concrete C30, by utilizing the Pull-out Test with cubic (20x20) cm and cylindrical (15x15) cm specimens and anchorage length equals 10ϕ .

The bond stresses for cylindrical geometry were closer to theoretical values than cubic specimens and presented the lowest variability. All specimens have presented pullout failure as indicated the analytical evaluation between experimental stresses and theoretical stresses. The calculus of surface conformation coefficient, using the results from Pull-out Test and cylinder splitting tests showed a gain of bond performance for the studied bars when compared against the prescribe normative values (ABNT NBR 7480 (2007)).

Keywords

Bond, Pull-out Test, Thin steel bars, Geometry specimens.

Lista de figuras

Figura 1-1: Comprimento de ancoragem reto l na armação de arranque de pilares	1
Figura 1-2: Modelo de corpo de prova do ensaio de barras confinadas - ABNT NBR 7477 (1982).	3
Figura 1-3: Representação esquemática do corpo de prova do ensaio de arrancamento.....	4
Figura 2-1: Desenvolvimento das tensões de aderência.	8
Figura 2-2: Aderência por atrito (P_t : Força de retração do concreto; R_{b2} : Força de tração; τ_b : Tensão de aderência).	10
Figura 2-3: Aderência mecânica, em barras lisas e nervuradas (R_{b3} : Força de tração).....	10
Figura 2-4: Ensaio brasileiro de barras confinadas.....	11
Figura 2-5: Ensaio de vigas rotuladas (Beam Test) – (Medidas em centímetros).....	11
Figura 2-6: Corpos de prova para ensaio de arrancamento e suas variações de tensão, para os respectivos comprimento de ancoragem. .	12
Figura 2-7: Ensaio de arrancamento (Pull Out Tets).....	13
Figura 2-8: Características do corpo de prova para o ensaio de arrancamento.....	14
Figura 2-9: Correlação entre τ_1 e Δ em aços para concreto lisos e nervurados.	14
Figura 2-10: Ensaio de arrancamento. (a) Força de tração aplicada menor que força de tração última (arrancamento). (b) Força de tração aplicada igual a força de tração última (arrancamento).....	15
Figura 2-11: Formulação da tensão de aderência pelo ensaio de arrancamento.....	16
Figura 2-12: Esforços reais de ancoragem.	17
Figura 2-13: Transferência de esforços por aderência.	18
Figura 2-14 : Fendilhamento longitudinal do concreto.	18
Figura 2-15: Comportamento das barras lisas e das barras nervuradas no ensaio de arrancamento.	19
Figura 2-16: Ruptura por arrancamento (a) e por fendilhamento (b)	20
Figura 2-17: Ruptura por arrancamento, concreto confinado.	21
Figura 2-18: Ruptura por fendilhamento, concreto não confinado.	21
Figura 2-19: Ruptura do corpo de prova por fendilhamento.	22
Figura 2-20: Relação analítica tensão-deslizamento – Aderência.	23
Figura 2-21: Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais, devido à segregação e acumulação de água.	25
Figura 2-22: Características dos corpos de prova cilíndricos para o ensaio de arrancamento.....	28
Figura 2-23: Dimensões do corpo de prova do ensaio de arrancamento (Dimensões em mm).....	32

Figura 2-24: Dimensões do molde cilíndrico para o ensaio de arrancamento.....	32
Figura 2-25: Características do molde para o ensaio de arrancamento (Dimensões em mm).....	34
Figura 2-26: Moldes para o ensaio de arrancamento (a) Ensaio comum. (b) Análise do efeito corrosivo.....	34
Figura 2-27: Características do molde cilíndrico para o ensaio de arrancamento.....	37
Figura 3-1 (a) (b): Curvas granulométricas dos agregados	40
Figura 3-2: Barras de aço nervuradas CA-50.	41
Figura 3-3: Características geométricas das nervuras das barras de aço CA-50 segundo as prescrições da ABNT NBR 7480 (2007).....	42
Figura 3-4: Ensaio para determinação da resistência do concreto à compressão – ABNT NBR 5739 (2007b).	43
Figura 3-5: Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral – ABNT NBR 7222 (2011).	43
Figura 3-6: Desenvolvimento do ensaio de caracterização das barras - ABNT NBR 6892 (2013)	44
Figura 3-7 - (a), (b): Formas de madeira para CP cúbico.	46
Figura 3-8 (a), (b): Fôrmas metálicas para CP cilíndrico	46
Figura 3-9 (a), (b): Esquema de concretagem dos CP's.....	47
Figura 3-10: (a) Máquina para ensaios. (b) Suporte para posicionamento dos corpos de prova do ensaio de arrancamento.	49
Figura 3-11: (a) Execução do ensaio de arrancamento. (b) Transdutor de deslocamentos.....	50
Figura 3-12: Cobrimento de concreto para os corpos de prova cilíndricos do ensaio.	51
Figura 4-1: Erros associados as médias das tensões de aderência - Geometrias cúbica e cilíndrica.....	56
Figura 4-2: Resultados das médias das tensões de aderência – Geometrias cúbica e cilíndrica.	57
Figura 4-3: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 6,3 mm – CP's cúbicos.	59
Figura 4-4: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 6,3 mm – CP cilíndrico.....	59
Figura 4-5: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 6,3_R mm – CP's cúbicos.....	60
Figura 4-6: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 6,3_R mm – CP cilíndrico.	60
Figura 4-7: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 8,0 mm – CP cúbico.....	61
Figura 4-8: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 8,0 mm – CP cilíndrico.....	61
Figura 4-9: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 10 mm – CP cúbico.....	62
Figura 4-10: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 10 mm – CP cilíndrico.....	62

Figura 4-11: Valores comparativos para o coeficiente de conformação superficial (η) calculado	67
Figura 5-1: Bulbo de tensões – Diâmetro 6,3 mm.....	68
Figura 5-2: Bulbo de tensões – Diâmetro 10 mm.....	69

Lista de Tabelas

Tabela 1-1: Coeficiente de conformação superficial (η)	2
Tabela 2-1: Coeficientes de variação (CV %), para as tensões últimas de aderência.	27
Tabela 2-2: Coeficientes de variação (CV-%) para tensões média de aderência.	30
Tabela 3-1: Resumo dos ensaios da pesquisa.....	39
Tabela 3-2: Características do traço utilizado para as concretagens.	40
Tabela 3-3: Propriedades geométricas das nervuras para as barras de aço CA-50.	42
Tabela 3-4: Planejamento dos ensaios de arrancamento.	44
Tabela 4-1: Resultados de caracterização das barras CA-50.	54
Tabela 4-2: Resultados de caracterização do concreto.	54
Tabela 4-3: Resultados do ensaio de arrancamento – diâmetro de 6,3 mm.	55
Tabela 4-4: Resultados do ensaio de arrancamento – diâmetro de 6,3_R mm.	55
Tabela 4-5: Resultados do ensaio de arrancamento – diâmetro de 8,0 mm.	55
Tabela 4-6: Resultados do ensaio de arrancamento – diâmetro de 10 mm.	56
Tabela 4-7: Resultados de tensões de aderência.	63
Tabela 4-8: Avaliação analítica das tensões ultimas de aderência:	64
Tabela 4-9: Avaliação analítica das tensões ultimas de aderência:	64
Tabela 4-10: Avaliação analítica das tensões ultima de aderência:	65
Tabela 4-11: Avaliação analítica das tensões ultima de aderência:	65
Tabela 4-12: Cobrimentos mínimos de concreto para garantir falha por arrancamento.	66
Tabela 4-13: Valores do coeficiente de conformação superficial (η) – CP cúbico.	66
Tabela 4-14: Valores do coeficiente de conformação superficial (η) – CP cilíndrico.....	66

Sumário

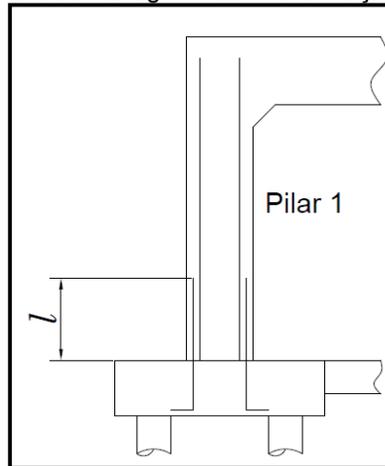
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	6
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1. Conceitos iniciais	7
2.2. Tipos de Aderência	9
2.3. Ensaios para a determinação da tensão de aderência	10
2.3.1. Ensaio de arrancamento direto (Pull Out Test) – EN:10080 (2005).....	12
2.4. O fenômeno da aderência nos ensaios de arrancamento	15
2.4.1. Modos de ruptura dos corpos de prova no ensaio de arrancamento.....	20
2.5. Critérios para a previsão das tensões de aderência (Avaliação analítica)	21
2.6. Pesquisas e estudos sobre aderência com o ensaio de arrancamento (<i>Pull Out Test</i>)	24
3. Materiais e Métodos	39
3.1. Materiais	39
3.1.1. Concreto.....	39
3.1.2. Barras de aço.....	41
3.2. Métodos	42
3.2.1. Caracterização do concreto.....	42
3.2.2. Caracterização das barras de aço.....	43
3.2.3. Ensaio de Arrancamento (Pull-out Test).....	44
3.2.3.1. Determinação do tamanho das amostras (n=número de repetições).....	44
3.2.3.2. Modelos para os ensaios.....	45
3.2.3.3. Sistema de aplicação de carga.....	48
3.2.4. Análise estatística dos resultados do ensaio de arrancamento 50	
3.2.5. Avaliação analítica da resistência de aderência e dos modos de ruptura dos corpos de prova do ensaio.....	51
3.2.6. Cálculo do coeficiente de conformação superficial a partir dos ensaos de arrancamento.....	53
4. Apresentação e Análise dos resultados	54
4.1. Caracterização dos materiais	54
4.1.1. Barras de aço.....	54
4.1.2. Concreto.....	54
4.2. Ensaio de Arrancamento	55

4.2.1.	Comparação dos valores de tensão de aderência obtidos no Pull-out Test com valores obtidos em ensaio de vigas rotuladas apresentados por Carvalho <i>et. al.</i> (2017)	63
4.2.2.	Avaliação analítica dos resultados de resistência de aderência e modos de ruptura dos corpos de prova no ensaio de arrancamento	64
4.2.3.	Cálculo do coeficiente de conformação superficial a partir dos resultados do ensaio de arrancamento	66
5.	Considerações Finais	68
5.1.	Conclusões	68
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	70
6.	Bibliografia	71
7.	ANEXOS	77
	ANEXO A – Teste de Normalidade¹	77
	ANEXO B – Análise de variância com um fator (ANOVA unidirecional)	81
	ANEXO C – Valores de F_c (Distribuição F - Bicaudal)	84

1. Introdução

O comportamento estrutural do concreto armado se deve ao desenvolvimento de forças de aderência na superfície entre concreto e aço. Dada a solicitação dos elementos estruturais, a aderência garante a transferência de tensões entre aço e concreto que ocorre ao longo de trechos da armadura, denominados de comprimentos de ancoragem (CARVALHO e FILHO, 2004). Segundo a norma ABNT NBR 6118 (2014) - Projetos de Estruturas de Concreto, Procedimentos - a ancoragem das armaduras deve ser realizada de maneira que os esforços a que estejam submetidas sejam totalmente transferidos ao concreto. Esta transferência pode ocorrer pela aderência, realizada por meio de um comprimento reto (Figura 1-1) ou com grande raio de curvatura ou por meio de dispositivos mecânicos ou ainda pela combinação de ambos.

Figura 1-1: Comprimento de ancoragem reto l na armação de arranque de pilares



Fonte: Adaptado Fusco (1995).

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), nos projetos estruturais de concreto armado o comprimento de ancoragem básico deve ser calculado segundo a equação 1.

$$l_b = \frac{\phi}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \geq 25\phi \quad (1)$$

Onde, ϕ o diâmetro da armadura (mm); f_{yd} a resistência de cálculo de escoamento da barra de aço (MPa) e f_{bd} a tensão de cálculo de aderência (MPa), que é determinada a pela equação 2.

$$f_{bd} = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * f_{ctd} \quad (2)$$

Onde:

η_1 : coeficiente relacionado ao tipo de armadura, assumindo os valores de 1,0 (barras lisas), 1,4 (barras entalhadas) ou 2,25 (barras nervuradas);

η_2 : coeficiente relacionado a posição da armadura durante a concretagem, assumindo os valores de 1,0 (situações de boa aderência) ou 0,7 (situações de má aderência);

η_3 : coeficiente relacionado ao diâmetro da armadura, assumindo os valores de 1,0 (para $\phi < 32$ mm) ou $(132 - \phi)/100$ (para $\phi \geq 32$ mm) e

f_{ctd} : resistência de cálculo do concreto a tração (MPa).

O parâmetro η_1 , com os valores apresentados na ABNT NBR 6118 (2014) para projetos de estruturas de concreto armado, está relacionado ao coeficiente de conformação superficial de barras (η) que é especificado pela ABNT NBR 7480 (2007) - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Os valores prescritos nesta norma (ABNT NBR 7480 (2007)), indicados na Tabela 1-1, são utilizados, em testes de qualidade, no processo de avaliação da conformidade das barras de aço produzidas no Brasil. Esta questão envolve, portanto, um método de ensaio e valores de referência experimentais que tragam segurança para a prescrição de valores de projeto.

Tabela 1-1: Coeficiente de conformação superficial (η)

ABNT NBR 7480 (2007)		
η		Tipo de barra
$\phi < 10$ mm	$\phi \geq 10$ mm	
1.0	1.0	Barras lisas
1.0	1.2	Barras entalhadas CA-60
1.0	1.5	Barras nervuradas CA-50

Fonte: ABNT NBR 7480 (2007).

Como apresentado na Tabela 1-1, os valores do parâmetro (η), a ser avaliado em testes de qualidade das barras de aço brasileiras, são considerados para barras com diâmetros inferiores ou superiores a 10 mm, admitindo o valor único e igual 1.0 para as barras consideradas finas ($\phi < 10$ mm), independente da conformação superficial do aço. Para obter-se o valor de (η) é prescrito o ensaio de barras confinadas, padronizado pela ABNT NBR 7477 (1982) - Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras de Concreto Armado – Método de Ensaio, Figura 1-2.

Segundo Barbosa (2001) e Carvalho *et al.* (2017), os resultados obtidos pelo ensaio determinado pela ABNT NBR 7477 (1982) apresentam elevada

variabilidade e erro associado, especialmente para barras finas, e também não atendem a ABNT NBR 7480 (2007), apresentando valores de conformação superficial inferiores ao que prescreve a norma. Portanto, este ensaio não consegue traduzir de forma adequada o coeficiente de conformação superficial e conseqüentemente do fenômeno da aderência.

Figura 1-2: Modelo de corpo de prova do ensaio de barras confinadas - ABNT NBR 7477 (1982).



Fonte: Ferreira (2012).

Para o estudo da aderência, outros ensaios são largamente utilizados, como o ensaio de arrancamento (*Pull Out Test*), descrito pela EN:10080 (2005), Figura 1-3. Ressalta-se que este é o ensaio mais utilizado em pesquisas sobre a aderência, devido sua facilidade de execução, comparado a outros ensaios, e também por compreender análises dos deslizamentos da armadura. Como poucos países apresentam normas com procedimentos padrões para a realização deste ensaio, as pesquisas com esta finalidade utilizam a referida norma para o desenvolvimento do ensaio, como ocorre também com os estudos brasileiros (ALMEIDA FILHO, 2006; BARBOSA, 2001; CARVALHO *et al.*, 2017; FRANÇA, 2010; LEONHARDT e MONNING, 1977; ROSALES *et al.* 2016; SHEN *et al.*, 2016; SONG *et al.*, 2015)

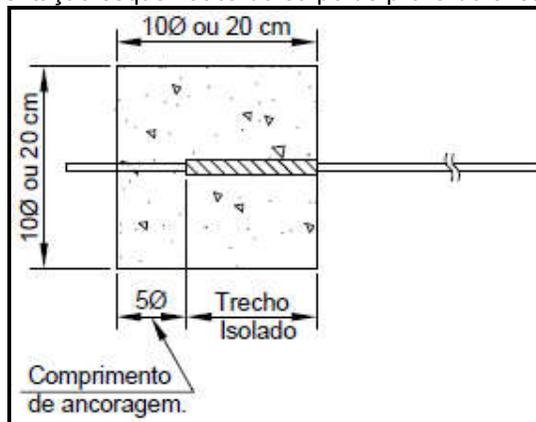
Destaca-se que a norma EN:10080 (2005) recomenda a utilização dos ensaios *Pull-out Test*, segundo a RILEM CEB FIP RC6 (1983), e *Beam Test*, segundo a RILEM CEB FIP RC5 (1982), como alternativa para a verificação das características de aderência requeridas às barras de aço, nervuradas e entalhadas. As prescrições padrões desta norma para atestar a qualidade das barras de aço para estruturas de concreto armado, no que se refere a aderência, determina a verificação das características geométricas da superfície das barras. No caso das barras nervuradas estes dados referem-se a distribuição, número e dimensões das nervuras, também presente nas prescrições brasileiras. Portanto, os ensaios destacados não são procedimentos obrigatórios para avaliar a aderência como é requerido por norma brasileira.

Devido a importância dessa propriedade para os elementos de concreto armado e das dúvidas relacionadas ao atual ensaio padronizado pela ABNT NBR 7477

(1982), o Comitê Brasileiro de Siderurgia (ABNT CB 28:000.05 – Comissão de Estudos de Ensaio e Metalografia) há algum tempo está realizando reuniões para avaliar a possibilidade de adoção do *Pull-Out* para o estudo da aderência, em substituição ao ensaio de barras confinadas. Os estudos desenvolvidos por França (2010) e Ferreira (2012) têm sido adotados como base para os trabalhos do comitê.

O *Pull Out Test*, como apresentado pela EN:10080 (2005), consiste em corpo de prova cúbico de concreto de dimensões 10ϕ (dez vezes o diâmetro da barra de aço estudada) ou o mínimo de 20x20 cm. Pelo centro do molde, Figura 1-3, é posicionada uma barra de aço que é submetida a esforços de tração até a ruptura. A recomendação define um comprimento de ancoragem de 5ϕ (ϕ é o diâmetro da barra), para todo diâmetro de armadura e os resultados são apresentados em função de tensões de aderência.

Figura 1-3: Representação esquemática do corpo de prova do ensaio de arrancamento.



Fonte: Adaptado EN:10080 (2005).

Entretanto, autores que utilizaram o ensaio de arrancamento, como França (2010) e Carvalho *et al.* (2017), apresentaram críticas com relação ao comprimento de ancoragem definido. Os resultados das pesquisas, principalmente com barras finas de aço, não foram satisfatórios, sendo este parâmetro o possível responsável, pois pode não ter sido suficiente para garantir a ancoragem.

Ademais, Leonhardt e Monning (1977) destacam que a geometria do corpo de prova pode afetar significativamente os resultados de tensão de aderência. Rosales *et al.* (2016) e Fernandes e El-Debs (2000) alteraram o padrão para um

molde cilíndrico afirmando ser esta configuração mais adequada para a distribuição das tensões.

Todas as questões levantadas sobre os métodos de ensaios trazem dúvidas quanto à forma de se avaliar a capacidade aderente da barra de aço e de se determinar um coeficiente de conformação superficial experimental.

Além disto, ressalta-se que existem poucos estudos sobre aderência com barras finas de aço, ou seja, barras com diâmetro inferior a 10 mm. As pesquisas que compreendem este grupo de armaduras avaliam apenas alguns diâmetros (CARVALHO *et al.*, 2017; FRANÇA, 2010; GARCIA-TAENGUA *et al.* 2016; HELINCKS *et al.*, 2013; ROSALES *et al.* 2016). Esse motivo levou a norma ABNT NBR 7480 (2007) a prescrever um valor único para o coeficiente de conformação superficial igual 1,0. Este valor é prescrito a favor da segurança, uma vez que não há dados que justifiquem a adoção de valores maiores que 1,0. Destaca-se que, atualmente, a adoção das barras finas está mais presente na indústria da construção devido à expansão da indústria de pré moldados e também ao aumento das estruturas com elevada esbeltez, devido a aplicação de concretos de alta resistência.

Assim, baseado nas informações apresentadas, este trabalho justifica-se pela necessidade da ampliação de estudos sobre aderência em barras finas de aço, com diâmetros de 6,3; 8,0 e 10 mm, a partir do ensaio de arrancamento (*Pull Out Test*), propondo alterações no ensaio para investigar as críticas indicadas. A pesquisa propõe a alteração do corpo de prova cúbico (20x20 cm) para cilíndrico (15x15 cm), utilizando um comprimento de ancoragem igual a 10ϕ .

A alteração do corpo de prova é proposta em função da possível facilidade de manuseio e transporte destes moldes, em comparação aos cúbicos, principalmente devido a redução do peso dos CP's. Ademais, espera-se obter uma melhor distribuição das tensões de aderência com a geometria cilíndrica, como destacado pela literatura. A alteração no comprimento tem por objetivo reduzir a variabilidade e erro associado aos resultados de tensões de aderência, com relação ao comprimento de ancoragem de 5ϕ .

Além disso, pretende-se contribuir com informações para a padronização de um ensaio brasileiro de arrancamento, junto ao Comitê Brasileiro de Siderurgia, que

possibilite avaliar adequadamente o fenômeno da aderência aço-concreto. Destaca-se também o auxílio para a determinação de valores do coeficiente de conformação superficial (η), que atendam a ABNT NBR 7480 (2007), que serão calculados a partir de equação proposta por Carvalho *et al.* (2017).

1.1. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral a avaliação da aderência em barras finas de aço, por meio do ensaio de arrancamento (*Pull Out Test*) descrito na EN:10080 (2005), propondo alterações na geometria do corpo de prova de cúbico para cilíndrico, com comprimento de ancoragem de 10ϕ . Busca-se verificar a influência da geometria e tamanho do corpo de prova sobre os valores de tensão de aderência.

Os objetivos específicos são:

- avaliar os modos de ruptura, por arrancamento da barra ou por fendilhamento dos corpos de prova, observados durante o ensaio de arrancamento.
- realizar análises estatísticas para comparar os resultados de tensão última de aderência obtidos nos ensaios de arrancamento para corpos de prova cúbicos e cilíndricos.
- avaliar os efeitos da alteração da geometria do corpo de prova sobre a aderência a partir dos resultados experimentais de tensões de aderência.
- realizar análises comparativas com resultados de tensões de aderência obtidos pelo ensaio de vigas rotuladas (Beam Test).
- avaliar os efeitos da redução do tamanho do corpo de prova sobre a aderência, a partir do cálculo das tensões última de aderência segundo equações apresentadas na literatura, considerando os parâmetros de cobrimento de concreto dos moldes, diâmetro da barra e comprimento de ancoragem.
- calcular e avaliar os valores de conformação superficial (η) para as barras de aço, a partir dos resultados do ensaio de arrancamento, adotando-se a equação sugerida por Carvalho *et al.* (2017).

2. Revisão Bibliográfica

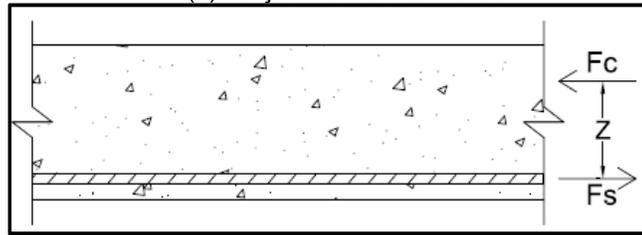
2.1. Conceitos iniciais

As estruturas de concreto armado têm sua viabilidade associada ao fenômeno da aderência. Há uma solidariedade entre aço e concreto, ou seja, um trabalho conjunto dos materiais para resistir às tensões, que impede o deslizamento das armaduras nas peças de concreto. Assim, quando as estruturas são solicitadas, a aderência entre os materiais faz com que ambos desenvolvam alongamentos iguais, e por consequência compatibilidade de deformações (DUMÊT, 2003; LEONHARDT e MONNING, 1977; SARTORI *et al.*, 2017).

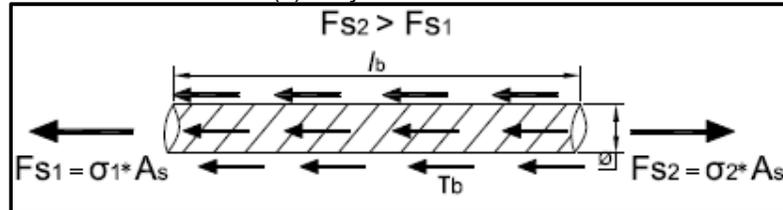
No entanto, dada as características frágeis do concreto, e, portanto sua baixa resistência a tração, quando os alongamentos no concreto excedem aos valores resistentes, ocorrem fissuras no elemento e então o aço é responsável por absorver integralmente as tensões. Dessa forma, a aderência é desenvolvida de forma a limitar esta abertura de fissuras e manter a solidariedade dos materiais (LEONHARDT e MONNING, 1977).

Dada a solicitação de um elemento de concreto armado, a aderência obriga que o concreto também resista aos esforços de tração atuantes, surgindo assim tensões no concreto (concrete (c): $\sigma_c = E_c * \epsilon_c$) e tensões no aço (steel (s): $\sigma_s = E_s * \epsilon_s$). Ao longo de determinados comprimentos das armaduras, trechos de ancoragem, as deformações (ϵ) de ambos materiais serão iguais, dessa forma, nestas regiões ocorre variação das tensões. Porém, o equilíbrio nestes trechos exige o surgimento de tensões de aderência (τ_b - equação 3), Figura 2-1, evitando assim o deslizamento da armadura no interior da peça de concreto (DUMÊT, 2003; LEONHARDT e MONNING, 1977).

Figura 2-1: Desenvolvimento das tensões de aderência.
(a) Forças internas de flexão.



(b) Forças na armadura



Fonte: Adaptado Dumêt (2003).

O equilíbrio e consequentemente a resistência ao deslizamento é garantido quando a força de aderência (F_b) iguala-se a diferença das forças atuantes na armadura (ΔF_s) (DUMÊT, 2003). Assim:

$$F_{s2} - F_{s1} = F_b$$

$$\text{Sendo: } F_b = \tau_b * \pi * l_b * \phi,$$

$$F_{s1} = \sigma_{s1} * A_s \text{ e } F_{s2} = \sigma_{s2} * A_s$$

$$F_{s2} - F_{s1} = F_b \implies (\sigma_{s2} - \sigma_{s1}) * A_s = \tau_b * \pi * l_b * \phi$$

$$A_s = \frac{\pi * \phi^2}{4}$$

$$\Delta \sigma_s = \frac{4 * \tau_b * \pi * l_b * \phi}{\pi * \phi^2}$$

Logo:

$$\tau_b = \frac{\Delta \sigma_s * \phi}{4 * l_b} \quad (3)$$

Sendo,

$F_{s1}, F_{s2}, \sigma_{s1}, \sigma_{s2}$: Forças e tensões no aço;

F_b, τ_b : Força e tensão de aderência;

ϕ : Diâmetro da armadura;

l_b : Comprimento de ancoragem;

A_s : Área da seção transversal da armadura;

$A_l = \pi * l_b * \phi$: Área lateral;

Para um elemento infinitesimal com comprimento dx, pode escrever (equação 4):

$$\frac{\Delta\sigma_s}{d_x} = \frac{4 * \tau_b}{\phi} \quad (4)$$

Portanto, matematicamente comprova-se que há a variação de tensões ($\Delta\sigma_s \neq 0$) ao longo dos trechos de ancoragem e conseqüentemente a necessidade da tensão de aderência para equilibrar o elemento e permitir a transferência de esforços entre os materiais. Por outro lado, ao longo de comprimentos onde o aço é submetido a tensões constantes ($\Delta\sigma_s = 0$), verifica-se o equilíbrio do elemento de concreto e a inexistência da tensão de aderência (DUMÊT, 2003).

2.2. Tipos de Aderência

A aderência é proveniente de diferentes fenômenos, avaliados por meio de ensaios, e que contribuem para a ligação entre aço e concreto. Basicamente estas contribuições podem ser divididas em parcelas, porém esta separação é empregada apenas para estudo, uma vez que, é impossível identificá-las isoladamente. São elas a aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica (FUSCO, 1995; LEONHARDT e MONNING, 1977).

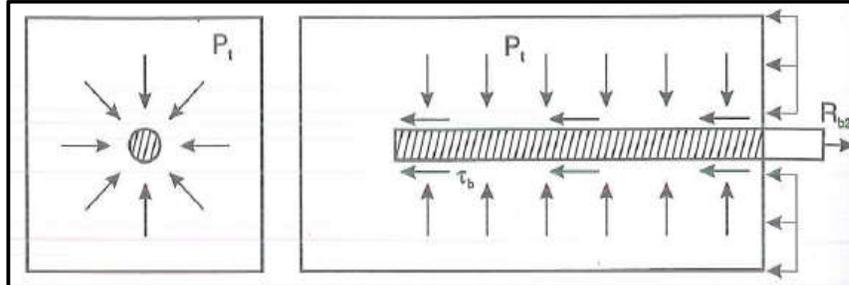
A aderência por adesão ocorre em virtude das ligações físicas e químicas, forças capilares, decorrentes das reações de endurecimento e pega do cimento, desenvolvidas nas regiões de contato entre os materiais. Esta parcela de aderência é insuficiente para garantir a ligação entre concreto e aço, já que a força resistente produzida é excedida com pequenos esforços (FUSCO, 1995; LEONHARDT e MONNING, 1977).

Segundo Fusco (1995), ao romper-se a aderência por adesão, a força resistente da aderência passa a receber contribuições da força de atrito existente na interface aço e concreto. Durante a retração, o concreto sofre deformações que exercem forças transversais sobre a barra conferindo à aderência a parcela por atrito, Figura 2-2. A força de atrito depende do coeficiente de atrito entre materiais e conseqüentemente da rugosidade da barra.

A contribuição final para a aderência é devido as irregularidades, nervuras, dispostas na superfície das barras, desenvolvendo esforços de compressão sobre o concreto, Figura 2-3 (FUSCO, 1995). De acordo com Leonhardt e Monning (1977), o concreto que solidifica nas saliências da barra formam os

“consoles de concreto” que evitam o deslizamento da barra no interior de uma peça.

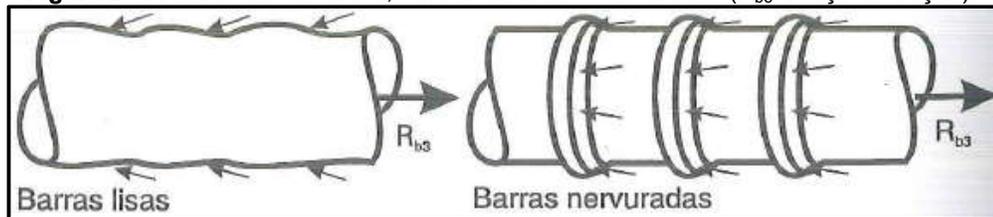
Figura 2-2: Aderência por atrito (P_t : Força de retração do concreto; R_{b2} : Força de tração; τ_b : Tensão de aderência).



Fonte: Fusco (1995).

Nas barras nervuradas, chamadas também barras de alta aderência, a garantia da aderência, e conseqüentemente a solidariedade entre os materiais, é principalmente em decorrência da aderência mecânica. É importante ressaltar que a aderência mecânica também está presente nas barras lisas de aço, como indica a Figura 2-3, e ocorre em função das saliências e irregularidades provenientes dos processos de laminação para a produção das mesmas (FUSCO, 1995).

Figura 2-3: Aderência mecânica, em barras lisas e nervuradas (R_{b3} : Força de tração).

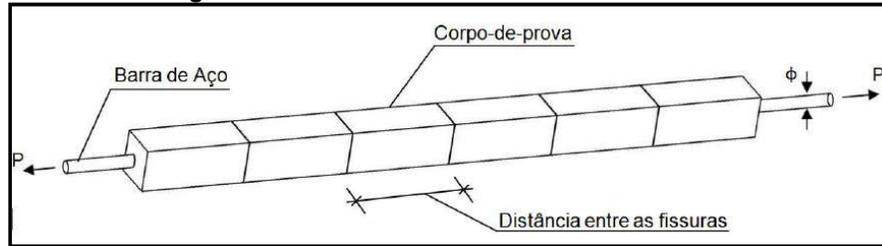


Fonte: Fusco (1995).

2.3. Ensaios para a determinação da tensão de aderência

A avaliação e a determinação das tensões de aderência são comumente realizadas a partir de ensaios mecânicos, principalmente por ensaios de arrancamento. Basicamente, estes ensaios consistem na extração de uma barra de aço envolvida em molde de concreto por um determinado comprimento de aderência (LEONHARDT e MONNING, 1977). Além deste, outros ensaios são empregados para estudar o fenômeno, como o ensaio brasileiro de barras confinadas, ilustrado na Figura 2-4, e o ensaio de vigas rotuladas (Beam Test), ilustrado na Figura 2-5 (FRANÇA, 2010; SONG *et al.*, 2015).

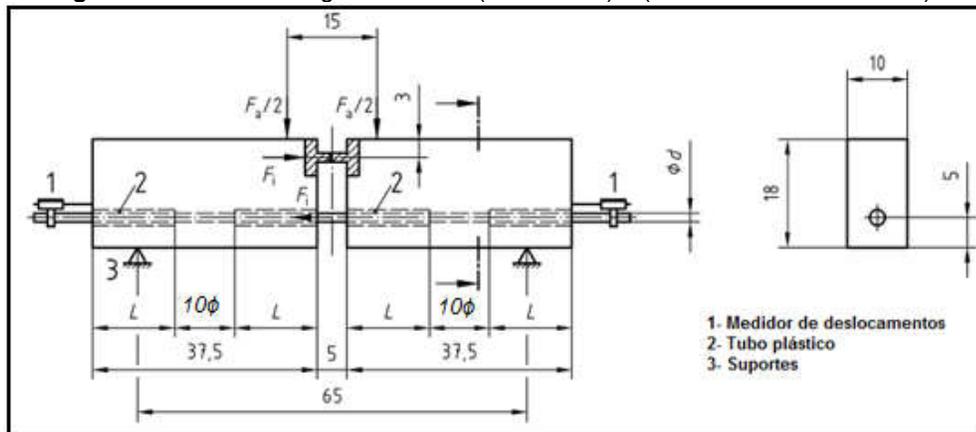
Figura 2-4: Ensaio brasileiro de barras confinadas.



Fonte: França (2010).

O ensaio de vigas (Beam Test) é realizado segundo as recomendações da EN:10080 (2005) e consiste em um corpo de prova composto por dois blocos de concreto armado, com dimensões distintas em função do diâmetro da armadura, interligados por uma armadura. Os corpos de prova, limitados na face superior por uma rótula metálica, são submetidos a esforços de flexão aplicados em pontos equidistantes às faces externas dos blocos. Os deslocamentos são medidos por deflectômetros colocados nas extremidades da barra, como ilustra a Figura 2-5. Como indicado na figura destacada, o comprimento de ancoragem empregado é equivalente a dez vezes o diâmetro da armadura (10ϕ) sendo os demais trechos da barra isolados como tubos plásticos.

Figura 2-5: Ensaio de vigas rotuladas (Beam Test) – (Medidas em centímetros).

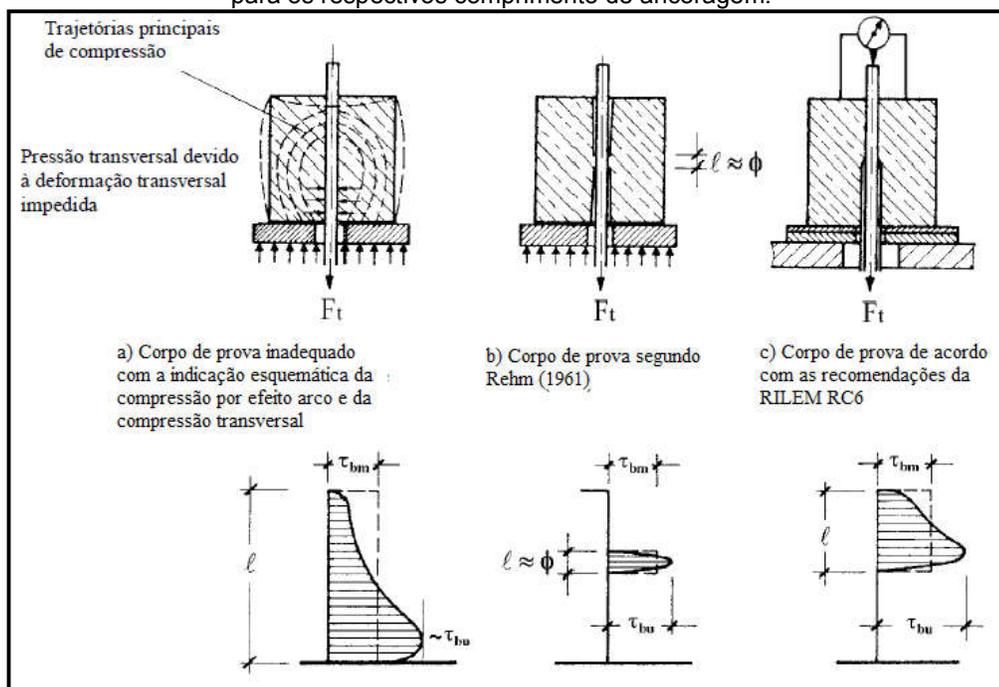


Fonte: Adaptado EN:10080 (2005).

Segundo Leonhardt e Monning (1977), para o ensaio de arrancamento, as características dos corpos de prova, relacionadas ao tamanho e a forma, como também o comprimento e a posição do trecho de ancoragem, exercem influência significativas sobre os resultados obtidos por este modelo de ensaio, como apresentado na Fig. 2.6. Para estes autores, os corpos de prova com trechos de ancoragem ao longo de todo molde, como indicado em Fig. 2.6 (a), apresentam-se inadequados a avaliação das tensões de aderência. Isto se deve ao impedimento à deformação transversal, provocado pela placa de apoio, e

também devido à compressão transversal sobre a armadura, proporcionado pela compressão por efeito arco, que provocam uma aderência por atrito adicional, o que pode superestimar os valores de tensão. Esse efeito é reduzido por meio da determinação de trechos sem aderência, como apresentado nos elementos (b) e (c) da Fig. 2.6. Rehm (1961) utilizou ensaio de arrancamento com corpos de prova cúbicos, com uma barra concêntrica e dois trechos sem aderência. O comprimento de ancoragem avaliado correspondeu a 1ϕ (uma vez o diâmetro da barra).

Figura 2-6: Corpos de prova para ensaio de arrancamento e suas variações de tensão, para os respectivos comprimento de ancoragem.



Fonte: Adaptado, Leonhardt e Monning (1977).

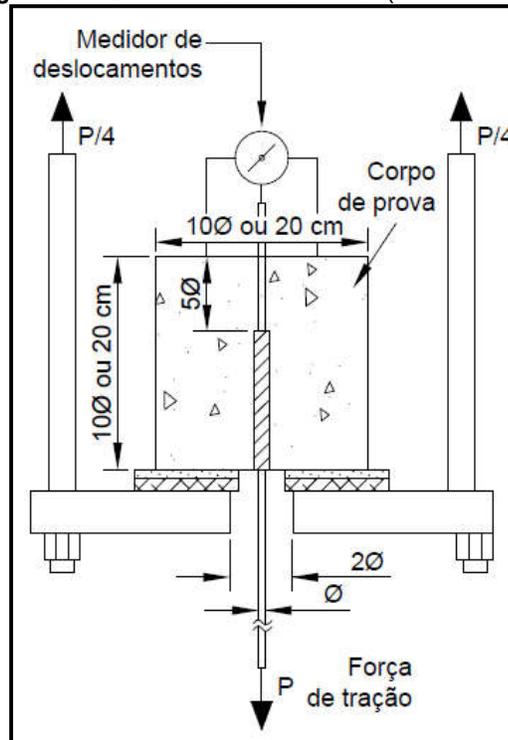
2.3.1. Ensaio de arrancamento direto (Pull Out Test) – EN:10080 (2005)

O ensaio de arrancamento direto é um dos métodos mais utilizados para estudo e avaliação da aderência entre aço e concreto (AREL e YAZICI, 2012; AREZOUMANDI *et al.* 2013; DAHOU *et al.* 2016; GARCIA-TAENGUA *et al.* 2016; HELINCKS *et al.*, 2013; PRINCE e SINGH, 2013; KIM e YUN, 2013; POP *et al.*, 2013; SARTORI *et al.*, 2017; SFIKAS e TREZOS, 2013; SHANG *et al.*, 2017; SHEN *et al.*, 2016; SONG *et al.*, 2015). O ensaio de arrancamento é padronizado na EN:10080 (2005), que relaciona a RILEM CEB FIP RC6 (1983), porém em alguns países existem normas específicas para execução do ensaio,

baseadas nas recomendações europeias (SFIKAS e TREZOS, 2013; SONG *et al.*, 2015). No Brasil não há nenhuma norma para padronização deste ensaio; dessa forma, as pesquisas desenvolvidas com ensaio *Pull Out* devem seguir as determinações da EN:10080 (2005).

O *Pull Out Test* consiste em um corpo de prova cúbico de concreto, de dimensões $(10\phi \times 10\phi)$ – sendo ϕ o diâmetro da armadura) ou mínimo de (20×20) cm, com uma barra de aço concêntrica que será submetida a uma força de tração, aplicada em passos de carga até atingir a ruptura por aderência, ilustrado na Figura 2-7. Na extremidade da barra de aço oposta a aplicação do carregamento, é posicionado um transdutor de deslocamentos e assim os dados obtidos do ensaio são apresentados em valores de força e seus respectivos deslocamentos.

Figura 2-7: Ensaio de arrancamento (*Pull Out Tests*).



Fonte: Adaptado EN:10080 (2005).

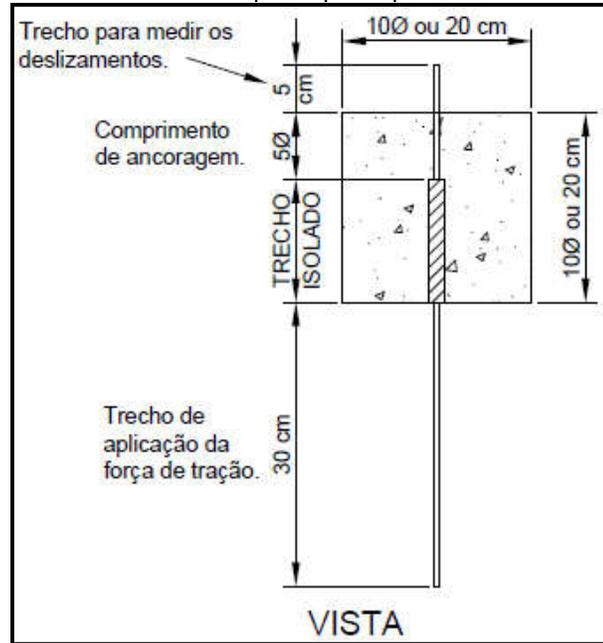
Como indicado na Fig. 2-8, no interior do corpo de prova, parte da barra é ancorada ao concreto e parte é isolada utilizando um tubo plástico. O comprimento de ancoragem recomendado na EN:10080 (2005) é de 5ϕ (ϕ – diâmetro da barra).

As tensões médias de aderência são calculadas com a seguinte equação 5:

$$\tau_b = \frac{P}{\pi * \phi * l} \quad (5)$$

Onde, τ_b é tensão média de aderência, P é a força aplicada, ϕ é o diâmetro da barra, l é o comprimento de ancoragem.

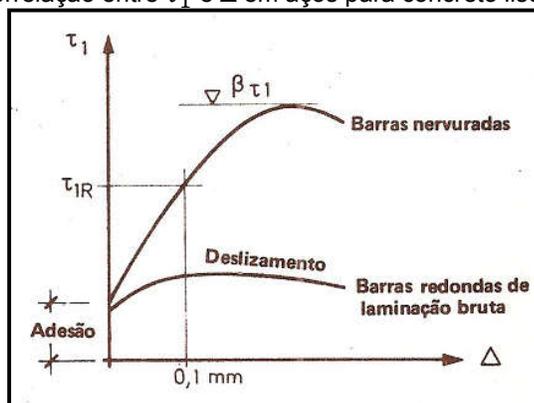
Figura 2-8: Características do corpo de prova para o ensaio de arrancamento.



Fonte: Adaptado EN:10080 (2005).

Por meio do ensaio de arrancamento são determinados os valores de tensão de aderência e respectivos deslocamentos, relacionados no gráfico $\tau \times \Delta$, Figura 2-9 (LEONHARDT e MONNING, 1977).

Figura 2-9: Correlação entre τ_1 e Δ em aços para concreto lisos e nervurados.



Fonte: Leonhardt e Monning (1977).

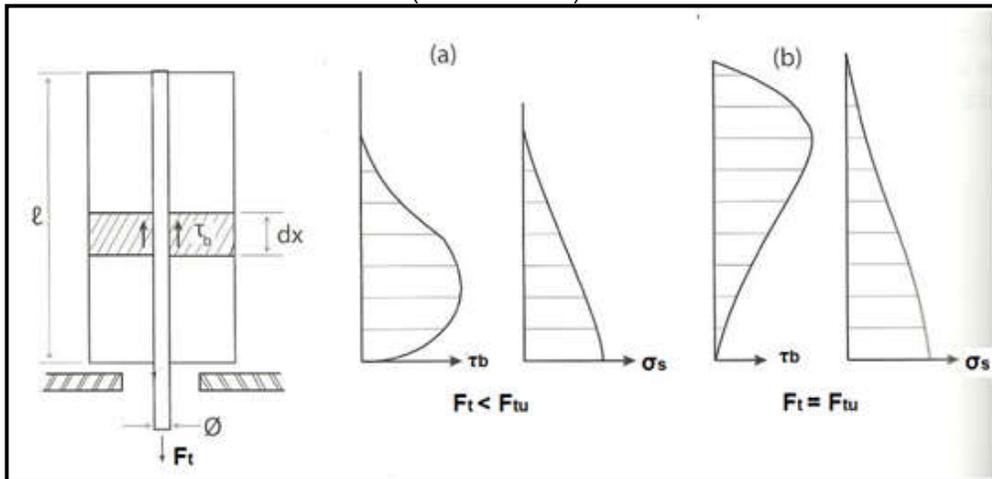
Segundo Leonhardt e Monning (1977), o valor da resistência de aderência (τ_{1R}) é obtido considerando a força P , na qual ocorre um deslocamento da armadura de 0,1 mm. Porém os autores destacam, e é também observado no trabalho de Sartori *et al.* (2017), que os valores das tensões de aderência podem atingir

resultados superiores ao destacado, sobretudo na aderência mecânica, como é possível observar no gráfico, no caso de barras nervuradas.

2.4. O fenômeno da aderência nos ensaios de arrancamento

Nos ensaios de arrancamento as distribuições de tensões podem apresentar a seguinte configuração (FUSCO, 1995):

Figura 2-10: Ensaio de arrancamento. **(a)** Força de tração aplicada menor que força de tração última (arrancamento). **(b)** Força de tração aplicada igual a força de tração última (arrancamento).

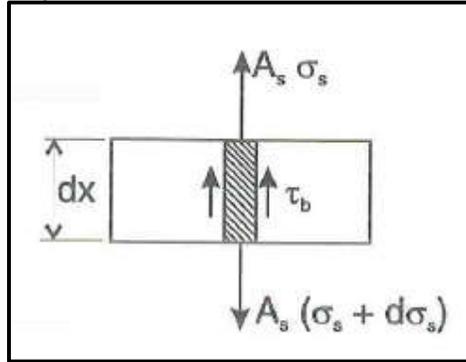


Fonte: Fusco (1995).

Na Figura 2-10 (a) (b), uma força de tração (F_t) é aplicada à uma barra de aço centrada em um corpo de prova prismático de concreto, característico do ensaio. A força F_t é responsável por gerar tensões (σ_s) ao longo da barra, maiores nas seções mais próximas ao ponto de aplicação do carregamento e que diminuem a medida que aproxima-se da extremidade oposta da armadura. As tensões de aderência (τ_b) são mobilizadas ao longo da interface aço-concreto.

Para a seção de comprimento dx indicada, tem-se a seguinte condição de equilíbrio, Figura 2-11 (FUSCO, 1995).

Figura 2-11: Formulação da tensão de aderência pelo ensaio de arrancamento.



Fonte: Fusco (1995).

$$\tau_b = \frac{\phi}{4} * \frac{d\sigma}{dx} \quad (6)$$

Onde, A_s é a área da seção transversal da barra e ϕ o seu diâmetro.

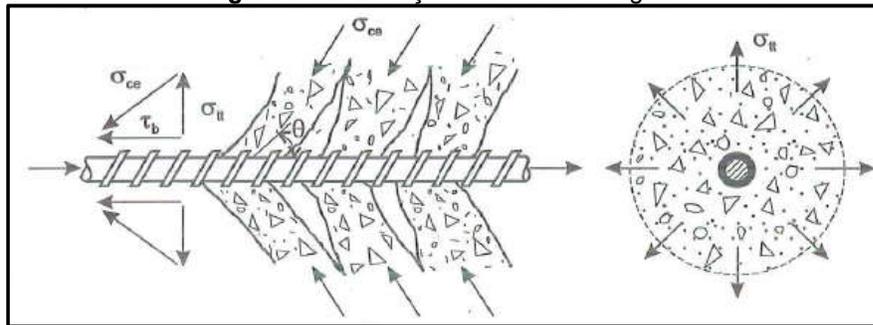
De acordo com a equação 6 e com a Figura 2-10 (a) (b), observa-se que a tensão de aderência é máxima onde no gráfico da tensão da armadura são encontrados pontos inflexão, ou seja, onde em uma mesma seção teremos $d\tau_b/dx = 0$ e $d^2\sigma_s/d^2x = 0$. Destaca-se que, como apresentado pela Figura 2-10 (a), quando as forças aplicadas (F_t) são inferiores a força de tração última (F_{tu}), a aderência é desenvolvida apenas ao longo de trechos da barra onde a tensão no aço (σ_s) for variável ($d\sigma_s/dx \neq 0$). Por outro lado, quando $F_t = F_{tu}$, ou seja, quando ocorrer o arrancamento, a aderência máxima será mobilizada Figura 2-10 (b) (FUSCO, 1995).

Como apresentado na figura anterior, durante o ensaio de arrancamento, as tensões de aderência variam ao longo do comprimento da armadura em contato com concreto, assim como as tensões atuantes no aço. Esse comportamento pode ser comprovado no estudo de Thompson *et al.* (1966), que utilizaram transdutores elétricos posicionados ao longo das barras de aço. No entanto, como destacado por Leonhardt e Monning (1977), e também observado no trabalho de Thompson *et al.* (1966), a medida da variação da aderência ao longo do comprimento de ancoragem é um procedimento de grande dificuldade. Dessa forma, os resultados de tensão de aderência a partir dos valores obtidos pelo ensaio de arrancamento são apresentados em função de tensões médias, ou seja, valores constantes ao longo dos comprimentos de ancoragem dos corpos de prova (SARTORI *et al.*, 2017).

Segundo Fusco (1995), em ensaios desta natureza é comum a ocorrência de um processo de fissuração que antecede ao arrancamento da barra, definindo o rompimento das ligações existentes entre os materiais. Dessa forma, segundo o autor, o que caracteriza a força última de tração (F_{tu}) não é o valor para o arrancamento do aço, mas a força na qual ocorre um determinado deslocamento da extremidade da armadura não solicitada, ou seja, quando há o deslocamento completo da barra e, portanto a fissuração do concreto.

Como consequência desta fissuração, no momento em que a aderência máxima é alcançada se tem uma transferência de esforços como apresentado na Figura 2-12 (FUSCO, 1995). O equilíbrio de esforço exige o aparecimento de tensões transversais de tração (σ_{tt}), responsáveis pelo aparecimento de fissuras.

Figura 2-12: Esforços reais de ancoragem.

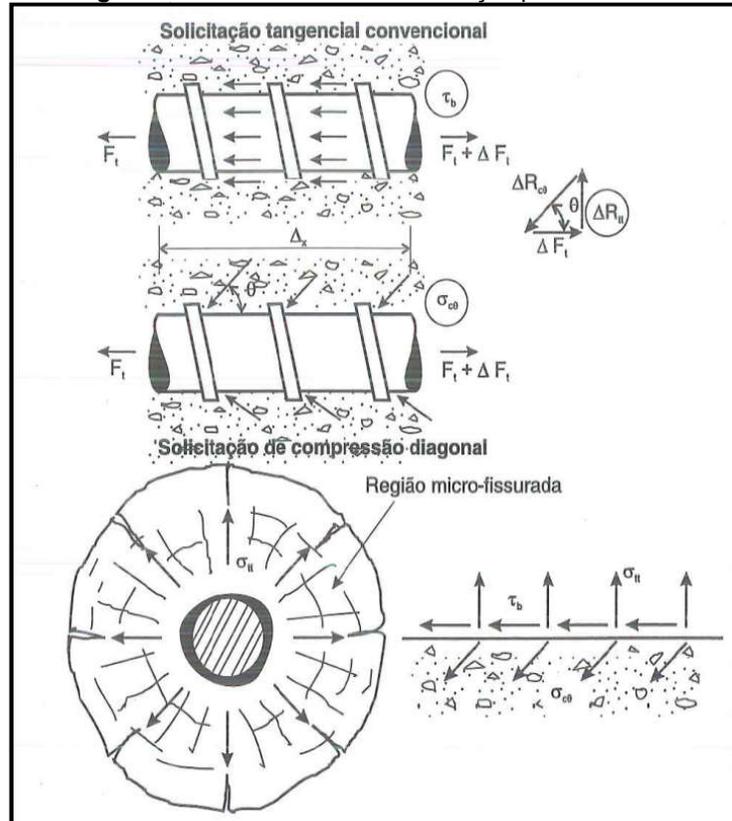


Fonte: Fusco (1995).

Dessa forma, na mobilização da aderência não ocorre apenas a solicitação de tensões tangenciais a armadura, mas sim um sistema equilibrado por tensões diagonais de compressão (σ_{cb}) e as tensões transversais de tração (σ_{tt}), e suas respectivas forças resultantes $R_{c\theta}$ e R_{tt} , responsáveis pela micro fissuração do concreto na região envolta da barra, Figura 2-13.

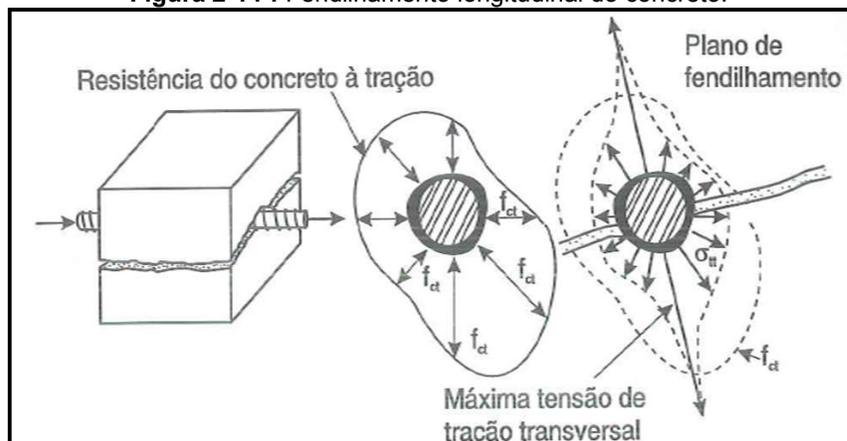
Em função desta relação, Fusco (1995) afirma que um simples deslizamento da armadura não é o responsável pela destruição da aderência, uma vez que para isso seria necessária a pulverização do concreto solidificado entre as nervuras das barras de aço. Assim, o fenômeno da aderência deixa de existir devido ao fendilhamento, ou seja, devido a micro fissuração, que ocorre na direção paralela ao eixo da armadura, originado pelas tensões de tração desenvolvidas sobre o concreto, como apresentado na Figura 2-14.

Figura 2-13: Transferência de esforços por aderência.



Fonte: Fusco (1995).

Figura 2-14 : Fendilhamento longitudinal do concreto.



Fonte: Fusco (1995).

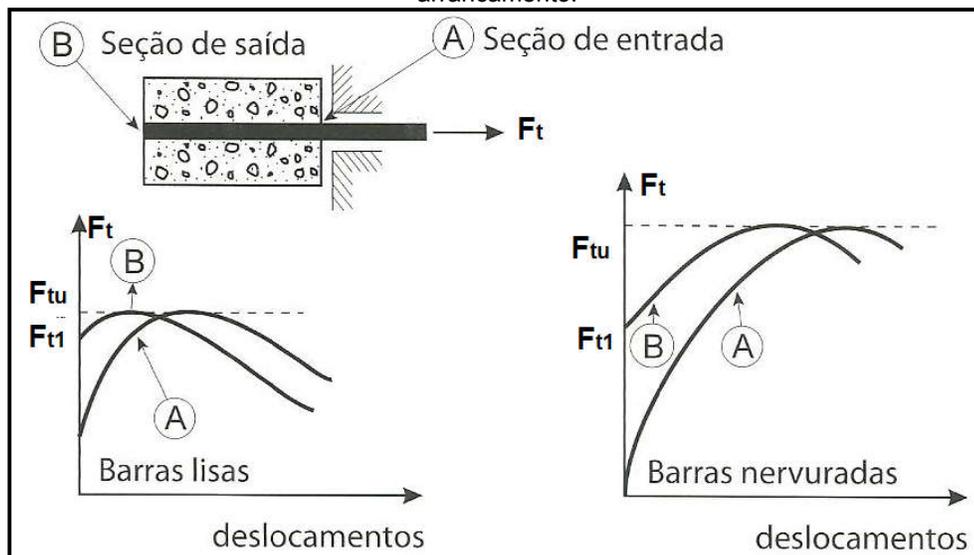
O desenvolvimento da aderência parte da transferência de esforços do aço para o concreto envolvente, ao longo da ancoragem, principalmente em função do intertravamento mecânico das nervuras com o concreto ao redor. Ao longo da ancoragem, surgirão tensões tangenciais promovendo o aparecimento de tensões transversais de tração, responsáveis pelo fendilhamento. Porém a definição do comprimento de ancoragem é um fator crítico, já que depende de

alguns fatores como as propriedades geométricas das barras e a qualidade do concreto na zona de ancoragem (FUSCO, 1995; ORANGUN *et al.* 1977).

Nas barras lisas, esta pulverização do concreto para o deslizamento da barra tem maior facilidade de ocorrer devido a conformação superficial, com apenas algumas saliências, diferente das barras nervuradas. Para estas, o fenômeno descrito anteriormente seria possível apenas se ocorresse uma limitação do fendilhamento por algum mecanismo, como armaduras transversais, disposto de forma a resistir as tensões de tração. Fusco (1995) ainda destaca que a limitação desta fissuração é importante também para impedir que as fissuras alcancem a superfície das peças, deixando as barras expostas e suscetíveis a processos de corrosão.

As solicitações de barras lisas e nervuradas no ensaio de arrancamento resultam comportamentos distintos, com relação aos deslocamentos das barras e as forças de aderência, como apresentado na Figura 2-15, Fusco (1995) indica estas diferenças de comportamento nas extremidades carregada (seção inicial A) e não carregada (seção terminal B) das armaduras.

Figura 2-15: Comportamento das barras lisas e das barras nervuradas no ensaio de arrancamento.



Fonte: Fusco (1995).

Como indicado nos gráficos, há deslocamentos da seção inicial (A) do aço nervurado desde o início do ensaio, sendo que o deslocamento completo da barra é alcançado após um determinado valor de força (F_{t1}). No entanto, mesmo

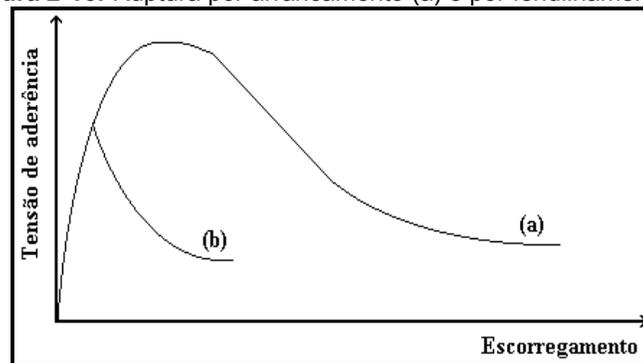
após atingir este valor, é possível observar um aumento da força de aderência, sendo ela superior para as barras nervuradas (FUSCO, 1995).

Além disso, a figura indica que no caso das barras lisas, logo em seguida ao início do escorregamento da armadura, a força última de aderência é atingida e consequentemente há a eliminação da ancoragem. Este comportamento retrata que para aços lisos há necessidade de ganchos para garantir a ancoragem e impedir os escorregamentos, portanto, não é possível utilizar apenas ancoragens retas. O mesmo não ocorre com as barras nervuradas, uma vez que, como apresentado pelos diagramas, após o deslocamento de toda a barra há um aumento da capacidade de ancoragem, o que permite o emprego de ancoragens retas das armaduras para garantir a aderência (FUSCO, 1995).

2.4.1. Modos de ruptura dos corpos de prova no ensaio de arrancamento

Fernandes e El Debs (2000) e Dumêt (2003), destacam que a perda da aderência está associada a essencialmente dois modos de ruptura, por arrancamento ou por fendilhamento, e não apenas a este último, como enfatiza Fusco (1995). Fatores como tipo e conformação superficial da armadura, diâmetro da barra, a distância entre barras dos elementos estruturais, a existência de armaduras de confinamento (armaduras transversais) e o confinamento proporcionado pelo cobrimento de concreto, exercem influência para determinar os tipos de falha (DUMÊT, 2003).

Figura 2-16: Ruptura por arrancamento (a) e por fendilhamento (b)

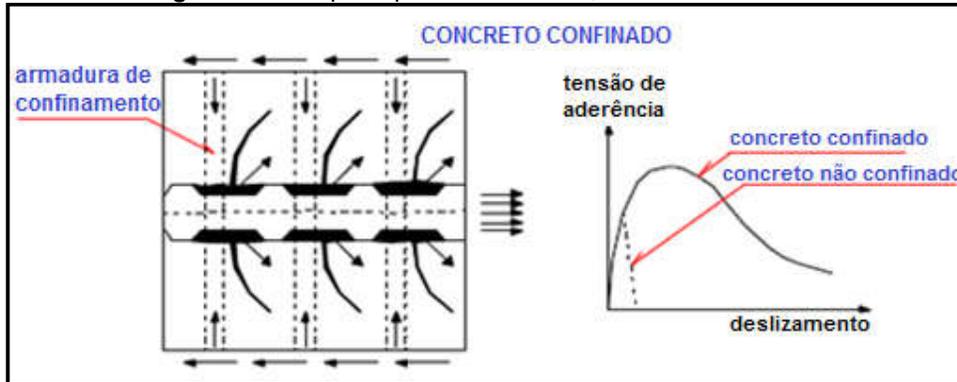


Fonte: Dumêt (2003).

O primeiro modo, ruptura por arrancamento, é caracterizado por um comportamento mais dúctil e alcança tensões de aderência mais elevadas, como indicado na Figura 2-16. O arrancamento da armadura está relacionado ao adequado confinamento proporcionado pelo concreto sobre a barra de aço, ou

por armaduras com tal finalidade, o que, portanto impede a formação e a propagação de fissuras, relacionadas ao fendilhamento (FERNANDES e EL-DEBS, 2000), como apresentado na Figura 2-17.

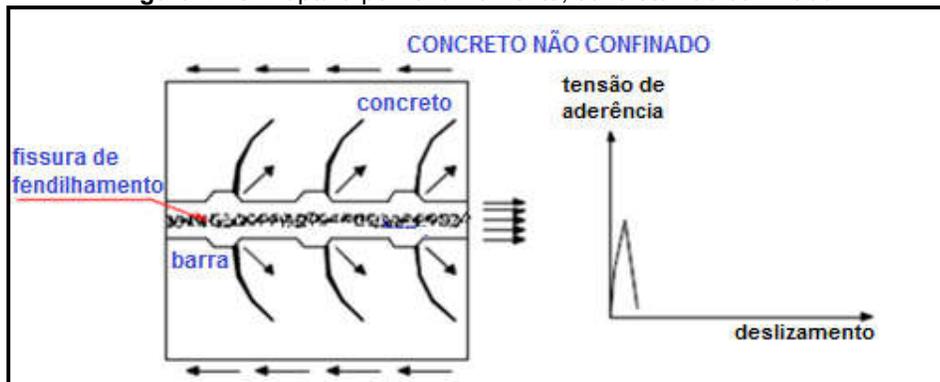
Figura 2-17: Ruptura por arrancamento, concreto confinado.



Fonte: Adaptado Fernandes e El Debs (2000).

O fendilhamento ocorre para condições inadequadas de confinamento, decorrendo da fissuração generalizada devido as forças de tração atuantes sobre o concreto. A propagação das fissuras podem alcançar as bordas do elemento de concreto com conseqüente perda do cobrimento e exposição da armadura, Figura 2-18 (FERNANDES e EL-DEBS, 2000; FUSCO, 1995).

Figura 2-18: Ruptura por fendilhamento, concreto não confinado.



Fonte: Fernandes e El Debs (2000).

2.5. Critérios para a previsão das tensões de aderência (Avaliação analítica)

De acordo com Orangun *et al.* (1977), uma componente radial da força de aderência, decorrente do sistema de forças originado na interface aço-concreto,

atua quando há condições para o fendilhamento, Figura 2-19, como destacado, nos parágrafos anteriores, por Fusco (1995).

Figura 2-19: Ruptura do corpo de prova por fendilhamento.



Fonte: Barbosa (2001).

A tensão de aderência representativa desta força pode ser obtida pela equação 7, considerando alguns fatores:

$$\tau_u = \left(1,22 + 3,23 * \left(\frac{C}{\phi} \right) + 53 * \left(\frac{\phi}{l_b} \right) \right) * \sqrt{f_c} \quad (\text{Psi}) \quad (7)$$

Onde:

τ_u = tensão última de aderência (Psi);

C = cobrimento de concreto que envolve a barra (in);

ϕ = diâmetro da armadura (in);

l_b = comprimento de ancoragem (in); e

f_c = resistência a compressão do concreto.

Esta equação pode ser aplicada como uma previsão para a tensão de aderência desenvolvida em um elemento estrutural, bem como em corpos de prova de ensaio, considerando os parâmetros citados (ALMEIDA FILHO, 2006; HADI, 2008; ORANGUN *et al.* 1977). E, baseado no trabalho de Bazant e Sener (1989), também é possível associá-la a uma tensão resistente relacionada a ruptura por fendilhamento em ensaios de arrancamento. Sendo a tensão solicitante (τ_s) a obtida no ensaio e a resistente ($\tau_r = \tau_u$), calculada pela equação (7), tem-se que para valores de tensão resistente inferiores aos valores solicitantes, observa-se a ruptura por fendilhamento, destacado no trabalho dos autores.

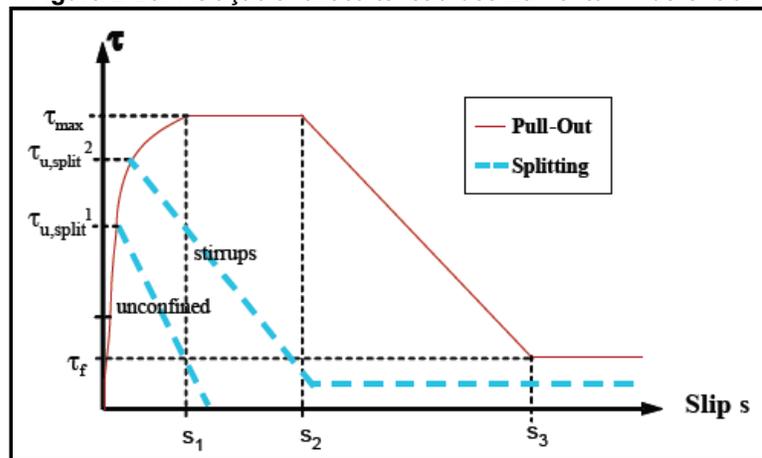
Torre-Casanova *et al.* (2013) também avaliaram os modos de falha do ensaio de arrancamento a partir do valor do cobrimento e resistência do concreto e diâmetro da armadura. Os autores encontraram uma equação para determinar a relação mínima entre cobrimento de concreto e diâmetro de armadura, para a qual o modo de falha passa de fendilhamento para arrancamento, como apresentado a seguir, equação 8.

$$c/\phi = \left(0,39 * f_c/f_{ct}\right) - 0,24 \quad (8)$$

Sendo, c/ϕ a relação cobrimento de concreto e diâmetro da barra de aço e f_c e f_{ct} as resistências à compressão e à tração do concreto, respectivamente.

Em situações de carregamentos monotônicos, é possível calcular as tensões de aderência entre o aço e concreto, para modos de falha por arrancamento e fendilhamento, em função do deslocamento relativo entre os materiais. Para condições de contorno bem definidas, e pequenos comprimentos de ancoragem, pode-se considerar uma relação entre “Tensão de aderência local” versus “Deslizamento local”, como apresentado pela Figura 2-20 (MODEL-CODE:2010).

Figura 2-20: Relação analítica tensão-deslizamento – Aderência.



Fonte: Model Code (2010).

Em função das condições de confinamento, o Model Code (2010) propõe equações para prever valores de tensão máxima de aderência que levariam a ruptura por arrancamento (Pull-Out), equação 9, ou ao fendilhamento (Splitting), equação 10, considerando que as tensões no aço não alcançam valores que resultam no escoamento do material.

$$\tau_{u,pull} = \alpha * \sqrt{f_{ck}} \quad (9)$$

Onde:

$\alpha = 2,5$ - para condições de boa aderência,

1,25 - para as demais condições de aderência; e

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão (MPa).

$$\tau_{u.split} = \eta * 6.54 * \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0,25} * \left(\frac{20}{\emptyset}\right)^{0,20} * \left[\left(\frac{c_{min}}{\emptyset}\right)^{0,33} * \left(\frac{c_{max}}{c_{min}}\right)^{0,1} + 8K_{tr}\right] \quad (10)$$

Onde:

$\eta = 1,0$ - para condições de boa aderência,

0,7 - para as demais condições de aderência;

\emptyset = diâmetro da barra (mm);

c_{min} = mínimo (cx, cy, a);

c_{max} = máximo (cx, a);

Sendo cx (cobrimento); cy (distancia da armadura em relação ao fundo da fôrma); a (distância entre barra); e

K_{tr} = parâmetro relacionado a características de armaduras de confinamento, para este trabalho $K_{tr} = 0$.

O estudo analítico da aderência pode ter como objetivo a avaliação de dimensões do corpo de prova, de acordo com os parâmetros destacados nas equações anteriores, permitindo assim a comparação entre as previsões das formulações com o observado nos ensaios de arrancamento.

2.6. Pesquisas e estudos sobre aderência com o ensaio de arrancamento (*Pull Out Test*)

Como já destacado, Rehm (1961) foi um dos primeiros à contribuir para os estudos sobre a aderência entre aço e concreto. O autor analisou como os parâmetros: conformação superficial das armaduras (barras nervuradas e lisas), configuração das nervuras (altura e espaçamento), classes de resistência do concreto e posição da barra durante a concretagem (vertical e horizontal), influenciam no fenômeno da aderência. Rehm (1961) utilizou os diâmetros de 12, 13, 14 e 24 mm em aço de conformação nervurada e diâmetro de 16 mm em aço de conformação lisa. A pesquisa foi desenvolvida a partir do ensaio de arrancamento, no qual foram empregados moldes cúbicos de (10x10) cm e (20x20) cm, de acordo com os diâmetros, e comprimento de ancoragem de 16

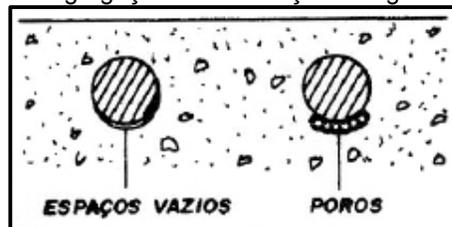
mm, determinado a partir do espaçamento das nervuras, sendo este mesmo valor também estabelecido para as barras lisas.

Segundo Rehm (1961), as barras nervuradas possuem melhores resultados de tensão de aderência, uma vez que, o concreto solidificado entre as nervuras dificulta o deslizamento da armadura. Por outro lado, nas barras lisas, as saliências decorrentes do processo de fabricação não garantem o mesmo comportamento, assim, facilmente tem-se o rompimento da aderência.

O estudo da relação entre a altura (h) e espaçamento (e) das nervuras indicou uma influência positiva no fenômeno da aderência, logo quanto maior a relação h/e maiores os valores de tensões de aderência. O mesmo resultado foi encontrado para as classes de resistência, concretos mais resistentes condicionam à aderência mais elevada.

No caso da posição da armadura durante a concretagem, as barras verticais apresentaram melhores resultados para aderência, já que no caso das barras horizontais há segregação de material na parte inferior da barra e conseqüentemente a formação de poros (vazios) que reduzem os valores de tensão, como apresentado na Figura 2-21.

Figura 2-21: Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais, devido à segregação e acumulação de água.



Fonte: Leonhardt e Monning, 1977.

De acordo com Rehm (1961), além da formação de poros, nessa situação há também a perda de área nervurada da armadura em contato com o concreto, responsável pela aderência mecânica, e, por conseguinte a redução de resistência de aderência. O autor destaca que para as barras de aço nervuradas este conseqüente comportamento da aderência pode estar relacionado as características das nervuras, ou seja, espaçamento entre elas e a altura das mesmas.

Considerando o comportamento da aderência com barras concretadas em posição horizontal, Fusco (1995) destaca as zonas de ancoragem de boa e má aderência. Sobre estas situações de ancoragem, a norma da ABNT NBR 6118 (2014) apresenta as posições de concretagem para as quais os trechos de ancoragem devem ser considerados em condições ou zonas de boa aderência:

Consideram-se em boa situação quanto à aderência os trechos das barras que estejam em uma das posições seguintes:

- a) Com inclinação maior que 45° sobre a horizontal;
- b) Horizontais ou com inclinação menor que com 45° sobre a horizontal, desse que:
 - para elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior ou da junta de concretagem mais próxima;
 - para elementos estruturais com $h > 60$ cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima (ABNT NBR 6118:2014).

A fim de verificar esta situação da redução aderência em relação as nervuras das barras de aço, Rehm (1961) realizou um estudo com barras de 13 mm diâmetro com nervuras espaçadas de 8 mm e alturas de 0,5; 1,0 e 2,0 mm, e também barras de 24 mm de diâmetro, espaçamento entre nervuras de 15 mm e alturas 1,0; 2,0 e 4,0 mm. As barras foram empregadas horizontalmente, sendo o primeiro grupo concretado em moldes cúbicos, com concreto de resistência 24 MPa, com dimensões de 10 cm enquanto o segundo grupo em moldes de 20 cm e concreto com resistência de 27,5 MPa.

Os resultados de resistência de aderência obtidos por Rehm (1961) foram comparados a valores com as barras na vertical. As barras horizontais cujas nervuras eram mais altas apresentaram as menores reduções dos valores de resistência, quando comparadas as barras verticais. Além disso, o autor destacou que as reduções mais significativas foram para pequenos deslocamentos da armadura. Considerando a altura da posição da barra de aço em relação ao fundo da forma, ambos os grupos, armaduras horizontais e verticais, apresentaram resultados semelhantes.

Bazant e Sener (1989) estudaram o comportamento da aderência com relação ao tamanho do corpo de prova de um ensaio “pull-out”, diferente daquele recomendado pela EN:10080 (2005). Os moldes avaliados eram cúbicos, cujas dimensões aumentaram proporcionalmente assim como as armaduras, permanecendo constante a relação dos comprimentos de ancoragem empregados ($0,5\phi$). Além disso, os autores adaptaram a equação apresentada

por Orangun *et al.* (1977) para o cálculo da tensão de aderência, para incluir o efeito do tamanho sobre o fenômeno. De acordo com os resultados e conclusões apresentados, o aumento do tamanho dos moldes resultou em redução das tensões de aderência, assim como alteração modo de falha, de arrancamento para fendilhamento. Os autores destacam que a equação utilizada, mostrou-se de acordo com as rupturas observadas nos ensaios.

Fernandes e El Debs (2000) analisaram a influência de carregamentos cíclicos sobre a aderência, por meio do ensaio de arrancamento, alterando o corpo de prova para cilíndrico, pois segundo os autores esta geometria apresenta melhor comportamento comparado ao molde cúbico padrão. Utilizaram concreto classe C30 e barras de aço CA-50 de 10 mm e 20 mm. Os corpos de prova apresentaram ruptura por arrancamento, indicando que os moldes proporcionaram adequado confinamento. No caso dos carregamentos monotônicos, as barras de 10 mm apresentaram comportamento de aderência melhor em comparação as armaduras de 20 mm, considerando tanto a resistência de aderência quanto a tensão última de aderência. Com relação a condição de carregamento, os resultados indicaram que o aumento do número de ciclos não afeta significativamente a resistência de aderência, porém foi observado aumento dos deslizamentos, no caso das cargas cíclica, em comparação ao carregamento monotônico.

A pesquisa de Barbosa (2001) utilizou o ensaio de arrancamento para avaliar barras de aço CA 50, de diâmetros indicados na Tabela 2-1, e concreto com classes de resistência entre 20 e 100 MPa.

Tabela 2-1: Coeficientes de variação (CV %), para as tensões últimas de aderência.

Barras ϕ (mm)	f_c 20	f_c 40	f_c 60	f_c 80	f_c 100
6,3	2,12	5,79	2,94	2,11	2,15
8,0	3,14	4,23	2,02	0,44	1,44
10,0	1,82	3,48	4,05	3,07	8,77
12,5	2,91	0,77	2,63	4,10	3,19
16,0	3,64	2,76	5,05	1,96	4,27
20,0	3,80	4,31	4,13	2,16	3,50
25,0	4,27	1,84	(-)	(-)	(-)

(-) Não ocorreu ruptura. Fonte: Barbosa (2001).

O comprimento de ancoragem empregado foi de 5ϕ (cinco vezes o diâmetro), como recomendado pela EN:10080 (2005). A autora avaliou os resultados, de tensão última de aderência, em função do coeficiente de variação (CV) e

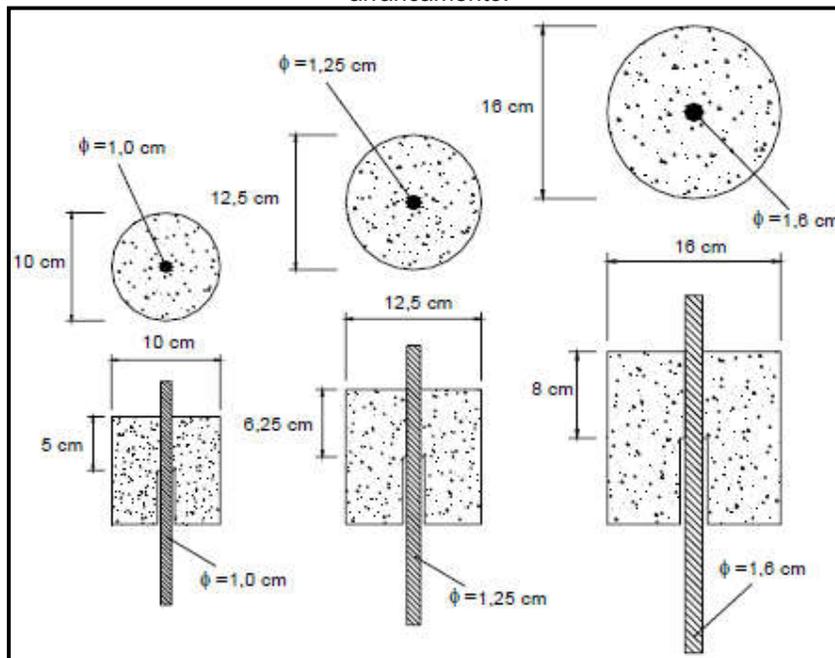
segundo suas conclusões os valores obtidos, apresentados na Tabela 2-1, foram considerados satisfatórios.

Rao *et al.* (2004) estudaram aderência com relação aos parâmetros: diâmetro da armadura, utilizando barras de 16 mm e 20 mm, comprimento de ancoragem, para o qual avaliaram os valores de 50 mm e 150 mm, e condições de confinamento, avaliando moldes de ensaio com armaduras de confinamento em espiral e estribos, como também moldes sem armadura para confinamento. O estudo contemplou concreto considerado de alta aderência, com resistências de 40 MPa e 50 MPa. Foi realizado ensaio de arrancamento, com moldes cúbicos. Os resultados indicaram que os corpos de prova sem armadura de confinamento apresentaram ruptura por fendilhamento, e, além disso, as tensões de aderência destes moldes atingiram 50% a 60% dos valores dos moldes com confinamento. O diâmetro da armadura não afetou significativamente os resultados de tensão; entretanto o aumento do comprimento de ancoragem resultou em redução dos valores de tensões de aderência.

Almeida Filho (2006) desenvolveu um trabalho para avaliar o comportamento da aderência em concretos auto adensáveis (CAA), comparando os resultados com os de misturas de concreto convencional (CC). A avaliação utilizou ensaios de arrancamento e ensaios de flexão em vigas, comparados posteriormente com simulação numérica e também com equações de predição dos valores de tensão última de aderência, incluindo a equação de Orangun *et al.* (1977). Os materiais empregados foram concretos de resistência de 30 e 60 MPa, para mistura convencional e auto adensável, e uma mistura complementar de CAA e resistência de 50 MPa, caracterizado por elevada coesão e avaliado apenas pelo ensaio de arrancamento.

Para as duas primeiras classes de resistência foram estudadas barras de aço com 10 e 16 mm de diâmetro, já no estudo complementar utilizaram-se barras com diâmetros de 10; 12,5 e 16 mm. As dimensões dos corpos de prova (CP's), para o ensaio de arrancamento, seguiram a recomendação da EN:10080 (2005) (10 ϕ x 10 ϕ), porém foram empregados moldes cilíndricos, com barras concretadas na posição vertical. O comprimento de ancoragem também respeitou a prescrição normativa, 5 ϕ , como apresenta a Figura 2-22.

Figura 2-22: Características dos corpos de prova cilíndricos para o ensaio de arrancamento.



Fonte: Almeida Filho, 2006.

Com relação aos resultados do ensaio de arrancamento obtidos por Almeida Filho (2006), relevantes para este trabalho, os valores de resistência de aderência, considerando o concreto C30, foram maiores para o CAA e as barras de diâmetro menor apresentaram maiores valores de aderência. O modo de ruptura dos CP's, neste grupo, foi basicamente por arrancamento, alguns moldes com barra de diâmetro de 16 mm apresentaram fendilhamento. Tanto os corpos de prova de classe de resistência de 60 MPa quanto os de 50 MPa apresentaram ruptura por fendilhamento, sem exceção, fato este atribuído a maior resistência do concreto.

Para os moldes C60, as barras de diâmetro menor apresentaram resistências de aderência menores, cuja explicação considerou também a classe de resistência superior deste grupo, porém os resultados dos CP's C50 apresentaram igual comportamento ao grupo C30, ou seja, quanto menor o diâmetro maior aderência. Com relação as comparações com equações de predição de tensão última, o autor destaca proximidade com os valores calculados, porém foram observados alguns valores superestimados.

França (2010) utilizou o ensaio de arrancamento, seguindo a recomendação normativa para o comprimento de ancoragem de 5ϕ , para estudar barras de aço

CA 50, diâmetros 6,3; 8,0 e 10,0 mm, com concretos com resistências de 25 e 40 MPa. Os resultados de tensão média de aderência foram avaliados em função do coeficiente de variação (CV), indicados na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Coeficientes de variação (CV-%) para tensões média de aderência.

Barras ϕ (mm)	Coeficientes de variação CV (%)	
	25 MPa	40 MPa
6,3	23,82	40,49
8,0	12,05	27,31
10,0	6,71	13,35

Fonte: França (2010)

Os dados apresentados possuem elevada dispersão, ainda maiores para o concreto de classe C40, e conseqüentemente não são adequados para análises comparativas. De acordo com autora, o valor do comprimento de ancoragem pode não ter sido suficiente para garantir a aderência entre os materiais, decorrente do pequeno contato aço-concreto, principalmente para os diâmetros analisados que estão incluídos no grupo de barras finas.

Como descrito pelos parágrafos anteriores, há muito a aderência entre aço e concreto é estudada, cujos objetivos principais eram basicamente avaliar a influência das características e propriedades dos materiais sobre o fenômeno. A resistência a compressão do concreto, comportamento com barras lisas e nervuradas, diâmetro das armaduras, altura das nervuras e espaçamento entre elas, posição da barra em relação a concretagem, são alguns dos fatores estudados (REHM, 1961).

Os ensaios de arrancamento (Pull Out Test) são, de forma geral, baseados nas recomendações da EN:10080 (2005). Como já apresentado, o teste, segundo esta norma, é realizado em corpos de prova cúbicos, com uma barra de aço centrada, com a determinação de um comprimento de ancoragem no valor de 5 vezes o diâmetro da armadura. Experiências com este ensaio demonstraram que as dimensões destes corpos de prova de concreto, e o conseqüente peso, dificultam o transporte dos mesmos, sendo interessante a avaliação de outras possibilidades de molde (CARVALHO *et al.*, 2017; MIRANDA e CARVALHO, 2017).

Os atuais estudos sobre o fenômeno, que utilizam o ensaio Pull Out, possuem diferentes finalidades. As pesquisas avaliam, principalmente, a aderência em

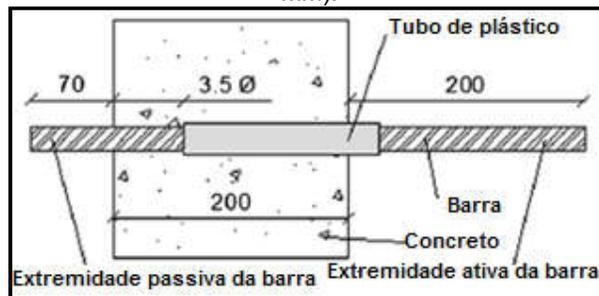
concretos com propriedades distintas, incorporando materiais, com variações geométricas nos moldes e também diferentes valores de comprimento de ancoragem. Destacam-se os estudos com:

- concretos com diferentes classes de resistência (8 MPa a 60 MPa): Arel e Yazici (2012);
- barras de diâmetros inferiores a 10 mm: Carvalho *et al.* (2017);
- concretos auto adensáveis: Helincks *et al.* (2013), Sfikas e Trezos (2013), Pop *et al.* (2013), Mousavi *et al.* (2017);
- concretos com diferentes adições: cinzas volantes (AREZOUMANDI *et al.* 2013), geopolímeros (DAHOU *et al.* 2016), fibras de aço (ALKAYSI e EL-TAWIL, 2017; GARCIA-TAENGUA *et al.* 2016), material álcali-ativado (BILEK *et al.*, 2017);
- concretos com substituição de agregados naturais por agregados reciclados: Kim e Yun (2013), Prince e Singh (2013), Guerra *et al.* (2014), Fernandez *et al.* (2016), Shang *et al.* (2017), Wardeh *et al.* (2017);
- aderência sob diferentes condições de carregamento: Torre-Casanova *et al.* (2013), Li *et al.* (2015), Lin *et al.* (2017);
- concretos nas primeiras idades: Song *et al.* (2015);
- concretos com elevada resistência: Dybel e Furtak (2015), Shen *et al.* (2016);
- concreto exposto a elevadas temperaturas: Ergun *et al.* (2016);
- efeito da geometria do corpo de prova do ensaio: Rosales *et al.* (2016);
- concreto leve: agregado natural leve (AL-SHANNAG e CHARIF, 2017), pérolas de isopor (EPS) (SARTORI *et al.*, 2017).

Os parágrafos seguintes apresentam alguns dos principais resultados dos trabalhos mais recentes sobre aderência aço-concreto.

Helincks *et al.* (2013) utilizaram aços com diâmetros de 8, 12, 16 e 20 mm, com comprimento de ancoragem $3,5\phi$ (Figura 2-23) definido por meio de cálculos e baseados em afirmações da literatura que alegam escoamento da armadura anterior ao arrancamento, durante o desenvolvimento do ensaio. Neste trabalho, os valores de tensão de aderência foram superiores para o concreto auto adensável.

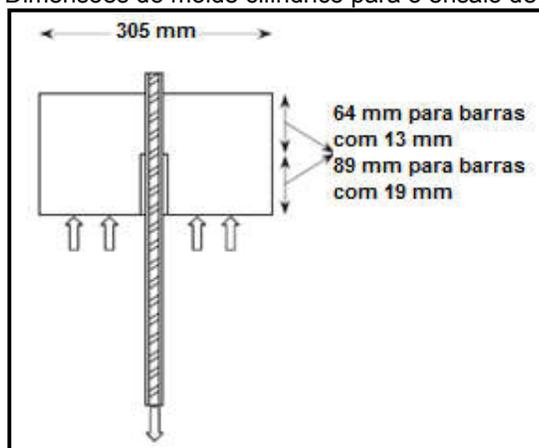
Figura 2-23: Dimensões do corpo de prova do ensaio de arrancamento (Dimensões em mm).



Fonte: Adaptado Helincks *et al.* (2013).

Arezoumandi *et al.* (2013) estudaram a influência de concretos com cinzas volantes sobre a aderência, utilizando corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 30,5 cm e altura em função do diâmetro da armadura avaliada, barras de aço com 13 e 19 mm de diâmetro, e comprimento de aderência de 5ϕ , Figura 2-24. Para as barras com diâmetro menor, as tensões de aderência apresentaram casos valores inferiores para concretos com cinzas e casos com valores equivalentes entre os concretos, com cinza e convencional. A avaliação com as barras com diâmetro de 19 mm indicaram tensões superiores para o concreto convencional.

Figura 2-24: Dimensões do molde cilíndrico para o ensaio de arrancamento.



Fonte: Adaptado Arezoumandi *et al.* (2013).

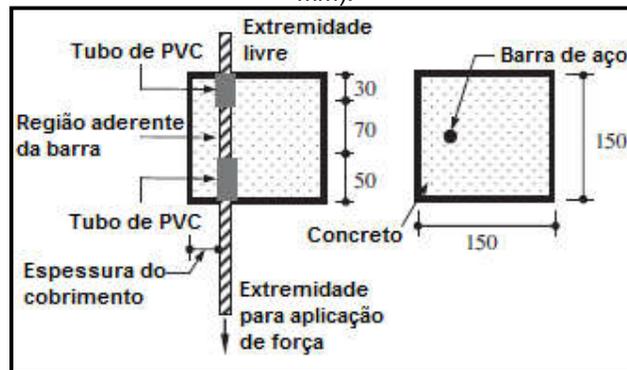
Torre-Casanova *et al.* (2013) avaliaram as condições de confinamento (passivo e ativo) do corpo de prova no ensaio de arrancamento. Os autores utilizaram moldes cúbicos com dimensões de 15ϕ , barras de aço com 12,5 mm de diâmetro, concreto com resistência de 37 MPa e relação c/ϕ (cobrimento de concreto e diâmetro da barra) igual a 7. No confinamento ativo, foram aplicadas cargas de 5 MPa e 10 MPa nos corpos de prova durante o ensaio de

arrancamento e o confinamento passivo, consistiu apenas no efeito proporcionado pelo concreto. Os resultados experimentais foram utilizados para a realização de uma análise numérica, a partir da qual foram estudadas as condições de ruptura dos corpos de prova. Além disso também foram obtidas equações capazes de estimar os modos de falhas, se por fendilhamento ou arrancamento, utilizando os parâmetros dos materiais e cobrimento do molde de concreto. Os resultados do ensaio indicaram ruptura por arrancamento e tensões de aderência superiores ao encontrados na literatura, justificado pela maior relação c/ϕ da pesquisa. Os autores concluíram que o confinamento ativo aplicado não afetou significativamente os resultados de tensão de aderência.

O trabalho de Guerra *et al.* (2014) avaliou também a influência da variação do comprimento de ancoragem sobre a aderência, empregando comprimentos de 5ϕ , 10ϕ e 15ϕ , por meio do ensaio de arrancamento. Os autores selecionaram barras nervuradas com 12 e 16 mm de diâmetro e corpos de prova cilíndricos de (20x30) cm. Os resultados indicaram redução das tensões de aderência com o aumento da substituição dos agregados, porém foi observada melhoria da aderência com o aumento da ancoragem, devido a maior contato entre aço-concreto. Os autores ressaltaram que todos os corpos de prova apresentaram ruptura por fendilhamento com fissuras mais significativas para os moldes com maior comprimento de ancoragem.

Song *et al.* (2015) estudou a aderência entre concreto, nas idades iniciais até 28 dias, e barras nervuradas com 10, 14 e 18 mm de diâmetro. Os autores também estudaram as relações entre cobrimento de concreto e diâmetro das barras (c/ϕ) e o conseqüente modo de falha, alterando a configuração do molde para o ensaio (Figura 2-25). O comprimento de ancoragem empregado foi de 70 mm, independente do diâmetro, porém não foi descrito nenhum motivo para esta determinação. Os resultados apresentados indicaram uma relação linear entre a idade do concreto e a tensão de aderência, ou seja, concreto com mais idade proporciona maiores valores de aderência. Além disso, os autores observaram falha por fendilhamento para todos os corpos de prova, o que segundo eles era esperado devido aos baixos valores da relação cobrimento diâmetro (c/ϕ).

Figura 2-25: Características do molde para o ensaio de arrancamento (Dimensões em mm).

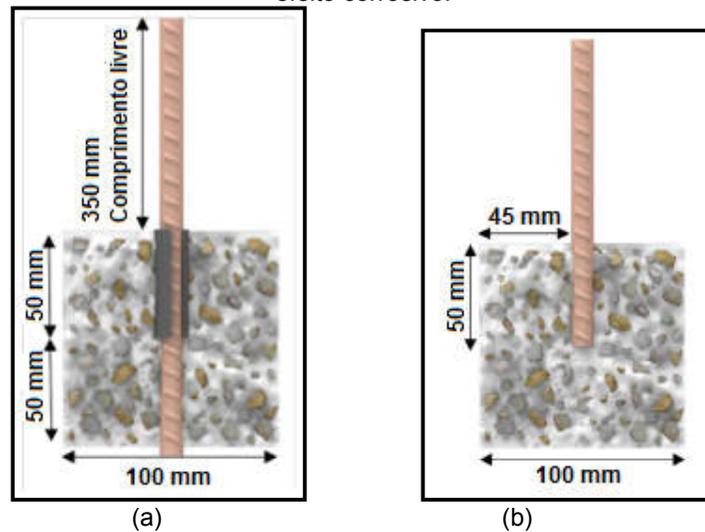


Fonte: Adaptado Song *et al.* (2015).

Fernandez *et al.* (2016) estudaram, além da aderência em relação a agregados reciclados, a influência de condições patológicas de corrosão sobre a aderência. Os autores empregaram moldes cúbicos (10x10x10 cm) para o ensaio de arrancamento, comprimento de ancoragem de 50 mm e barras de aço nervuradas com 10 e 12 mm de diâmetro, porém com configurações distintas para as condições de ancoragem, como indica a Figura 2-26, de acordo com a avaliação da corrosão. Segundo os autores, as características dos moldes proposta para a análise de corrosão é mais adequada para o estudo desta condição patológica. Moldes com barras de 10 mm foram expostos a condições de corrosão, com diferentes graus de intensidade. Os resultados indicaram ruptura por fendilhamento, para todos os corpos de prova, devido às dimensões consideradas insuficientes para garantir o confinamento.

Os resultados de tensão de aderência não apresentaram diferenças significativas para a substituição do agregado, para os moldes que não passaram pelo processo corrosivo. Para grupo que foi submetido às condições corrosivas, os resultados indicaram maior sensibilidade do concreto convencional ao processo patológico, com valores de tensão mais baixos. No entanto, com o aumento do grau de corrosão as diferenças de redução de tensão de aderência entre concreto convencional e concreto com agregado reciclado, ficaram menos significativas.

Figura 2-26: Moldes para o ensaio de arrancamento (a) Ensaio comum. (b) Análise do efeito corrosivo.



Fonte: Adaptado Fernandez *et al.* (2016).

Rosales *et al.* (2016) estudaram a influência da forma dos moldes sobre aderência por meio do ensaio de arrancamento, comparando resultados experimentais com aqueles encontrados a partir de modelagem computacional. Para a fase experimental os autores trabalharam com concreto convencional de 30 MPa e barras de aço CA 50 de diâmetros 8, 10 e 12 mm. O ensaio foi desenvolvido com corpos de provas cúbicos com dimensões de (20x20) cm, conforme a recomendação da norma, e cilíndricos com dimensões de (15x20) cm e comprimento de ancoragem fixo igual a 100 mm. Os resultados experimentais, também comprovados pelo modelo numérico, de tensões máximas de aderência, para os moldes cilíndricos, apresentaram incrementos entre 5 e 10% com relação aos moldes cúbicos, onde os maiores incrementos foram observados para as barras de diâmetro menor. Os autores atribuíram estes resultados a possibilidade de melhor distribuição de tensões propiciada pela forma dos corpos de prova cilíndricos.

Carvalho *et al.* (2017) estudaram a aderência com barras de aço com diâmetro inferior a 10 mm (barras finas), entalhadas CA-60 (5,0; 8,0 e 9,5 mm de diâmetro) e nervuradas CA-50 (6,3; 8,0 e 10 mm de diâmetro) e concreto C25. Além do ensaio de arrancamento, com moldes cúbicos seguindo as recomendações da EN:10080 (2005), os autores também realizaram o ensaio de barras confinadas e o ensaio de vigas (Beam Test). Os resultados indicaram que, para o ensaio de barras confinadas, apenas as barras nervuradas com

diâmetros de 6,3 mm e 8,0 mm alcançaram valores de coeficiente de conformação adequados à prescrição normativa brasileira (ABNT NBR 7480 (2007)). Os valores de tensão de aderência com o Pull-out test apresentaram elevada dispersão, possivelmente associada ao pequeno comprimento de ancoragem (5ϕ). Já para o ensaio de vigas, os resultados obtidos apresentaram uma menor dispersão e um melhor desempenho de aderência em comparação ao pull-out test, sendo este resultado associado ao comprimento de ancoragem maior utilizado nas vigas (10ϕ) melhor para o grupo de barras finas.

Em função dos resultados insatisfatórios com relação ao coeficiente de conformação superficial (η) os autores sugeriram uma formulação, equação 11, baseada em normas brasileira e francesa, para o cálculo do coeficiente de conformação superficial, a partir dos resultados de tensão de aderência obtidos no ensaio de arrancamento.

$$\eta = \sqrt{\frac{\tau_u}{f_{tj}}} \quad (11)$$

Onde:

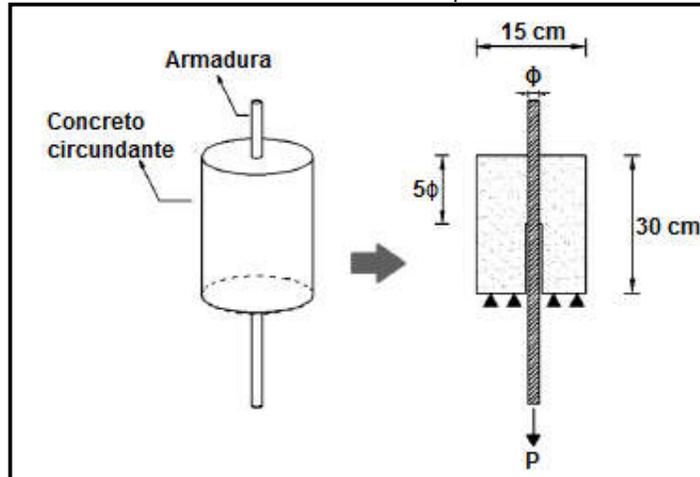
η = coeficiente de conformação superficial;

τ_u = tensão última de aderência, obtida no ensaio de arrancamento; e

f_{tj} = resistência do concreto a tração.

Os resultados apontaram ganho de desempenho tanto para as barras entalhadas quanto para as nervuras, já que os valores calculados foram superiores aos prescritos pela ABNT NBR 7480 (2007). Portanto, segundo os autores, o emprego desta metodologia para a determinação do coeficiente de conformação superficial, com os resultados do Pull-out test, mostrou-se adequada e melhor em comparação ao ensaio de barras confinadas.

Figura 2-27: Características do molde cilíndrico para o ensaio de arrancamento.



Fonte: Adaptado Mousavi *et al.* (2017).

Mousavi *et al.* (2017) desenvolveram equações para avaliar a tensão de aderência e o comprimento de ancoragem entre concreto auto adensável e barras de aço, a partir das equações disponíveis na literatura para concreto convencional. Os resultados das equações, propostas e aquelas presentes na literatura, foram comparados com resultados experimentais do Pull-out test, no qual utilizaram barras com diâmetro de 8,0; 10 e 12 mm, moldes cilíndricos de (15x30) cm e comprimento de ancoragem de 5ϕ , como indica a Figura 2-27. A maioria dos corpos de prova apresentou falha por arrancamento, indicando confinamento adequado proporcionado pela dimensão do molde. Os autores concluíram que os resultados analíticos obtidos pelas equações por eles propostas ficaram mais próximos aos valores experimentais, com erros absolutos menores e coeficientes de variação mais baixos.

Sartori *et al.* (2017) estudaram a aderência por meio do ensaio de arrancamento entre concreto convencional, concreto leve com EPS e barras de aço CA-60 (5,0 mm) e CA-50 (6,3; 8,0; 10 e 12,5 mm). Os moldes utilizados no ensaio foram cilíndricos com diâmetro de 15 cm com comprimento de ancoragem de 5ϕ , para os moldes com EPS, e variável para os moldes com concreto convencional. Destaca-se que foi realizado um projeto piloto, com barras de 10 mm de diâmetro, a partir do qual ocorreram rupturas por escoamento da armadura utilizando comprimento de ancoragem maiores, 25 cm para o concreto leve e 15 cm para o concreto convencional. Os resultados indicaram diferenças entre os valores experimentais que representam a resistência de aderência segundo a literatura, equivalente a um deslizamento de 0,1 mm, e os valores normativos, sendo ainda mais significativo para a mistura com EPS. Para o concreto

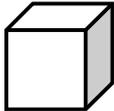
convencional, foi observada uma diferença maior entre os valores das tensões máximas e valores de tensão para um deslizamento de 0,1 mm. Além disso, a pesquisa indicou menor capacidade de aderência para o concreto com EPS, dada a sua resistência menor.

Independente do objetivo de pesquisa, muitos trabalhos já utilizam variações das recomendações da RILEM-RC6 (1983), apresentada na EN:10080 (2005) no Pull Out Test. O emprego de corpos de prova cilíndricos é praticado nos estudos sobre a aderência, porém não há pesquisas que atestem a confiabilidade dos resultados obtidos com esta configuração e nem sobre os fatores que podem alterar o fenômeno e se são decorrentes deste padrão de molde, como, por exemplo, a posição da barra durante a concretagem, abordado neste trabalho.

3. Materiais e Métodos

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi composta por ensaios de arrancamento, apresentados na Tabela 3-1, e ensaios de caracterização dos materiais. A metodologia também inclui uma avaliação analítica da influência da forma do corpo de prova e o seu modo de falha no ensaio de arrancamento, considerando como parâmetro principal o cobrimento de concreto da barra de aço.

Tabela 3-1: Resumo dos ensaios da pesquisa.

Ensaio	Barras de Aço	Corpos de Prova	Diâmetros (mm)	Número de CP's
Arrancamento	Nervuradas CA-50	 Cúbico (20x20cm)	6,3	6
			8,0	
			10	
		 Cilíndrico (15x15cm)	6,3	6
			8,0	
			10	

Fonte: Própria autora.

Os ensaios de arrancamento foram realizados com o objetivo de determinar as tensões de aderência máximas entre as barras de aço e concreto convencional com resistência de 30 MPa, para cada geometria de corpo de prova. A partir dos dados de ensaio também foram determinados gráficos de tensão de aderência *versus* deslizamento.

Os seguintes tópicos deste capítulo descrevem os materiais e as metodologias adotadas.

3.1. Materiais

3.1.1. Concreto

O concreto adotado foi dosado para resistência a compressão de (25 ± 5) MPa, aos 28 dias, conforme especificado na norma EN:10080 (2005). A mesma

dosagem foi adotada para todos os lotes de concretagem. O traço utilizado é apresentado na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Características do traço utilizado para as concretagens.

Traço (em peso)	Cimento (kg/m ³)	Fator (a/c)	Superplastificante (%cimento)
Cimento : areia : brita 1 : 2,70 : 2,98	317	0,7	2,0

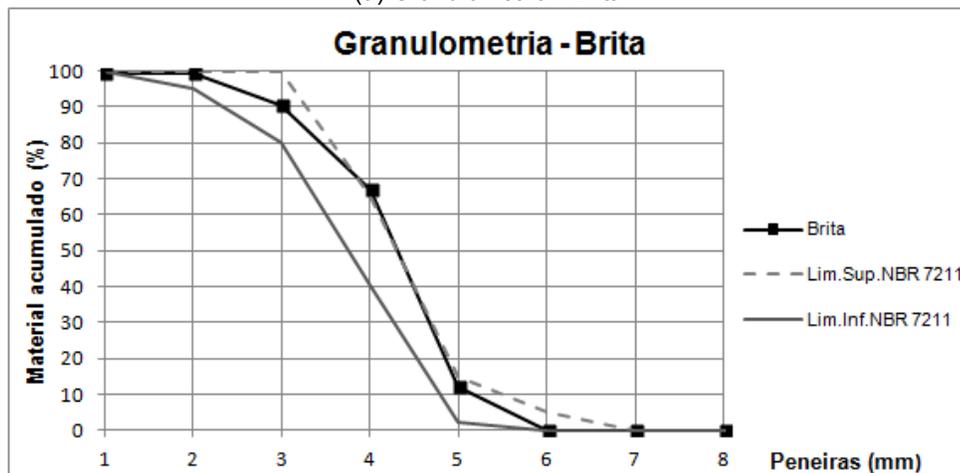
Fonte: Própria autora.

O cimento utilizado no traço é o CPV ARI, escolhido por conter adições em menor quantidade. Foi utilizado aditivo superplastificante Muraplast FK 22 fornecido pela MC-Bauchemie, para obter um concreto com abatimento entre 100 e 160 mm. Essa consistência é importante para um adequado adensamento dos pequenos corpos de prova.

A areia empregada foi de granulometria média, módulo de finura 2,200 e massa específica 2.550 kg/dm³. Já o agregado graúdo foi a brita zero gnaisse fornecida pela BetonMix de procedência da Mineração Santiago, com diâmetro máximo de 12,5 mm e massa específica 2.680 kg/dm³. Como indicado na Figura 3-1, ambos os materiais estão de acordo com os limites prescritos na ABNT NBR 7211 (2009)– Agregados para concreto – Especificação.

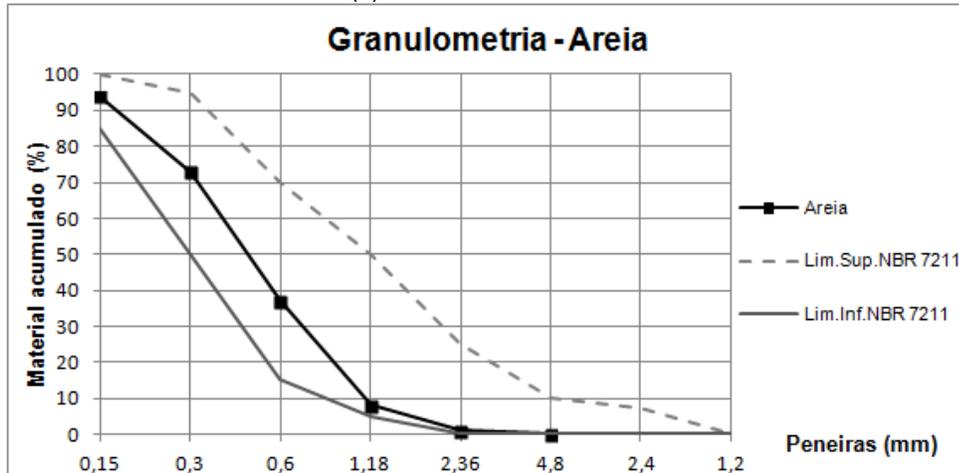
Água fornecida pela rede de abastecimento municipal.

Figura 3-1 (a) (b): Curvas granulométricas dos agregados
(a) Granulometria - Brita



Fonte: Própria autora.

(b) Granulometria - Areia



Fonte: Própria autora.

3.1.2. Barras de aço

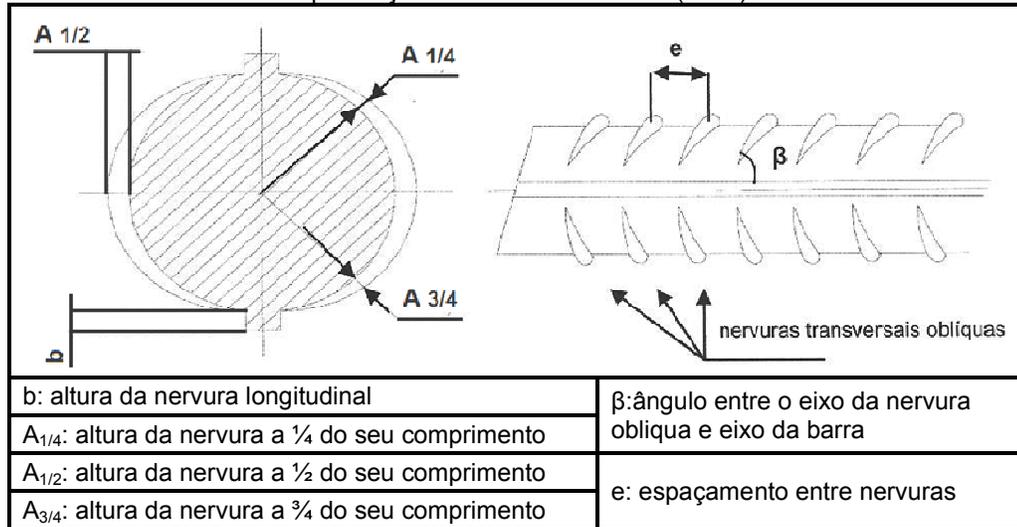
As barras de aço nervuradas empregadas para a realização do ensaio de arrancamento são do tipo CA-50, com diâmetros de 6,3 mm; 8,0 mm e 10 mm fornecidas pela Belgo Bekaert Arames, Figura 3-2. As características das nervuras estão esquematicamente representadas na Figura 3-3 e os valores referentes aos materiais utilizados neste trabalho estão apresentados na Tabela 3-3.

Figura 3-2: Barras de aço nervuradas CA-50.



Fonte: Própria autora.

Figura 3-3: Características geométricas das nervuras das barras de aço CA-50 segundo as prescrições da ABNT NBR 7480 (2007).



Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7480 (2007).

Tabela 3-3: Propriedades geométricas das nervuras para as barras de aço CA-50.

<i>Diâmetro – ϕ</i> <i>(mm)</i>	<i>Altura - b</i> <i>(mm)</i>	<i>Ângulo - β (45° a</i> <i>75°)</i>	<i>Espaçamento – e</i> <i>(mm)</i>
6,3	0,27	64°	4,76
8,0	0,33	65°	5,81
10,0	0,57	65°	6,84

Fonte: Própria autora.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização do concreto

Para a avaliação da resistência à compressão do concreto foram realizados os ensaios: compressão uniaxial, Figura 3-4, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5739 (2007b) – “Concreto – Ensaio de corpos-de-prova cilíndricos”. Foram adotados corpos de prova cilíndricos de dimensões (10 x 20) cm, avaliados ao menos três CP’s de cada lote de concretagem. Os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova foram executados conforme a ABNT NBR 5738 (2015) – “Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”. Os corpos de prova foram armazenados em tanque com água durante 28 dias, até a data dos ensaios. O carregamento foi aplicado com a prensa de compressão com capacidade de 200 toneladas, vinculado à máquina universal DL30000. Os valores de carga foram medidos pela célula de carga do equipamento e os valores de deslocamentos medidos com “clip gages”, sendo os dados coletados pelo sistema de aquisição da máquina, ligado a um computador.

Figura 3-4: Ensaio para determinação da resistência do concreto à compressão – ABNT NBR 5739 (2007b).



Fonte: Própria autora.

Para a determinação da resistência a tração do concreto foi realizado o ensaio de tração diametral segundo a ABNT NBR 7222 (2011) – “Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”. Também foram utilizados corpos de prova com dimensões (10x20) cm, apresentado na Figura 3-5.

Figura 3-5: Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral – ABNT NBR 7222 (2011).



Fonte: Própria autora.

3.2.2. Caracterização das barras de aço

A caracterização das barras de aço foi realizada de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6892 (2013) – “Materiais metálicos – Ensaio de Tração”. A partir do ensaio foram determinados os valores de tensão de

escoamento, módulo de elasticidade e tensão de ruptura. Utilizou-se a máquina universal DL30000 e um “clip gage”, para medir o alongamento das barras, como apresentado na Figura 3-6. Os dados de carregamento e alongamento foram coletados por meio do computador conectado ao sistema de aquisição de dados da prensa.

Figura 3-6: Desenvolvimento do ensaio de caracterização das barras - ABNT NBR 6892 (2013)



Fonte: Própria autora.

3.2.3. Ensaio de Arrancamento (Pull-out Test)

Os ensaios de arrancamento foram realizados de acordo com os procedimentos da EN:10080 (2005).

3.2.3.1. Determinação do tamanho das amostras (n=número de repetições)

O planejamento dos ensaios de arrancamento está presente na Tabela 3-4

Tabela 3-4: Planejamento dos ensaios de arrancamento.

Resposta Pesquisada	Fatores	Níveis dos fatores	Número de repetições (n)
Resistência de aderência	Diâmetros das barras de aço CA-50 nervuradas (mm)	6,3	6
		8,0	
		10	
	Geometria do corpo de prova	Cúbico	
		Cilíndrico	

Fonte: Própria autora.

Portanto, preparados e avaliados 36 corpos de prova com 28 dias de idade, sendo 3 amostras com geometria cúbica e 3 amostras com geometria cilíndrica

(cada amostra: $\phi=6,3$ mm; $\phi=8,0$ mm e $\phi=10$ mm) composta por 6 CP's cada uma.

O número de repetições ($n=6$), apresentado na Tabela 3-4, foi determinado com base nos dados apresentados no trabalho de Miranda e Carvalho (2017). As autoras avaliaram amostras com $n=6$ corpos de prova e como resultado para as barras CA-50, com diâmetro de 8,0 mm, obtiveram um valor igual 1,93 MPa para o desvio padrão. Com o valor do desvio padrão (s) elas calcularam o erro estatístico (e) associado à média amostral, empregando a equação 12:

$$e = t_v * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

Onde, t_v corresponde ao valor relacionado a um nível de confiança de 95%, disposto em tabela, para a "Distribuição de Student".

O erro calculado foi de 2,03 MPa correspondente a 13,09% da média amostral de 15,48 MPa. Visto que, para o ensaio de arrancamento, há dificuldades de obterem-se erros menores, como citado por França (2010), que obteve erros da ordem de 30%, considerou-se razoável o valor igual a 13%. Portanto, para esta pesquisa, foi mantida a amostragem de 6 corpos de prova, de forma a manter ou reduzir o erro associado à média amostral.

3.2.3.2. Modelos para os ensaios

As formas de formato cúbico foram confeccionadas com madeira e possuem dimensões iguais a (20x20) cm como determinado pela RILEM CEB RC6 (1983), Figura 3-7.

As formas cilíndricas foram confeccionadas com material metálico e possuem dimensões iguais a (15x15) cm, Figura 3-8. A definição das dimensões para estas formas tem como objetivo a reutilização de moldes cilíndricos (15x30) cm, confeccionados para ensaios de caracterização do concreto, porém pouco utilizados.

Figura 3-7 - (a), (b): Formas de madeira para CP cúbico.
(a) Elevação



(b) Planta



Fonte: Própria autora.

Figura 3-8 (a), (b): Fôrmas metálicas para CP cilíndrico
(a) Elevação



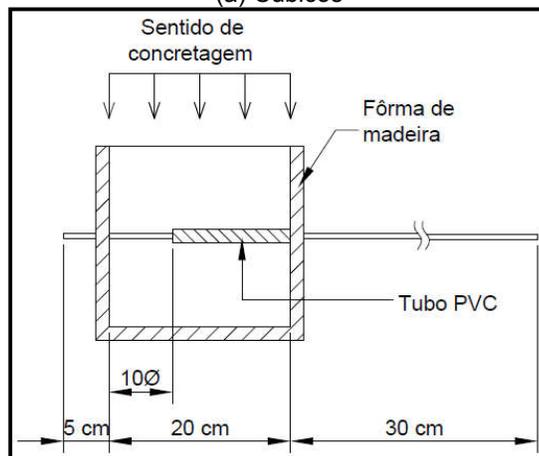
(b) Planta

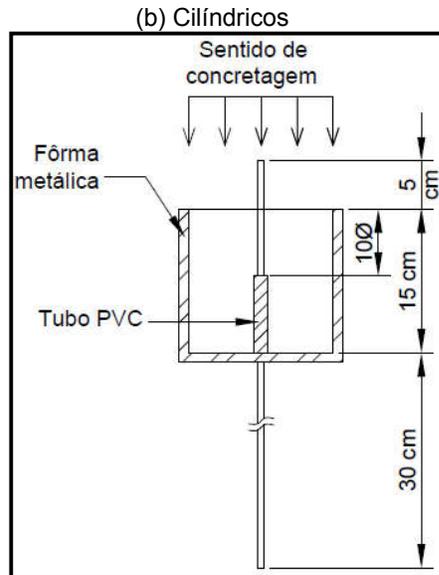


Fonte: Própria autora.

Como já citado anteriormente, e apresentado na Figura 3-9, este trabalho considera o comprimento de ancoragem igual a dez vezes o diâmetros das barras de aço (10ϕ), diferindo do recomendado pela EN:10080 (2005). O trecho das barras que não ficará em contato com o concreto foi isolado com tubo PVC rígido com diâmetro 12.7 mm, e as extremidades das formas de madeiras foram isoladas com tampa plástica.

Figura 3-9 (a), (b): Esquema de concretagem dos CP's.
(a) Cúbicos





Fonte: Própria autora.

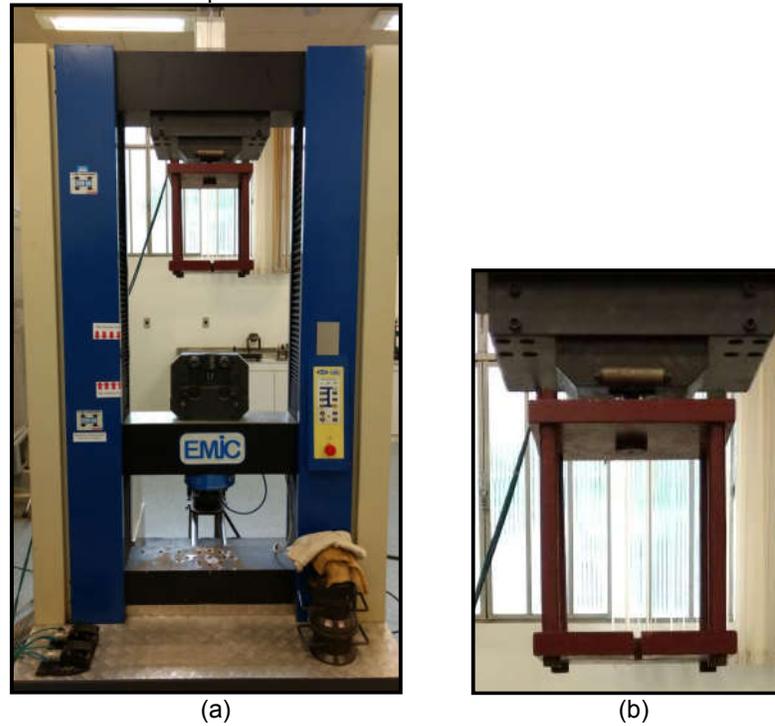
A posição das barras durante a concretagem pode influenciar os valores de tensão de aderência, como destacado por Rehm (1961) e Leonhardt e Monning (1977). Segundo estes autores, as concretagens realizadas com as barras na posição horizontal, Figura 3-9 (a), possuem desempenho inferior para a aderência quando comparado as concretagens com barras na posição vertical Figura 3-9 (b). Dessa forma, apenas a alteração da geometria do corpo de prova, e a conseqüente mudança do sentido de concretagem, podem conduzir a resultados de tensão de aderência superiores aos que são obtidos com os moldes cúbicos.

No interior das fôrmas não foi utilizado óleo desmoldante a fim de evitar qualquer interferência sobre aderência. A vibração dos corpos de prova foi realizada com vibrador de imersão com agulha com 25 mm de diâmetro. Após 24 horas os CP's foram retirados das fôrmas e dispostos em tanques de cura, com solução saturada de hidróxido de cálcio, conforme a norma ABNT NBR 5738 (2015), por 28 dias.

3.2.3.3. Sistema de aplicação de carga

A realização dos ensaios ocorreu na máquina universal DL30000, marca EMIC, cuja capacidade de carga é 300kN, Figura 3-10 (a). Foi desenvolvido um suporte, Figura 3-10 (b), especialmente para a execução dos ensaios de arrancamento, a fim de posicionar adequadamente o corpo de prova.

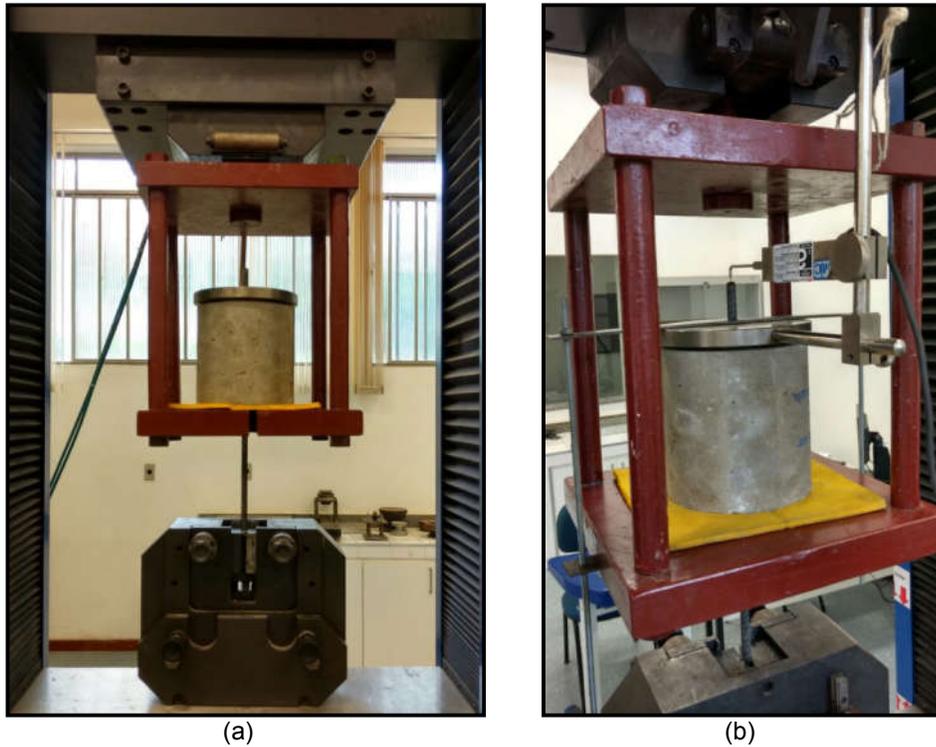
Figura 3-10: (a) Máquina para ensaios. (b) Suporte para posicionamento dos corpos de prova do ensaio de arrancamento.



Fonte: Própria autora.

A carga foi aplicada à extremidade de maior comprimento da barra dos corpos de prova, Figura 3-11 (a), enquanto na outra extremidade foi fixado um transdutor de deslocamentos, conectado ao sistema de aquisição de dados da máquina, como indicado na Figura 3-11 (b). Com os dados coletados, foram obtidas curvas de tensão *versus* deslizamento e calculada a tensão de aderência máxima com a equação 5.

Figura 3-11: (a) Execução do ensaio de arrancamento. **(b)** Transdutor de deslocamentos.



Fonte: Própria autora.

3.2.4. Análise estatística dos resultados do ensaio de arrancamento

Conforme apresentado na Tabela 3-4, um dos objetivos desse estudo é verificar se o fator *geometria do corpo de prova* pode afetar os valores da resistência de aderência entre barras de aço e concreto, obtidos em ensaios de arrancamento. Também deseja-se verificar se esta influência, caso exista, pode ocorrer da mesma maneira para barras com diferentes diâmetros.

A fim de verificar a influência da geometria do corpo de prova sobre a aderência no ensaio de arrancamento, foram feitas análises comparativas com relação às médias das tensões últimas de aderência, para cada amostra do ensaio.

Estas análises comparativas foram realizadas por meio da *Análise de Variância com um fator (ANOVA unidirecional)* que consiste em uma técnica estatística de teste de hipótese empregada em comparações de médias populacionais (LARSON e FARBER, 2010). Este teste de variância deve atender as seguintes condições:

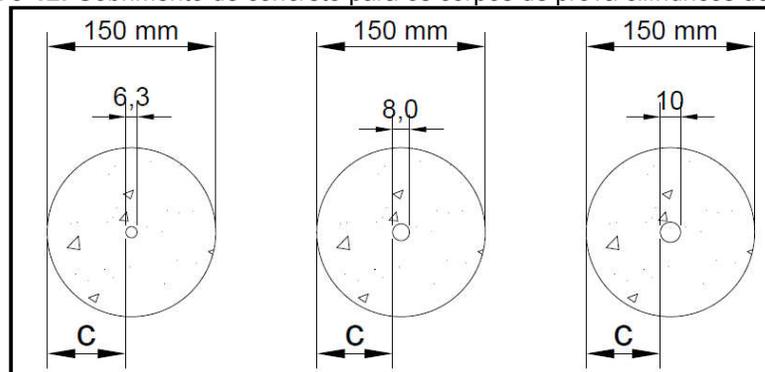
- 1- amostras selecionadas aleatoriamente e provenientes de populações normais ou aproximadamente normais;
- 2- amostras independentes, e
- 3- populações com mesma variância.

As explicações sobre a ANOVA e a comprovação da normalidade dos dados pelo método Shapiro Wilk, estão detalhadas nos Anexo A e B, respectivamente.

3.2.5. Avaliação analítica da resistência de aderência e dos modos de ruptura dos corpos de prova do ensaio.

Conforme citado anteriormente, uma das justificativas desse trabalho é pesquisar um método para o ensaio de aderência de barras finas, uma vez que têm sido apontadas várias dificuldades com o ensaio atualmente normatizado. Portanto, busca-se, a princípio, contribuir para a elaboração de um corpo de prova padrão de ensaio, baseado nos modelos atualmente adotados, mas que seja mais leve, fácil de manusear, apresente menores variações nos resultados, bem como resultados mais confiáveis. Ao se propor corpos de prova menores para os ensaios de arrancamento, tem-se a preocupação com o cobrimento de concreto mínimo da barra de aço, Figura 3-12.

Figura 3-12: Cobrimento de concreto para os corpos de prova cilíndricos do ensaio.



Fonte: Própria autora.

Esse cobrimento deve produzir na barra de aço um confinamento adequado para que a ruptura ocorra por arrancamento da barra e não por fendilhamento do corpo de prova.

De acordo com a revisão de literatura, algumas expressões já foram propostas para associar a tensão de aderência ao modo de ruptura do concreto. Logo,

nesta pesquisa as tensões de aderência foram avaliadas de maneira analítica a partir das equações 7, 8 e uma adaptação da equação 10 apresentadas por Orangun *et al.* (1977), Torre-Casanova *et al.* (2013) e Model Code (2010), respectivamente. Estas formulações são apresentadas a seguir.

$$\tau_u = \left(1,22 + 3,23 * (C/d_b) + 53 * (d_d/l_b) \right) * \sqrt{f_c} \quad (\text{Psi}) \quad \text{Orangun } et al. (1977)$$

$$C/d_b = (0,39 * f_c / f_{ct}) - 0,24 \quad \text{Torre-Casanova } et al. (2013)$$

$$\tau_{u.split} = \eta * 6,54 * \left(\frac{f_{ck}}{20} \right)^{0,25} * \left(\frac{20}{\phi} \right)^{0,20} * \left(\frac{c}{\phi} \right)^{0,33} \quad \text{Adaptada Model Code (2010)}$$

O emprego destas equações, neste estudo, tem como finalidade a avaliação da influência da geometria do corpo de prova na resposta pesquisada (resistência de aderência).

Ressalta-se que, ao fazer a alteração da geometria do corpo de prova, foram alteradas as dimensões dos mesmos e, no que diz respeito às variáveis (fatores) apresentados nas equações acima, será afetado o cobrimento de concreto da barra de aço. Os demais fatores, diâmetro da barra, comprimento de ancoragem e resistência do concreto, permanecerão constantes na mudança de geometria proposta nesta pesquisa.

Quanto à formulação apresentada, a primeira formulação indica uma previsão do valor de tensão de aderência, considerando os parâmetros indicados (ALMEIDA FILHO, 2006; HADI, 2008). Baseado no trabalho de Bazant e Sener (1989), a tensão calculada indica um valor resistente relacionado ao modo de ruptura dos corpos de prova.

Torre-Casanova *et al.* (2013) apresentam a mínima relação cobrimento de concreto e diâmetro de armadura, de acordo com propriedades do concreto, para a qual o modo de ruptura passa de fendilhamento para arrancamento. Assim foram determinados, para cada amostra, os valores mínimos de cobrimento para que a falha ocorresse por arrancamento.

A equação para a tensão última de aderência, considerando a condição de fendilhamento, foi adaptada a partir da formulação proposta pelo Model Code (2010), considerando boas condições de aderência, de acordo com as prescrições

da mesma norma. Como não há armaduras transversais para garantir o confinamento do concreto, o fator K_{tr} que considera estes elementos, foi considerado nulo.

Dessa forma, neste trabalho, os valores de tensão resistente (τ_R) calculados pelas equações 7 e 10 (adaptada), foram comparados aos valores de tensão solicitante (τ_S), obtidos nos ensaios de arrancamento, avaliando a forma de ruptura associada, por fendilhamento ou por arrancamento. Busca-se, assim, confirmar a seguinte consideração:

Se $\tau_S < \tau_R$: arrancamento da barra de aço sem fendilhamento do corpo de prova.

Se $\tau_S \geq \tau_R$: fendilhamento do corpo de prova.

3.2.6. Cálculo do coeficiente de conformação superficial a partir dos ensaios de arrancamento.

A fim de avaliar a sugestão de Carvalho *et al.* (2017) para o cálculo do coeficiente de conformação superficial a partir dos resultados do ensaio de arrancamento, a equação proposta pelos autores, apresentada abaixo, será empregada e estudada, para cada grupo de barras.

$$\eta = \sqrt{\frac{\tau_u}{f_{tj}}}$$

Sendo:

η = coeficiente de conformação superficial;

τ_u = tensão última de aderência, obtida no ensaio de arrancamento; e

f_{tj} = resistência do concreto a tração.

Os valores das variáveis para esta equação, τ_u e f_{tj} , serão os obtidos experimentalmente nos ensaios de arrancamento (tensão última de aderência) e de caracterização do concreto (resistência à tração por compressão diametral), respectivamente. Os resultados para o coeficiente de conformação superficial, calculados a partir desta formulação, serão comparados aos valores previstos na norma ABNT NBR 7480 (2007), apresentados na Tabela 1-1.

4. Apresentação e Análise dos resultados

Os tópicos seguintes apresentam todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais e nos ensaios de arrancamento assim como a análise dos dados apresentados. Em função do comportamento adverso apresentado pelo grupo das barras com diâmetro de 6,3 mm, principalmente com relação aos resultados e análises obtidos no ensaio de arrancamento, uma nova concretagem foi realizada para estas barras. Os resultados são apresentados com a denominação de 6,3_R (ϕ 6,3 – Repetições).

Todos os resultados são apresentados associados ao erro, considerando-se um nível de confiança de 95%, calculados adotando-se a equação 12.

4.1. Caracterização dos materiais

4.1.1. Barras de aço

Os resultados do ensaio de tração das barras estudadas, diâmetros de 6,3 mm, 8,0 mm e 10 mm, são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 4-1: Resultados de caracterização das barras CA-50.

<i>Diâmetro ϕ (mm)</i>	<i>Módulo de Elasticidade médio (E - GPa)</i>	<i>Tensão de escoamento (σ_e - MPa)</i>
6,3	220 \pm 14	662 \pm 55
8,0	215 \pm 7	612 \pm 13
10	215 \pm 7	559 \pm 7

4.1.2. Concreto

Os resultados de caracterização mecânica do concreto são apresentados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Resultados de caracterização do concreto.

<i>Diâmetro ϕ (mm)</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	
	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>
6,3	38,7 \pm 1,4	3,3 \pm 1,4
6,3_R	35,7 \pm 1,7	3,3 \pm 0,1
8,0	32,6 \pm 1,0	2,0 \pm 0,7
10	32,2 \pm 1,3	2,3 \pm 0,6

4.2. Ensaio de Arrancamento

Os resultados para as tensões últimas de aderência, para moldes cúbicos e cilíndricos, são apresentados nas Tabela 4-3 a Tabela 4-6. Os valores foram calculados a partir da formulação apresentada na equação 5.

Tabela 4-3: Resultados do ensaio de arrancamento – diâmetro de 6,3 mm.

Tensão última de aderência (τ_u - MPa) – ϕ 6,3 mm		
CP's	τ_u (MPa)	
	Cúbico	Cilíndrico
Média (\bar{x})	12,0	12,1
Desvio Padrão (s)	0,9	1,9
(CV%)	7,6	16,1
Resultado final de tensão (CP-cúbico): 12,0 \pm 1,0		
Resultado final de tensão (CP-cilíndrico): 12,1 \pm 2,0		

Tabela 4-4: Resultados do ensaio de arrancamento – diâmetro de 6,3_R mm.

Tensão última de aderência (τ_u - MPa) – ϕ 6,3_R mm		
CP's	τ_u (MPa)	
	Cúbico	Cilíndrico
Média (\bar{x})	10,2	11,6
Desvio Padrão (s)	1,9	1,9
(CV%)	18,4	16,5
Resultado final de tensão (CP-cúbico): 10,2 \pm 2,0		
Resultado final de tensão (CP-cilíndrico): 11,6 \pm 2,0		

Tabela 4-5: Resultados do ensaio de arrancamento – diâmetro de 8,0 mm.

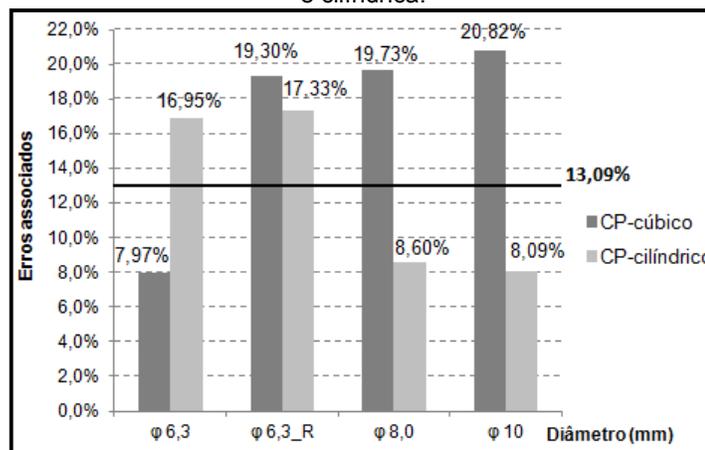
Tensão última de aderência (τ_u - MPa) – ϕ 8,0 mm		
CP's	τ_u (MPa)	
	Cúbico	Cilíndrico
Média (\bar{x})	7,2	10,9
Desvio Padrão (s)	1,3	0,9
(CV%)	18,8	8,2
Resultado final de tensão (CP-cúbico): 7,2 \pm 1,4		
Resultado final de tensão (CP-cilíndrico): 10,9 \pm 0,9		

Tabela 4-6: Resultados do ensaio de arrancamento – diâmetro de 10 mm.

Tensão última de aderência (τ_u- MPa) – ϕ 10 mm		
CP's	τ_u (MPa)	
	Cúbico	Cilíndrico
Média (\bar{x})	9,1	11,3
Desvio Padrão (s)	1,8	0,9
(CV%)	19,8	7,7
Resultado final de tensão (CP-cúbico): 9,1 ± 1,9		
Resultado final de tensão (CP-cilíndrico): 11,3 ± 0,9		

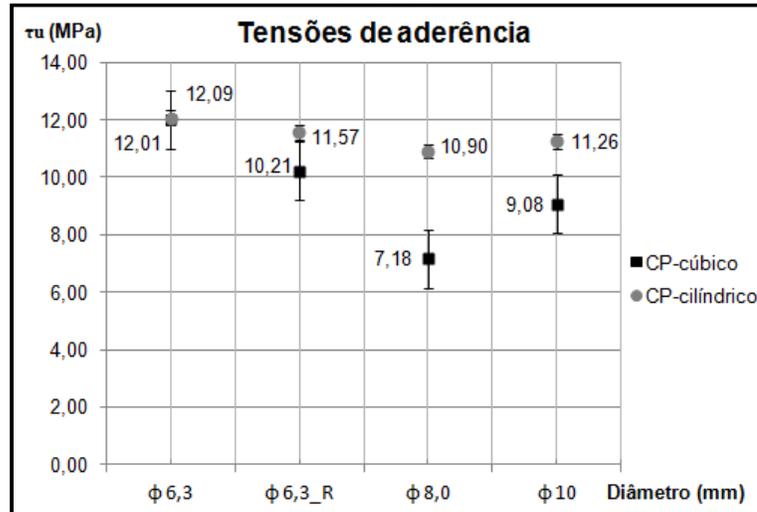
Com exceção dos CP's com $\phi = 6,3$ mm, mesmo considerando o lote de repetição, foram observados que para a geometria cilíndrica os valores do coeficiente (CV) foram os mais baixos, assim como baixos valores de erros associados a tensão de aderência, indicando baixa variabilidade dos resultados e adequada representatividade. Ressalta-se que as relações entre os erros e tensões médias, para os corpos de prova cilíndricos ($\phi 8,0 = 8,6\%$ e $\phi 10 = 8,09\%$) foram inferiores ao adotado como parâmetro (13,09%), citado no item 3.2.3.1. exceto para os grupos com diâmetro de 6,3 mm (16,95%) e 6,3_R (17,33%). Destaca-se que para os CP's cúbicos, o primeiro grupo ($\phi = 6,3$ mm) foi o único que apresentou o erro inferior (7,97%) ao considerado como referência e para grupo de repetição ($\phi = 6,3_R$ mm), os molde cúbicos apresentam erros superiores a referência (19,30%), Figura 4-1.

Figura 4-1: Erros associados as médias das tensões de aderência - Geometrias cúbica e cilíndrica.



As médias amostrais para os valores de tensão de aderência apresentaram diferenças significativas, comparando-se os moldes cilíndricos e cúbicos, para os corpos de prova com diâmetros de 8,0 e 10 mm, na Figura 4-2.

Figura 4-2: Resultados das médias das tensões de aderência – Geometrias cúbica e cilíndrica.



As séries cilíndricas apresentaram valores médios de tensões de aderência maiores que as séries cúbicas. Com o objetivo de avaliar se houve diferenças significativas entre os valores de tensão de aderência dos corpos de prova cúbicos e cilíndricos considerando-se uma confiabilidade de 95% foi realizada uma análise estatística dos dados adotando-se o teste ANOVA.

A comprovação da normalidade dados, necessária para a utilização do teste ANOVA, foi realizada por meio do teste de normalidade Shapiro Wilk. De acordo com os resultados deste teste, apresentados no ANEXO A, os dados de tensão de aderência para os CP's cúbicos e cilíndricos atendem a condição de distribuição normal, com nível de significância $\alpha = 0,05$. Os detalhes do teste ANOVA estão apresentados no ANEXO B.

Para os corpos de prova com barras $\phi = 6,3$ mm o teste ANOVA não indicou diferença entre os resultados médios de tensões de aderência para as geometrias analisadas, tanto no primeiro grupo de concretagem ($F_{1,10} = 0,0082 < F_c = 4,964$; $p\text{-value} > \alpha = 0,05$) quanto no grupo de repetição (6,3_R - $F_{1,10} = 1,528 < F_c = 4,964$; $p\text{-value} > \alpha = 0,05$). Este resultado sugere que a alteração da

geometria do corpo de prova não afetou os resultados de tensão de aderência do ensaio de arrancamento.

Para os corpos de prova com barras $\phi = 8,0$ mm e $\phi = 10$ mm os resultados do teste ANOVA indicaram diferença estatística para os valores de tensão de aderência entre as geometrias cúbicas e cilíndricas ($\phi = 8,0$ mm: $F_{1,10} = 31,78 > F_c = 4,964$; $p\text{-value} < \alpha = 0,05$ e $\phi = 10$ mm: $F_{1,10} = 7,13 > F_c = 4,964$; $p\text{-value} < \alpha = 0,05$). Portanto, de acordo com a avaliação estatística, para estes diâmetros a alteração da geometria dos corpos de prova afetou os resultados de tensão de aderência do ensaio de arrancamento.

Este comportamento pode estar relacionado à melhor distribuição de tensões na interface aço-concreto, proporcionado pelo cilindro, como destacado por Rosales *et al.* (2016), no entanto, pode indicar que a geometria do corpo de prova pode influenciar os resultados de resistência de aderência para barras finas, com o ensaio de arrancamento. Esta questão pode ser um problema para avaliar resultados de ensaios de resistência de aderência, considerando que a literatura apresenta diferentes estudos que avaliam o desenvolvimento da aderência em diferentes condições, como incorporando adições ao concreto, porém com ensaios de arrancamento que empregam diferentes corpos prova. Nestes casos, como por exemplo, em Arezoumandi *et al.* (2013) e Mousavi *et al.* (2017), os a diferença entre os resultados apresentados podem ser devidos à alteração do corpo de prova e não apenas aos materiais.

No caso de controle de qualidade das barras de aço nas fábricas, esta questão também é muito importante, uma vez que ensaio de verificação de aderência são exigidos que trata de aço destinado a armaduras de concreto armado. Conforme citado anteriormente, existe uma grande preocupação quanto ao ensaio atual preconizado pela ABNT NBR 7480 (2007) para avaliação da capacidade de aderência das barras de aço finas.

As curvas de tensão *versus* deslizamento de cada geometria analisada são apresentadas nas Figura 4-3 a Figura 4-10.

Figura 4-3: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 6,3 mm – CP's cúbicos.

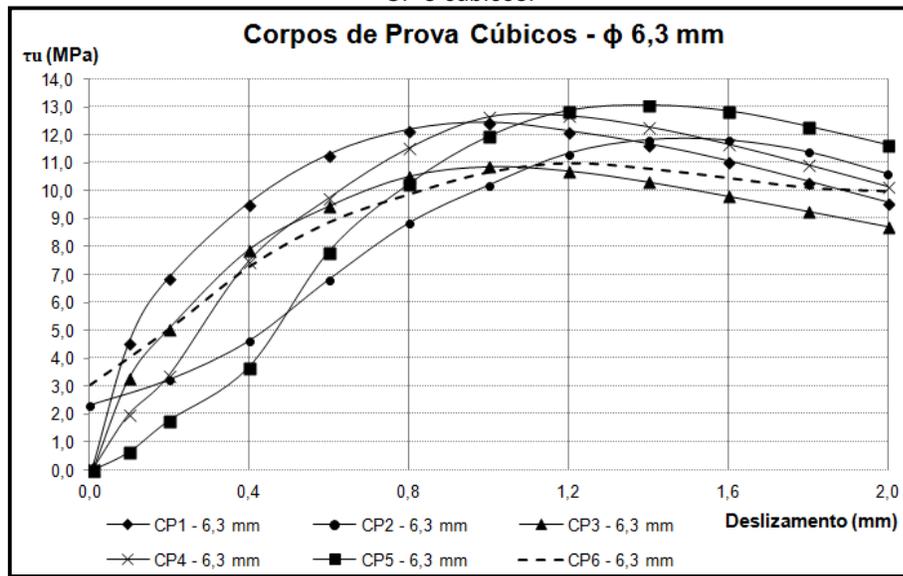


Figura 4-4: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 6,3 mm – CP cilíndrico.

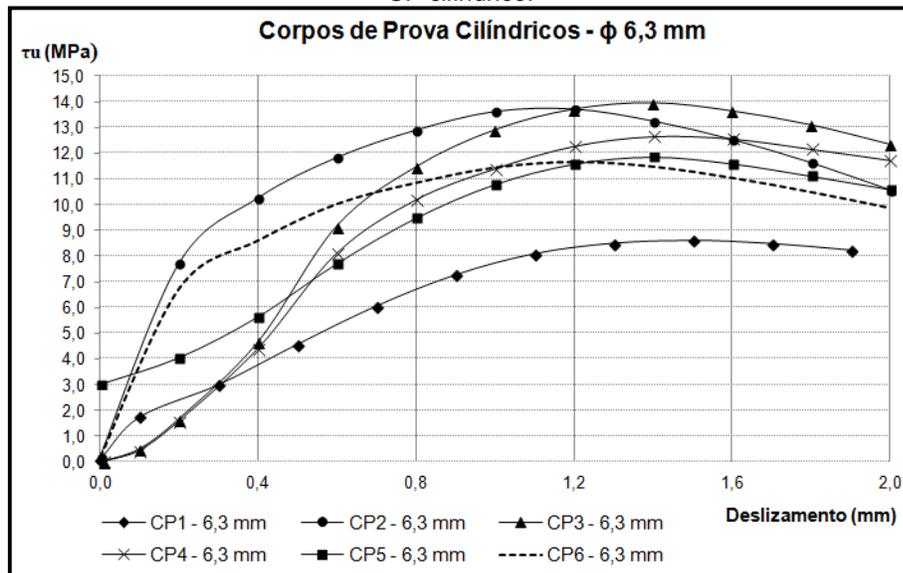


Figura 4-5: Gráfico tensão *versus* deslizamento para barras de diâmetro de 6,3_R mm – CP's cúbicos.

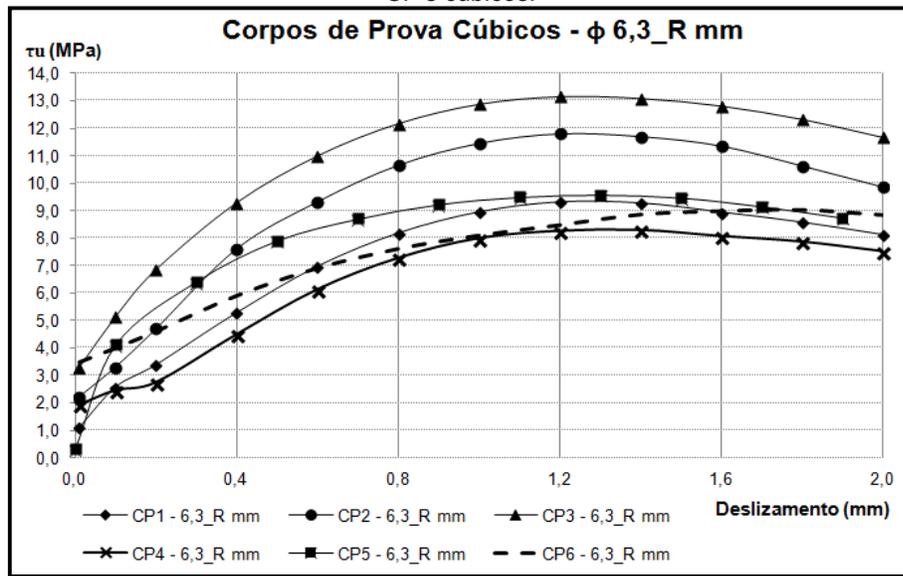


Figura 4-6: Gráfico tensão *versus* deslizamento para barras de diâmetro de 6,3_R mm – CP cilíndrico.

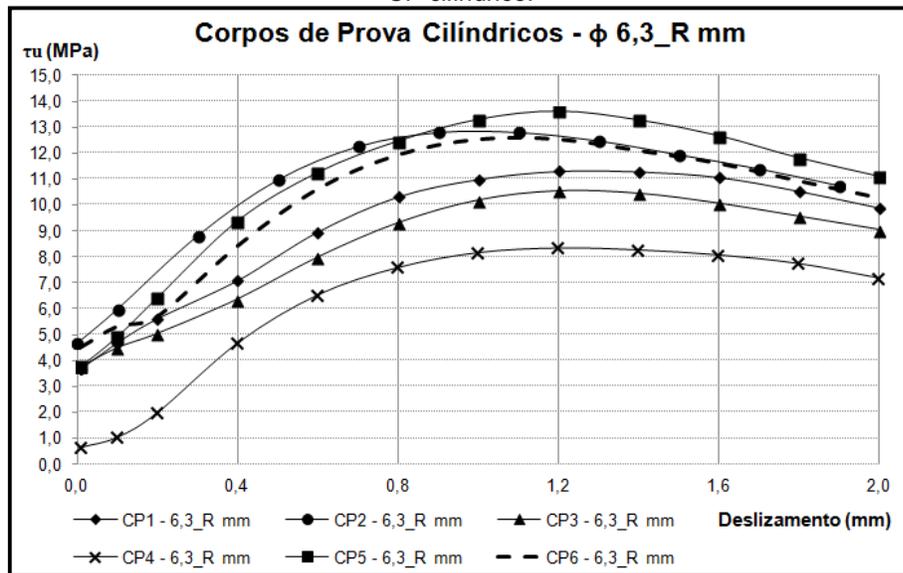


Figura 4-7: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 8,0 mm – CP cúbico.

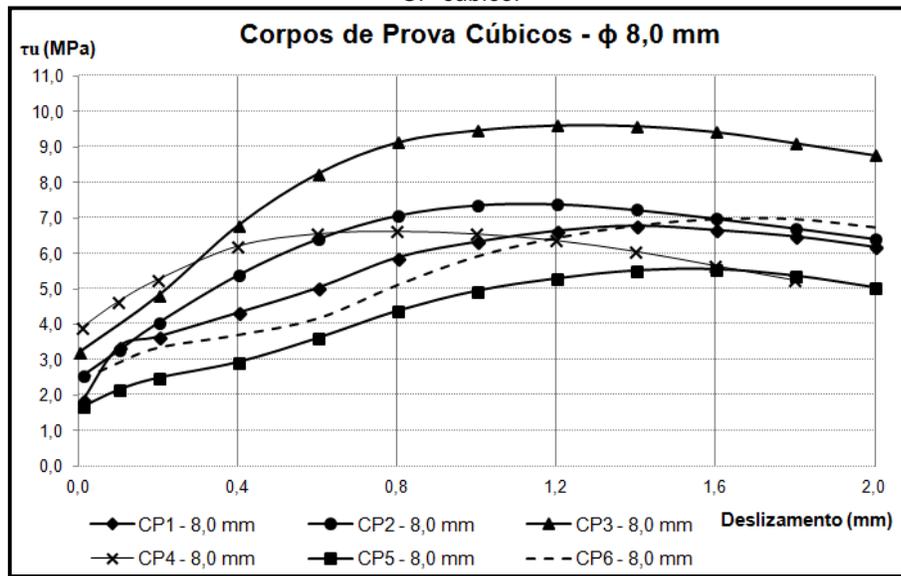


Figura 4-8: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 8,0 mm – CP cilíndrico.

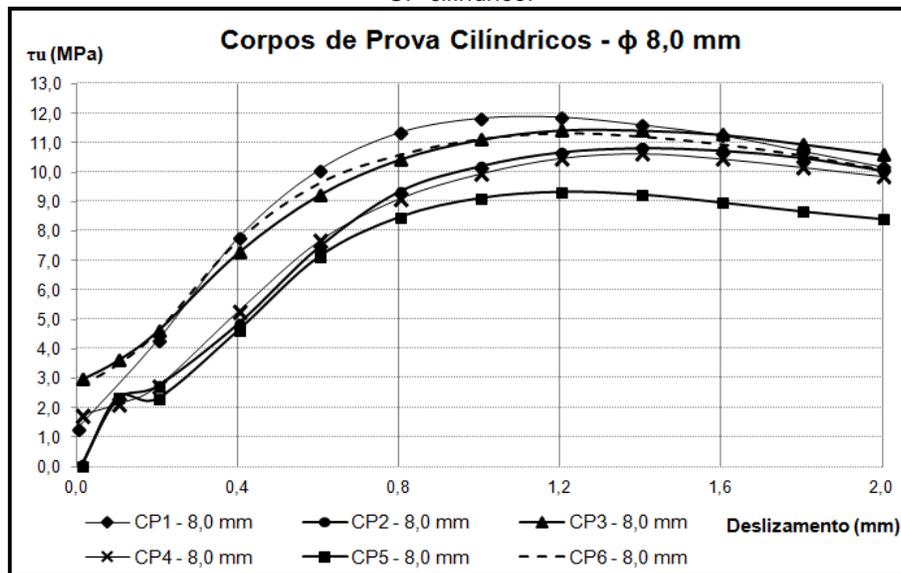


Figura 4-9: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 10 mm – CP cúbico.

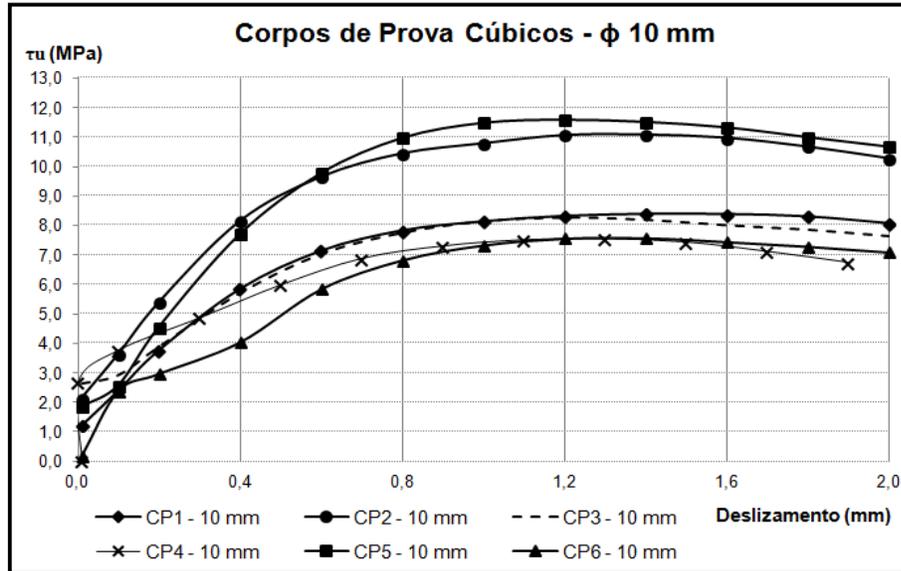
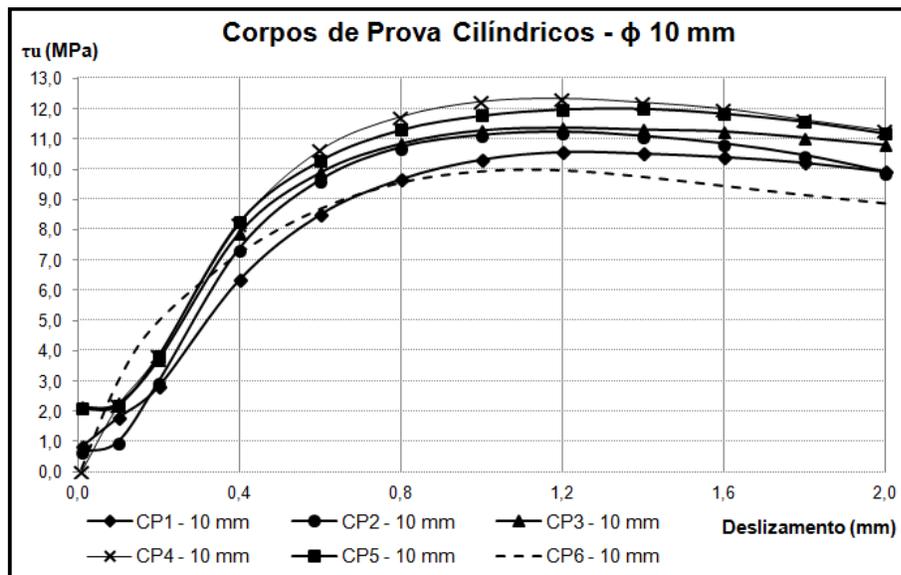


Figura 4-10: Gráfico tensão versus deslizamento para barras de diâmetro de 10 mm – CP cilíndrico.



As curvas indicam que as séries cilíndricas apresentam valores mais homogêneas, principalmente para barras de 8,0 e 10 mm. Destaca-se que as tensões máximas de aderência para a maioria dos corpos de prova, considerando ambas geometrias, foram alcançadas para valores de deslizamentos superiores a 0,1 mm. Segundo Leonhardt e Monning (1977) os

valores de tensão referentes a este deslizamento é o considerado em projetos, para as tensões resistentes. No entanto, o comportamento observado neste trabalho é coerente com o de outros autores (SARTORI *et al.*, 2017), principalmente por se tratar de barras nervuradas, ou de alta aderência.

4.2.1. Comparação dos valores de tensão de aderência obtidos no Pull-out Test com valores obtidos em ensaio de vigas rotuladas apresentados por Carvalho *et al.* (2017)

Conforme citado, os ensaios de viga rotulada também são prescritos pela EN:10080 (2005) para avaliação da resistência de aderência entre aço e concreto. Ressalta-se que o ensaio de vigas representa de forma mais precisa a aderência em elementos fletidos, por isso considerou-se relevante comparar os resultados obtidos no ensaio de arrancamento e ensaio de vigas rotuladas, embora, as metodologias de ensaio sejam diferentes.

A Tabela 4-7 apresenta os resultados de Carvalho *et al.* (2017) com o ensaio de vigas, realizado segundo a EN:10080 (2005) para as barras nervuradas CA-50 e também os resultados de tensão de aderência obtidos por esta pesquisa.

Carvalho *et al.* (2017) adotou concreto com resistência a compressão de (30 ± 3) MPa e com resistência a tração com $(2,5 \pm 0,1)$ MPa.

Tabela 4-7: Resultados de tensões de aderência.

Tensão última de aderência			
(τ_u - MPa) – Pull-out Test x Beam Test			
Diâmetros (mm)	τ_u-Média (MPa)		
	Pull-out test		Beam test
	Cúbico	Cilíndrico	
6,3	12,0	12,1	12,9
6,3_R	10,2	11,6	
8,0	7,2	10,9	11,4
10,0	9,1	11,3	11,0

Como observado na Tabela 4-7, os resultados médios de tensão de aderência dos corpos de prova cilíndricos são mais próximos aos resultados obtidos por pelo ensaio de vigas. Song *et al.* (2015) ressaltam que o ensaio de vigas, apesar das dificuldades para execução, é capaz de representar de forma mais

realista o fenômeno da aderência aço-concreto, em elementos fletidos. Considerando-se a grande importância da definição de comprimentos de ancoragem das armaduras em elementos de concreto, esta aproximação dos resultados dos corpos prova cilíndricos pode indicar que esta geometria é mais adequada para representação da aderência por meio do ensaio de arrancamento.

4.2.2. Avaliação analítica dos resultados de resistência de aderência e modos de ruptura dos corpos de prova no ensaio de arrancamento

Como proposto, as tensões últimas de aderência, segundo a equação 7 (ORANGUN *et al.* 1977) e equação 10 (MODEL-CODE: 2010), foram calculadas e comparadas aos valores experimentais obtidos. As tabelas seguintes, Tabela 4-8 a Tabela 4-11, apresentam os valores, teóricos e experimentais, de tensões, assim como os dados de cada parâmetro descrito nas equações e a forma de ruptura observada nos ensaios.

Tabela 4-8: Avaliação analítica das tensões últimas de aderência:
 $\phi = 6,3 \text{ mm}$ e $l_b=63 \text{ mm}$ - ($f_{ck}=38,7 \text{ MPa}$).

Tensões última de aderência (Teóricas e Experimentais) – CP's cilíndricos.					
CP's	Cobrimento - C (mm)	Tensão de aderência teórica - τ_R (MPa)		Tensão de aderência experimental - τ_S (MPa)	Ruptura
		Orangun <i>et al.</i> (1977)	Model Code (2010)		
CP1	71	22,18	21,62	8,61	Arrancam.
CP2	65	20,59	20,99	13,77	
CP3	69	21,65	21,41	13,96	
CP4	71	22,18	21,62	12,68	
CP5	72	22,44	21,72	11,85	
CP6	72	22,71	21,81	11,66	

Tabela 4-9: Avaliação analítica das tensões últimas de aderência:
 $\phi = 6,3 \text{ mm}$ e $l_b=63 \text{ mm}$ - ($f_{ck}=35,7 \text{ MPa}$).

Tensões última de aderência (Teóricas e Experimentais) – CP's cilíndricos.					
CP's	Cobrimento - C (mm)	Tensão de aderência teórica - τ_R (MPa)		Tensão de aderência experimental - τ_S (MPa)	Ruptura
		Orangun <i>et al.</i> (1977)	Model Code (2010)		
CP1	71	21,30	21,19	11,35	Arrancam.
CP2	68	20,54	20,87	12,87	
CP3	71	21,30	21,19	10,58	
CP4	72	21,56	21,28	8,37	
CP5	73	21,81	21,38	13,61	
CP6	72	21,56	21,28	12,62	

Tabela 4-10: Avaliação analítica das tensões última de aderência:
 $\phi = 8,0 \text{ mm}$ e $l_b = 80 \text{ mm}$ - ($f_{ck} = 32,6 \text{ MPa}$).

Tensões última de aderência (Teóricas e Experimentais) – CP's cilíndricos.					
CP's	Cobrimento - C (mm)	Tensão de aderência teórica - τ_R (MPa)		Tensão de aderência experimental - τ_S (MPa)	Ruptura
		Orangun et. al. (1977)	Model Code (2010)		
CP1	71	16,69	18,25	11,88	Arrancam.
CP2	69	16,30	18,08	10,83	
CP3	70	16,50	18,16	11,43	
CP4	71	16,69	18,25	10,63	
CP5	64	15,35	17,63	9,32	
CP6	71	16,69	18,25	11,33	

Tabela 4-11: Avaliação analítica das tensões última de aderência:
 $\phi = 10 \text{ mm}$ e $l_b = 100 \text{ mm}$ - ($f_{ck} = 32,2 \text{ MPa}$).

Tensões última de aderência (Teóricas e Experimentais) – CP's cilíndricos.					
CP's	Cobrimento - C (mm)	Tensão de aderência teórica - τ_R (MPa)		Tensão de aderência experimental - τ_S (MPa)	Ruptura
		Orangun et. al. (1977)	Model Code (2010)		
CP1	69	13,57	16,01	10,60	Arrancam.
CP2	69	13,57	16,01	11,23	
CP3	72	14,03	16,23	11,37	
CP4	72	14,03	16,23	12,35	
CP5	68	13,42	15,93	12,03	
CP6	69	13,57	16,01	10,02	

De acordo com o apresentado, os valores experimentais de tensão (tensões solicitantes τ_S), ficaram abaixo dos valores teóricos (tensões resistentes τ_R), relacionadas ao fendilhamento do corpo de prova, para os três diâmetros analisados. Ressalta-se que as tensões solicitantes são tensões máximas que representam a ruptura da aderência entre a barra e o concreto, com consequente arrancamento da barra.

Logo, de acordo com as formulações apresentadas, as dimensões dos moldes propostas são adequadas para garantir o confinamento das armaduras e por consequência impedir a ruptura por fendilhamento dos CP's. Dessa forma, corpo de prova cilíndrico (15x15) cm é adequado para as condições apresentadas no ensaio de arrancamento, neste trabalho, ou seja, barras com diâmetros inferiores a 10 mm e concreto com resistência a compressão de $(35 \pm 2) \text{ MPa}$. Destaca-se que em nenhum corpo de prova houve escoamento das barras de aço.

A Tabela 4-12 apresenta os valores mínimos de cobrimento de concreto, para cada diâmetro analisado, abaixo do qual a falha dos corpos de prova seria por fendilhamento segundo a equação 8 (TORRE-CASANOVA *et al.*, 2013).

Tabela 4-12: Cobrimentos mínimos de concreto para garantir falha por arrancamento.

Cobrimento mínimo (C) mm	
ϕ (mm)	Torre- Casanova <i>et al.</i> (2013)
6,3	27,40
8,0	48,46
10	52,42

Foi observado que, segundo a Tabela 4-12, os valores apresentados pela equação são atendidos pelas dimensões propostas para o molde cilíndrico, para todos os diâmetros de barra de aço estudados. Destaca-se que estes resultados estão de acordo com o comportamento observado no ensaio, a inexistência de rupturas por fendilhamento.

4.2.3. Cálculo do coeficiente de conformação superficial a partir dos resultados do ensaio de arrancamento

Nas tabelas seguintes, Tabela 4-13 e Tabela 4-14, são indicados os resultados para o coeficiente de conformação superficial para as barras de aço analisadas, de acordo com a equação 11 proposta por Carvalho *et al.* (2017).

Tabela 4-13: Valores do coeficiente de conformação superficial (η) – CP cúbico.

Corpos de prova cúbicos			
ϕ (mm)	τ_u (MPa)	f_{tj} (MPa)	η
6,3	12,01	3,29	1,91
6,3 R	10,21	3,29	1,76
8,0	7,18	2,02	1,89
10	9,08	2,29	1,99

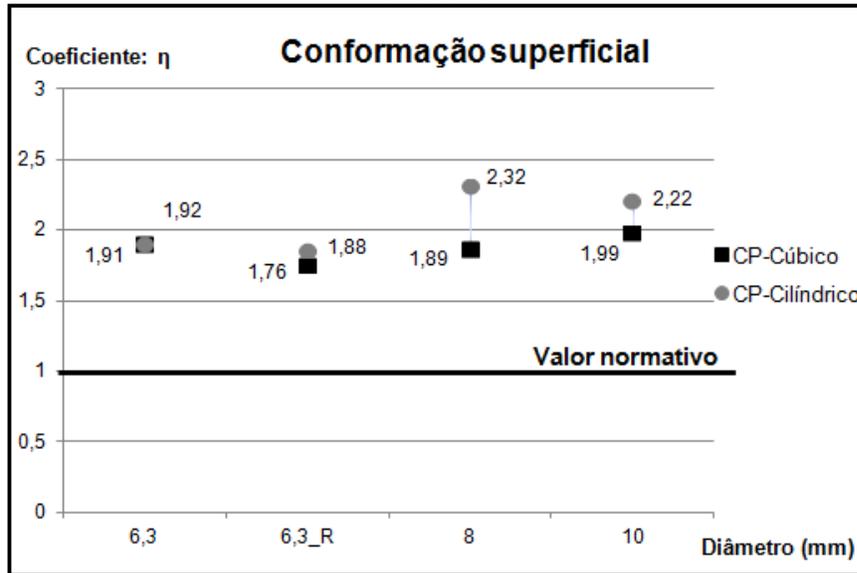
Tabela 4-14: Valores do coeficiente de conformação superficial (η) – CP cilíndrico.

Corpos de prova cilíndricos			
ϕ (mm)	τ_u (MPa)	f_{tj} (MPa)	η
6,3	12,09	3,29	1,92
6,3 R	11,57	3,29	1,87
8,0	10,90	2,02	2,32
10	11,26	2,29	2,22

Como indicado na Figura 4-11, os valores calculados com os dados do ensaio de arrancamento e caracterização do concreto, atendem ao prescrito pela norma ABNT NBR 7480 (2007), a qual determina $\eta = 1,0$ (para $\phi \leq 10$ mm). Destaca-se

que todos os valores obtidos indicam que as barras de aço podem apresentar um desempenho superior ao é esperado segundo a norma, sobretudo no caso dos corpos de prova de geometria cilíndrica.

Figura 4-11: Valores comparativos para o coeficiente de conformação superficial (η) calculado



Ressalta-se que os valores do coeficiente de conformação não apresentaram diferenças significativas entre os diâmetros analisados. Este comportamento também está de acordo com o que apresenta a norma brasileira e também a norma internacional EN:10080 (2005), que agrupam as barras com diâmetro inferior a 10 mm, neste trabalho apresentadas como barras finas. Este resultado é de grande relevância, uma vez que se busca apresentar condições para controle de qualidade da produção de barras de aço a partir dos resultados do ensaio de arrancamento.

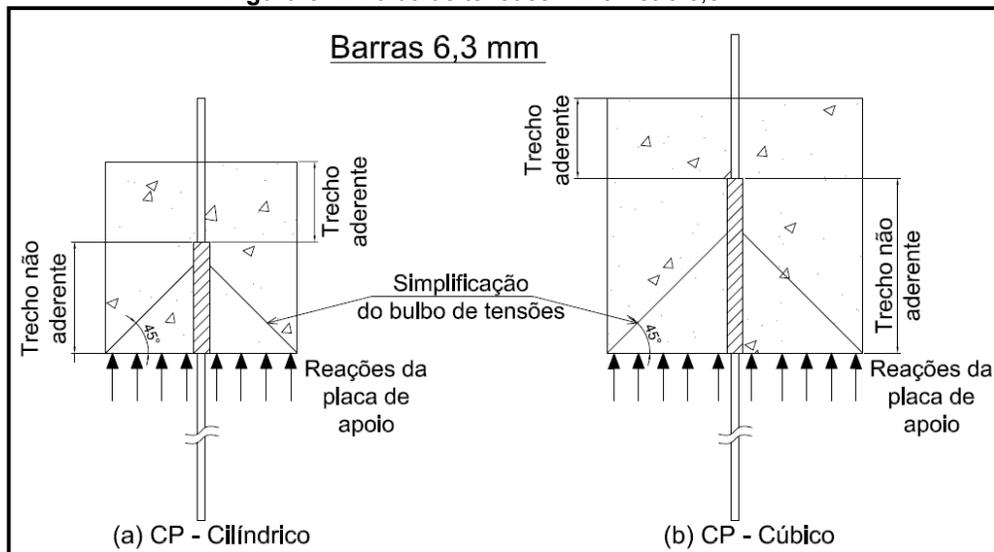
5. Considerações Finais

5.1. Conclusões

Com relação as propriedades mecânicas do concreto, considerando as questões discutidas nesta pesquisa, os resultados apresentados indicaram que o corpo de prova do ensaio de arrancamento pode influenciar os valores de resistência de aderência com barras finas de aço. Os resultados do teste estatístico ANOVA comprovaram, com nível de confiança de 95%, que a alteração da geometria afeta os valores das tensões de aderência obtidas a partir do ensaio de arrancamento. Ademais, o molde cilíndrico indicou uma melhor performance da aderência para as barras estudadas, já que os valores de tensões foram superiores ao molde cúbico.

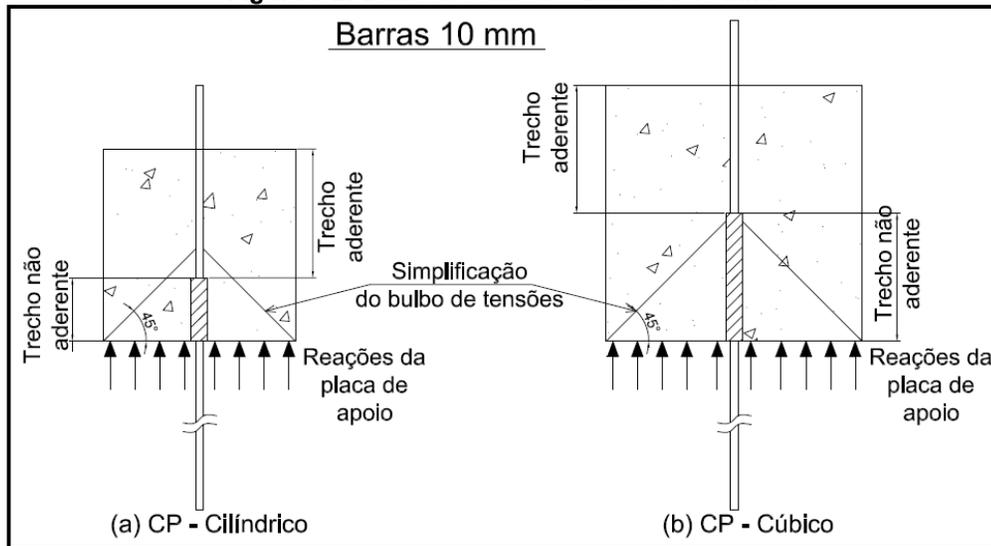
Uma possível explicação para a diferença entre os resultados de tensão de aderência das barras com diâmetro de 6,3 mm e os demais diâmetros pode estar associada ao bulbo de tensões (considerado a 45°) esquematizado na Figura 5-1. Nesta figura observa-se que, no caso dos corpos de prova com as barras de 6,3 mm, o bulbo não atinge o trecho aderente, para ambas as geometrias.

Figura 5-1: Bulbo de tensões – Diâmetro 6,3 mm.



No entanto, para as barras com diâmetros maiores observa-se, conforme mostrado na Figura 5-2, que o bulbo de tensões atinge o trecho aderente para a geometria cilíndrica. Esta condição pode ter contribuído para o aumento das tensões de aderência para esta geometria quando comparados com os corpos de prova cúbicos para a mesma barra. Estas considerações são muito importantes para a definição de um corpo de prova padrão cilíndrico, a ser definido para ensaios de aderência com barras finas.

Figura 5-2: Bulbo de tensões – Diâmetro 10 mm.



Dentre as geometrias estudadas, os moldes cilíndricos, com as dimensões propostas (15x15 cm), mostraram-se adequados para a metodologia de ensaio já que também garantiu o confinamento das barras, destacado pela ruptura por arrancamento das mesmas, comprovado experimentalmente e também por meio de estudos analíticos. Para estes estudos foram comparadas tensões teóricas, calculadas utilizando formulações da literatura, e tensões experimentais. Ressalta-se que os valores teóricos representam o limite de tensão para a ocorrência da ruptura por fendilhamento. Além disso, o modelo de CP proposto é menor comparado ao padrão cúbico (20x20 cm), o que facilita a execução do ensaio, pois os moldes são mais leves e mais fáceis de manipular.

O ensaio de vigas (Beam Test), embora seja mais difícil e laborioso de executar, apresenta resultados considerados mais próximos a realidade da aderência nos elementos estruturais fletidos. Dessa forma, a comparação entre Pull-out Test e Beam Test mostrou-se interessante e indicou que os valores de tensão

alcançados com a geometria cilíndrica foram mais próximos aos apresentados pelo ensaio de vigas. No entanto, observou-se no trabalho utilizado como comparativo, que os coeficientes de variação (%CV) deste ensaio foram superiores aos calculados para os moldes cilíndricos e, portanto a metodologia para o ensaio de arrancamento proposta por esta pesquisa pode ter maior representatividade com resultados de baixa variabilidade.

A análise do parâmetro de conformação superficial (η) indicou um ganho de desempenho das barras estudadas, uma vez que os valores calculados a partir da equação proposta na literatura ficaram consideravelmente superiores ao valor normativo ($\eta=1$). Contudo, não foram observados diferenças significativas entre os valores para os diferentes diâmetros analisados, 6,3; 8,0 e 10 mm, considerando os moldes cilíndricos.

Dessa forma, a partir desta pesquisa é possível sugerir o molde cilíndrico como um modelo referência a ser utilizado nos estudos de aderência entre aço e concreto, utilizando o ensaio de arrancamento. No entanto, o comprimento de ancoragem é um fator muito importante, principalmente nos casos de barras finas, e sugere-se a utilização de dez vezes o diâmetro (10ϕ), o empregado neste trabalho. Além disso, devido a grande relevância da geometria dos corpos de prova na metodologia dos ensaios de aderência, é importante que exista empenho para a padronização do ensaio no Brasil.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como propostas para a continuidade desta pesquisa, sugere-se:

- execução do ensaio de arrancamento utilizando moldes cilíndricos de outras dimensões, avaliando as condições de confinamento do concreto;
- incluir a análise da aderência com a metodologia proposta, entre concreto e barras de aço de outros diâmetros e tipos de aço (lisas, nervuradas e entalhadas);
- verificar a validade da equação proposta na literatura para o cálculo do parâmetro de conformação superficial (η) para as diferentes configurações de barras de aço e a comparação de resultados com as prescrições normativas, e
- incluir análises com concretos com classes de resistência diferentes, utilizando o modelo de ensaio de arrancamento com moldes cilíndricos.

6. Bibliografia

AL-SHANNAG, M. J.; CHARIF, A. Bond behavior of steel bars embedded in concretes made with natural lightweight aggregates. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, jun. 2017.

ALKAYSI, M.; EL-TAWIL, S. Factors affecting bond development between Ultra High Performance Concrete (UHPC) and steel bar reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 412–422, jul. 2017.

ALMEIDA FILHO, F. M. D. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

AREL, H. Ş.; YAZICI, Ş. Concrete–reinforcement bond in different concrete classes. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 78–83, nov. 2012.

AREZOUMANDI, M.; WOLFE, M. H.; VOLZ, J. S. A comparative study of the bond strength of reinforcing steel in high-volume fly ash concrete and conventional concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 919–924, mar. 2013.

ASSOCIAÇÃO-BRASILEIRA-DE-NORMAS-TÉCNICAS. **NBR 7477 - Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras de Concreto Armado – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, Brasil, 1982.

____. **NBR 7480 – Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. Rio de Janeiro, Brasil, 2007a.

____. **NBR 5739 - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, Brasil, 2007b.

____. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro,

Brasil, 2009.

____. **NBR 7222 – Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.**Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

____. **NBR ISO 6892 – Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente.**Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

____. **NBR 6118 – Projetos de Estruturas de Concreto, Procedimentos.**Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

____. **NBR 5738 - Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.**Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência em concretos de diferentes classes de resistência.** Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2001.

BAZANT, Z. P.; SENER, S. Size Effect in Pullout Tests. **Materials Journal**, v. 85, n. 5, 1989.

BILEK, V.; BONCZKOVÁ, S.; HURTA, J.; PYTLÍK, D.; MROVEC, M. Bond Strength Between Reinforcing Steel and Different Types of Concrete. **Procedia Engineering**, v. 190, p. 243–247, 2017.

CARVALHO, E. P.; FERREIRA, E. G.; CUNHA, J. C. DA; RODRIGUES, C. D. S.; MAIA, N. D. S. Experimental investigation of steel-concrete bond for thin reinforcing bars. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 14, p. 1932–1951, 2017.

CARVALHO, R. C. E; FILHO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado.** São Paulo: Edufscar, 2004.

DAHOU, Z.; CASTEL, A.; NOUSHINI, A. Prediction of the steel-concrete bond strength from the compressive strength of Portland cement and geopolymer

concretes. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 329–342, ago. 2016.

DUMÊT, T. B. **Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, São Carlos., 2003.

DYBEŁ, P.; FURTAK, K. The effect of ribbed reinforcing bars location on their bond with high-performance concrete. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 15, n. 4, p. 1070–1077, set. 2015.

EN:10080. **Steel for reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - General**. Brussels. European-Committee-for-Standardization, , 2005.

ERGÜN, A.; KÜRKLÜ, G.; BAŞPINAR, M. S. The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 691–698, jun. 2016.

FERNANDES, R. M.; EL-DEBS, A. L. H. D. C. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto**. São Carlos, SP. IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto., , 2000.

FERNANDEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; MARÍ, A. R. Ultimate bond strength assessment of uncorroded and corroded reinforced recycled aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 543–555, maio 2016.

FERREIRA, E. G. P. **Contribuição ao estudo de aderência aço-concreto em barras lisas, entalhadas e nervuradas, com diâmetros entre 5,0 e 10,0 mm**. Belo Horizonte, MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2012.

FRANÇA, M. B. B. **Estudo experimental da aderência aço-concreto para barras finas de aço CA-50**. Belo Horizonte, MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2010.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto.** (PINI, Ed.)São Paulo., 1995.

GARCIA-TAENGUA, E.; MARTÍ-VARGAS, J. R.; SERNA, P. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 275–284, fev. 2016.

GUERRA, M.; CEIA, F.; BRITO, J. DE; JÚLIO, E. Anchorage of steel rebars to recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 113–123, dez. 2014.

HADI, M. N. S. Bond of High Strength Concrete with High Strength Reinforcing Steel. **The Open Civil Engineering Journal**, v. 2, n. 1, p. 143–147, 1 dez. 2008.
HELINCKS, P.; BOEL, V.; CORTE, W. DE; SCHUTTER, G. DE; DESNERCK, P. Structural behaviour of powder-type self-compacting concrete: Bond performance and shear capacity. **Engineering Structures**, v. 48, p. 121–132, mar. 2013.

KIM, S.-W.; YUN, H.-D. Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete. **Engineering Structures**, v. 48, p. 133–143, mar. 2013.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada (Elementary statistics).** 4 ed. ed. São Paulo.: Pearson Prentice Hall, 2010.

LEONHARDT, F.; MONNING, E. **Construções de concreto: Princípios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto armado.** 1 ed. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

LI, X.; WU, Z.; ZHENG, J.; DONG, W. Effect of loading rate on the bond behavior of plain round bars in concrete under lateral pressure. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 826–836, set. 2015.

LIN, H.; ZHAO, Y.; OŽBOLT, J.; HANS-WOLF, R. The bond behavior between concrete and corroded steel bar under repeated loading. **Engineering Structures**, v. 140, p. 390–405, jun. 2017.

MIRANDA, M. P.; CARVALHO, E. P. **Avaliação do comprimento de**

ancoragem de barras de aço em ensaios de arrancamento. Bento Gonçalves, RS.: 59º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON., 2017.

MODEL-CODE:2010. **Model Code for Concrete Structures 2010 - Final Draft, Volume 1** Lausanne, Switzerland Fédération internationale du béton (fib) / International Federation for Structural Concrete:, , 2010.

MOUSAVI, S. S.; DEHESTANI, M.; MOUSAVI, K. K. Bond strength and development length of steel bar in unconfined self-consolidating concrete. **Engineering Structures**, v. 131, p. 587–598, jan. 2017.

ORANGUN J. O.; AND BREEN, J. E., C. O. . J. A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices. **318 Reference**, v. 12, n. 9, 1977.

POP, I.; SCHUTTER, G. DE; DESNERCK, P.; ONET, T. Bond between powder type self-compacting concrete and steel reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 824–833, abr. 2013.

PRINCE, M. J. R.; SINGH, B. Bond behaviour of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 852–862, dez. 2013.

RAO, G. A.; PANDURANGAN, K.; SULTANA, F. **Studies on the pull-out strength of ribbed bars in high-strength concrete.** Stuttgart, Germany, 2004.

REHM, G. **The basics principales of the bond between steel and concrete.** C&CA Library Translation n.134 (Uber die Grundlagem des Verbundes Zwischen Stahl und Betin. Deutscher Ausschuss Fur Stahlbeton, Heft 138 1961)., , 1961.

RILEM-CEB-FIP-RC5. **Bond test for reinforcement steel: Beam Test.** TECHNOLOGY, C. R. Paris: Georgi Publishing Company., , 1982.

RILEM-CEB-FIP-RC6. **Bond test for reinforcement: Pull Out Test.** TECHNOLOGY, C. R. Paris: Georgi Publishing Company., , 1983.

ROSALES, Y. M.; FARFÁN, R. D. D.; BARBOSA, W. C. D. S. BEZERRA, L. M. **Efeito da forma na resistência de aderência aço-concreto.** Belo Horizonte,

MG.: 58º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2016., 2016.

SARTORI, A. L.; PINHEIRO, L. M.; SILVA, R. M. DA; FREITAS, S. B.; CESAR, T. G. Adherence between steel bars and lightweight concrete with EPS beads. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 1, p. 122–140, fev. 2017.

SFIKAS, I. P.; TREZOS, K. G. Effect of composition variations on bond properties of Self-Compacting Concrete specimens. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 252–262, abr. 2013.

SHANG, H.-S.; CUI, F.-K.; ZHANG, P.; ZHAO, T.-J.; REN, G.-S. Bond behavior of steel bar embedded in recycled coarse aggregate concrete under lateral compression load. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 529–537, set. 2017.

SHEN, D.; SHI, X.; ZHANG, H.; DUAN, X.; JIANG, G. Experimental study of early-age bond behavior between high strength concrete and steel bars using a pull-out test. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 653–663, jun. 2016.

SONG, X.; WU, Y.; GU, X.; CHEN, C. Bond behaviour of reinforcing steel bars in early age concrete. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 209–217, set. 2015.

THOMPSON, E.; PERRY, S.; NEILS, J. Bond Stress Distribution on Reinforcing Steel in Beams and Pullout Specimens. **Journal Proceedings**, v. 63, n. 8, 1966.

TORRE-CASANOVA, A.; JASON, L.; DAVENNE, L.; PINELLI, X. Confinement effects on the steel–concrete bond strength and pull-out failure. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 97, p. 92–104, jan. 2013.

WARDEH, G.; GHORBEL, E.; GOMART, H.; FIORIO, B. Experimental and analytical study of bond behavior between recycled aggregate concrete and steel bars using a pullout test. **Structural Concrete**, v. 18, n. 5, p. 811–825, out. 2017.

7. ANEXOS

ANEXO A – Teste de Normalidade¹

O teste Shapiro Wilk, empregado para avaliar a normalidade de dados de uma amostra, foi proposto inicialmente em 1965 e consiste na determinação do valor W e posterior comparação com o valor crítico W_α (tabelado), sendo α o nível de significância. A avaliação também pode ser realizada a partir da comparação com P -value, calculado por softwares, com o valor de α .

As hipóteses e as condições são:

H_0 : A amostra procede de uma população com distribuição normal.

H_1 : A amostra não procede de uma população com distribuição normal.

Para $W < W_\alpha$ (ou P -value $> \alpha$) rejeita-se a hipótese nula (H_0).

O valor de W é calculado pela equação 1:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Onde, $x_{(i)}$ são os valores que compõem as amostras, apresentados de forma crescente, \bar{x} as médias correspondentes.

A constante “b” é obtida por, equação 2:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) \quad & \text{se } n \text{ é par} \\ \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) \quad & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{aligned} \quad (2)$$

Os valores de a_{n-i+1} tabelados, obtidos a partir de dados estatísticos de médias, variâncias e covariâncias de amostras de tamanho n .

Neste trabalho avaliou-se a distribuição dos dados de tensão última de aderência dos corpos de prova cúbicos e cilíndricos, obtidos a partir do ensaio de arrancamento. O nível de significância considerado foi de 5% ($\alpha = 0,05$). A tabela 1 a seguir apresenta os dados obtidos no ensaio, distribuídos em ordem crescente.

¹Portal Action, Teste de Shapiro-Wilk. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/inferencia/64-teste-de-shapiro-wilk>>. Acesso em 22 de maio de 2017.

Tabela 1: Amostras do ensaio de arrancamento - Tensão última de aderência τ_u (MPa).

Dados – Tensão última de aderência τ_u (MPa)								
Diâmetros	$\phi = 6,3$ mm		$\phi = 6,3$ R mm		$\phi = 8,0$ mm		$\phi = 10$ mm	
Elementos	Cúbico	Cilíndrico	Cúbico	Cilíndrico	Cúbico	Cilíndrico	Cúbico	Cilíndrico
\bar{x} (Média)	12,01	12,09	10,22	11,57	7,18	10,90	9,08	11,26

A tabela 2 e 3 apresentam o valor da constante “b” assim como os dados para utilizados para o cálculo da mesma, para os moldes cúbicos e cilíndricos, respectivamente.

Tabela 2: Teste Shapiro Wilks para CP's cúbicos.

Corpos de prova cúbicos ($\phi = 6,3$ mm) – n=6					
i	n – i + 1	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	x_i	$a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i)$
1	6	0,64	13,06	10,89	1,40
2	5	0,28	12,77	11,02	0,49
3	4	0,09	12,45	11,86	0,05
$b = \sum_{i=1}^n a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) = 1,94$					
Corpos de prova cúbicos ($\phi = 6,3$ R mm) – n=6					
i	n – i + 1	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	x_i	$a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i)$
1	6	0,64	13,18	8,31	3,13
2	5	0,28	11,84	9,04	0,79
3	4	0,09	9,57	9,35	0,02
$b = \sum_{i=1}^n a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) = 3,94$					
Corpos de prova cúbicos ($\phi = 8,0$ mm) – n=6					
i	n – i + 1	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	x_i	$a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i)$
1	6	0,64	9,64	5,59	2,60
2	5	0,28	7,41	6,65	0,21
3	4	0,09	7,00	6,79	0,02
$b = \sum_{i=1}^n a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) = 2,84$					
Corpos de prova cúbicos ($\phi = 10$ mm) – n=6					
i	n – i + 1	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	x_i	$a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i)$
1	6	0,64	11,61	7,54	2,62
2	5	0,28	11,10	7,58	0,99
3	4	0,09	8,40	8,26	0,01
$b = \sum_{i=1}^n a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) = 3,62$					

Tabela 3: Teste Shapiro Wilk para CP's cilíndricos

Corpos de prova cilíndricos ($\phi = 6,3 \text{ mm}$) – $n=6$					
i	$n - i + 1$	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	x_i	$a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i)$
1	6	0,64	13,96	8,61	3,44
2	5	0,28	13,77	11,66	0,59
3	4	0,09	12,68	11,85	0,07
$b = \sum_{i=1}^n a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) = 4,11$					
Corpos de prova cilíndricos ($\phi = 6,3 \text{ R mm}$) – $n=6$					
i	$n - i + 1$	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	x_i	$a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i)$
1	6	0,64	13,61	8,31	3,37
2	5	0,28	12,87	10,58	0,64
3	4	0,09	12,62	11,35	0,11
$b = \sum_{i=1}^n a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) = 4,12$					
Corpos de prova cilíndricos ($\phi = 8,0 \text{ mm}$) – $n=6$					
i	$n - i + 1$	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	x_i	$a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i)$
1	6	0,64	11,88	9,32	1,65
2	5	0,28	11,43	10,63	0,22
3	4	0,09	11,33	10,83	0,04
$b = \sum_{i=1}^n a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) = 1,91$					
Corpos de prova cilíndricos ($\phi = 10 \text{ mm}$) – $n=6$					
i	$n - i + 1$	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	x_i	$a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i)$
1	6	0,64	12,35	10,02	1,50
2	5	0,28	12,03	10,60	0,40
3	4	0,09	11,36	11,23	0,01
$b = \sum_{i=1}^n a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_i) = 1,91$					

Considerando os valores anteriores os valores de W são indicados a seguir, tabela 4.

Tabela 4: Valores de W e $W\alpha$ para os CP's cúbicos e cilíndricos.

Corpos de prova	Parâmetro W e $W\alpha$				$W\alpha$
	W - $\phi = 6,3 \text{ mm}$	W - $\phi = 6,3 \text{ R mm}$	W - $\phi = 8,0 \text{ mm}$	W - $\phi = 10 \text{ mm}$	
Cúbicos	0,909	0,880	0,855	0,805	0,788
Cilíndricos	0,935	0,933	0,964	1,059	

Considerando os resultados anteriores, como $W > W\alpha$, não rejeita-se a hipótese nula e portanto, pode-se afirmar estatisticamente que as amostras do ensaio de arrancamento provêm de populações com distribuição normal.

A seguir, são apresentadas as tabelas 5 e 6 das quais foram retirados os valores para

a_{n-i+1} e $W\alpha$, respectivamente.

Tabela 5: Valores para o parâmetro a_{n-i+1} .

i\ n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,7071	0,7071	0,6872	0,6646	0,6431	0,6233	0,6062	0,5888	0,5739	0,5601
2			0,1677	0,2413	0,2806	0,3031	0,3164	0,3244	0,3291	0,3315
3					0,0875	0,1401	0,1743	0,1976	0,2141	0,2260
4							0,0561	0,0947	0,1224	0,1429
5									0,0399	0,0695
6										

Fonte: Adaptado do Portal Action¹.

Tabela 6: Valores para o valor crítico $W\alpha$.

Nível de significância									
n	0,01	0,02	0,05	0,1	0,5	0,9	0,95	0,98	0,99
3	0,753	0,756	0,767	0,789	0,959	0,998	0,999	1,000	1,000
4	0,687	0,707	0,748	0,792	0,935	0,987	0,992	0,996	0,997
5	0,686	0,715	0,762	0,806	0,927	0,979	0,986	0,991	0,993
6	0,713	0,743	0,788	0,826	0,927	0,974	0,981	0,986	0,989
7	0,730	0,760	0,803	0,838	0,928	0,972	0,979	0,985	0,988
8	0,749	0,778	0,818	0,851	0,932	0,972	0,978	0,984	0,987
9	0,764	0,791	0,829	0,859	0,935	0,972	0,978	0,984	0,986
10	0,781	0,806	0,842	0,869	0,938	0,972	0,978	0,983	0,986
11	0,792	0,817	0,850	0,876	0,940	0,973	0,979	0,984	0,986
12	0,805	0,828	0,859	0,883	0,943	0,973	0,979	0,984	0,986
13	0,814	0,837	0,866	0,889	0,945	0,974	0,979	0,984	0,986
14	0,825	0,846	0,874	0,895	0,947	0,975	0,980	0,984	0,986
15	0,835	0,855	0,881	0,901	0,950	0,975	0,980	0,984	0,987

Fonte: Adaptado do Portal Action¹.

¹Portal Action, Teste de Shapiro-Wilk. Disponível em:
 <<http://www.portalaction.com.br/inferencia/64-teste-de-shapiro-wilk>>. Acesso em
 22 de maio de 2017.

ANEXO B – Análise de variância com um fator (ANOVA unidirecional)

Consiste em uma avaliação estatística de teste de hipótese para comparação de médias populacionais. Duas hipóteses devem ser determinadas, uma hipótese nula e uma hipótese alternativa, e para este trabalho foram as seguintes hipóteses (LARSON e FARBER, 2010):

- H_0 : as médias de tensões última de aderência para corpos de prova cúbicos e cilíndricos são iguais ($\mu_1 = \mu_2$), e
- H_1 : as médias de tensões última de aderência para corpos de prova cúbicos e cilíndricos são diferentes ($\mu_1 \neq \mu_2$).

Segundo Larson e Farber (2010), o teste de variância com um fator é determinado por meio da razão entre duas variâncias, sendo elas: a variância entre amostras (MS_B) e a variância dentro das amostras (MS_W). A variância MS_B , também conhecida como média entre quadrados, determina as diferenças com relação ao tratamento recebido por cada amostra. A variância MS_W , ou média dos quadrados internos, determina as diferenças referente ao lançamento dos dados das amostras, ou seja, erro de amostragem.

Estando satisfeitas as condições para a utilização do teste ANOVA - amostras aleatórias, independentes, provenientes de populações normais e com mesma variância – o teste estatístico é realizado por (LARSON e FARBER, 2010):

$$F = \frac{MS_B}{MS_W} \quad (1)$$

Os valores para as variâncias entre e dentro das amostras, MS_B e MS_W respectivamente, são obtidos por meio do cálculo da *soma dos quadrados entre amostras* (SS_B) e pela *soma dos quadrados internos das amostras* (SS_W). As equações a seguir apresentam a sequência para o cálculo das variáveis anteriores (LARSON e FARBER, 2010):

$$SS_B = \sum n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N} \quad (3)$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{k-1} = \frac{SS_B}{g.l.N} \quad (4)$$

$$SS_W = \sum (n_i - 1) s_i^2 \quad (5)$$

$$MS_W = \frac{SS_W}{N-k} = \frac{SS_W}{g.l.D} \quad (6)$$

Onde:

n_i = tamanho de cada amostra;

\bar{x}_i e s_i^2 = são as médias e variâncias de cada amostra, respectivamente;

\bar{x} = a média de todos os lançamentos amostrais;

k = número de amostras;

N = soma dos tamanhos das amostras, e

$(g.l.N = k - 1)$ e $(g.l.D = N - k)$ = são os graus de liberdade.

A partir da determinação das hipóteses (nula e alternativa) e do nível de significância α , o valor da estatística do teste, ou seja, o valor de F é comparado com um valor crítico tabelado (F_c). A hipótese nula (H_0) é rejeitada para F calculado maior que o valor crítico (LARSON e FARBER, 2010) ou $p\text{-value} < \alpha$.

Nesta pesquisa o teste ANOVA foi utilizado para verificar se alteração da geometria dos corpos de prova para cilíndrico altera os resultados para a tensão última de aderência obtida pelo ensaio de arrancamento. Como determinado pelas hipóteses anteriores, se as médias dos valores de tensão de aderência para cada geometria forem consideradas estatisticamente iguais, pelo teste ANOVA, não há influência nos resultados do ensaio. A normalidade dos dados foi comprovada pelo Teste Shapiro Wilk, descrito no ANEXO A.

Os dados dos ensaios e cálculos do ANOVA são apresentados nas tabelas 1 a 4, considerando o nível de significância $\alpha=0,05$.

Tabela 1: Resultados do teste ANOVA para os CP's com $\phi=6,3$ mm.

ANOVA - $\phi=6,3$ mm						
CP's	n	N	k	Médias (\bar{x}_i)	Grande Média (\bar{x})	Variâncias (s_i^2)
<i>Cúbicos</i>	6	12	2	12,00733	12,04719	0,831418
<i>Cilíndricos</i>				12,08704		3,811818
Fonte da variação	SQ	g.l.	MQ	$F_{1,10}$	p-value	F crítico
<i>Entre grupos</i> (S_B)	0,019059	1	0,019059	0,008209	0,929596	4,964603
<i>Dentro dos grupos</i> (S_W)	23,21618	10	2,321618			

Tabela 2: Resultados do teste ANOVA para os CP's com $\phi=6,3$ R mm.

ANOVA - $\phi= 6,3$ R mm						
CP's	n	N	k	Médias (\bar{x}_i)	Grande Média (\bar{x})	Variâncias (s_i^2)
<i>Cúbicos</i>	6	12	2	10,21478	10,89073	3,528110
<i>Cilíndricos</i>				11,56669		3,647795
Fonte da variação	SQ	g.l.	MQ	$F_{1,10}$	p-value	F crítico
<i>Entre grupos ($_S_B$)</i>	5,482942	1	5,482942	1,528153	0,2446384	4,964603
<i>Dentro dos grupos ($_S_W$)</i>	35,87952	10	3,587952			

Tabela 3: Resultados do teste ANOVA para os CP's com $\phi=8,0$ mm.

ANOVA - $\phi= 8,0$ mm						
CP's	n	N	k	Médias (\bar{x}_i)	Grande Média (\bar{x})	Variâncias (s_i^2)
<i>Cúbicos</i>	6	12	2	7,178294	9,040688	1,820164
<i>Cilíndricos</i>				10,90308		0,798961
Fonte da variação	SQ	g.l.	MQ	$F_{1,10}$	p-value	F crítico
<i>Entre grupos ($_S_B$)</i>	41,62213	1	41,62213	31,78324	0,000216	4,964603
<i>Dentro dos grupos ($_S_W$)</i>	13,09562	10	1,309562			

Tabela 4: Resultados do teste ANOVA para os CP's com $\phi=10$ mm.

ANOVA - $\phi= 10$ mm						
CP's	n	N	k	Médias (\bar{x}_i)	Grande Média (\bar{x})	Variâncias (s_i^2)
<i>Cúbicos</i>	6	12	2	9,082909	10,17349	3,247602
<i>Cilíndricos</i>				11,26407		0,754486
Fonte da variação	SQ	g.l.	MQ	$F_{1,10}$	p-value	F crítico
<i>Entre grupos ($_S_B$)</i>	14,27234	1	14,27234	7,132447	0,023466	4,964603
<i>Dentro dos grupos ($_S_W$)</i>	20,01044	10	2,001044			

ANEXO C – Valores de F_c (Distribuição F - Bicaudal)

g.l. D: Graus de liberdade, denominador	$\alpha = 0,025$																			
	g.l. N: Graus de liberdade, numerador																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞	
1	647,8	799,5	864,2	899,6	921,8	937,1	948,2	956,7	963,3	968,6	976,7	984,9	993,1	997,2	1.001	1.006	1.010	1.014	1.018	
2	38,51	39,00	39,17	39,25	39,30	39,33	39,36	39,37	39,39	39,40	39,41	39,43	39,45	39,46	39,46	39,47	39,48	39,49	39,50	
3	17,44	16,04	15,44	15,10	14,88	14,73	14,62	14,54	14,47	14,42	14,34	14,25	14,17	14,12	14,08	14,04	13,99	13,95	13,90	
4	12,22	10,65	9,98	9,60	9,36	9,20	9,07	8,98	8,90	8,84	8,75	8,66	8,56	8,51	8,46	8,41	8,36	8,31	8,26	
5	10,01	8,43	7,76	7,39	7,15	6,98	6,85	6,76	6,68	6,62	6,52	6,43	6,33	6,28	6,23	6,18	6,12	6,07	6,02	
6	8,81	7,26	6,60	6,23	5,99	5,82	5,70	5,60	5,52	5,46	5,37	5,27	5,17	5,12	5,07	5,01	4,96	4,90	4,85	
7	8,07	6,54	5,89	5,52	5,29	5,12	4,99	4,90	4,82	4,76	4,67	4,57	4,47	4,42	4,36	4,31	4,25	4,20	4,14	
8	7,57	6,06	5,42	5,05	4,82	4,65	4,53	4,43	4,36	4,30	4,20	4,10	4,00	3,95	3,89	3,84	3,78	3,73	3,67	
9	7,21	5,71	5,08	4,72	4,48	4,32	4,20	4,10	4,03	3,96	3,87	3,77	3,67	3,61	3,56	3,51	3,45	3,39	3,33	
10	6,94	5,46	4,83	4,47	4,24	4,07	3,95	3,85	3,78	3,72	3,62	3,52	3,42	3,37	3,31	3,26	3,20	3,14	3,08	
11	6,72	5,26	4,63	4,28	4,04	3,88	3,76	3,66	3,59	3,53	3,43	3,33	3,23	3,17	3,12	3,06	3,00	2,94	2,88	
12	6,55	5,10	4,47	4,12	3,89	3,73	3,61	3,51	3,44	3,37	3,28	3,18	3,07	3,02	2,96	2,91	2,85	2,79	2,72	
13	6,41	4,97	4,35	4,00	3,77	3,60	3,48	3,39	3,31	3,25	3,15	3,05	2,95	2,89	2,84	2,78	2,72	2,66	2,60	
14	6,30	4,86	4,24	3,89	3,66	3,50	3,38	3,29	3,21	3,15	3,05	2,95	2,84	2,79	2,73	2,67	2,61	2,55	2,49	
15	6,20	4,77	4,15	3,80	3,58	3,41	3,29	3,20	3,12	3,06	2,98	2,86	2,76	2,70	2,64	2,59	2,52	2,46	2,40	
16	6,12	4,69	4,08	3,73	3,50	3,34	3,22	3,12	3,05	2,99	2,89	2,79	2,68	2,63	2,57	2,51	2,45	2,38	2,32	
17	6,04	4,62	4,01	3,66	3,44	3,28	3,16	3,06	2,98	2,92	2,82	2,72	2,62	2,56	2,50	2,44	2,38	2,32	2,25	
18	5,98	4,56	3,95	3,61	3,38	3,22	3,10	3,01	2,93	2,87	2,77	2,67	2,56	2,50	2,44	2,38	2,32	2,26	2,19	
19	5,92	4,51	3,90	3,56	3,33	3,17	3,05	2,96	2,88	2,82	2,72	2,62	2,51	2,45	2,39	2,33	2,27	2,20	2,13	
20	5,87	4,46	3,86	3,51	3,29	3,13	3,01	2,91	2,84	2,77	2,68	2,57	2,46	2,41	2,35	2,29	2,22	2,16	2,09	
21	5,83	4,42	3,82	3,48	3,25	3,09	2,97	2,87	2,80	2,73	2,64	2,53	2,42	2,37	2,31	2,25	2,18	2,11	2,04	
22	5,79	4,38	3,78	3,44	3,22	3,05	2,93	2,84	2,76	2,70	2,60	2,50	2,39	2,33	2,27	2,21	2,14	2,08	2,00	
23	5,75	4,35	3,75	3,41	3,18	3,02	2,90	2,81	2,73	2,67	2,57	2,47	2,36	2,30	2,24	2,18	2,11	2,04	1,97	
24	5,72	4,32	3,72	3,38	3,15	2,99	2,87	2,78	2,70	2,64	2,54	2,44	2,33	2,27	2,21	2,15	2,08	2,01	1,94	
25	5,69	4,29	3,69	3,35	3,13	2,97	2,85	2,75	2,68	2,61	2,51	2,41	2,30	2,24	2,18	2,12	2,05	1,98	1,91	
26	5,66	4,27	3,67	3,33	3,10	2,94	2,82	2,73	2,65	2,59	2,49	2,39	2,25	2,22	2,16	2,09	2,03	1,95	1,88	
27	5,63	4,24	3,65	3,31	3,08	2,92	2,80	2,71	2,63	2,57	2,47	2,36	2,25	2,19	2,13	2,07	2,00	1,93	1,85	
28	5,61	4,22	3,63	3,29	3,06	2,90	2,78	2,69	2,61	2,55	2,45	2,34	2,23	2,17	2,11	2,05	1,98	1,91	1,83	
29	5,59	4,20	3,61	3,27	3,04	2,88	2,76	2,67	2,59	2,53	2,43	2,32	2,21	2,15	2,09	2,03	1,96	1,89	1,81	
30	5,57	4,18	3,59	3,25	3,03	2,87	2,75	2,65	2,57	2,51	2,41	2,31	2,20	2,14	2,07	2,01	1,94	1,87	1,79	
40	5,42	4,05	3,46	3,13	2,90	2,74	2,62	2,53	2,45	2,39	2,29	2,18	2,07	2,01	1,94	1,88	1,80	1,72	1,64	
60	5,29	3,93	3,34	3,01	2,79	2,63	2,51	2,41	2,33	2,27	2,17	2,06	1,94	1,88	1,82	1,74	1,67	1,58	1,48	
120	5,15	3,80	3,23	2,89	2,67	2,52	2,39	2,30	2,22	2,16	2,05	1,94	1,82	1,76	1,69	1,61	1,53	1,43	1,31	
∞	5,02	3,69	3,12	2,79	2,57	2,41	2,29	2,19	2,11	2,05	1,94	1,83	1,71	1,64	1,57	1,48	1,39	1,27	1,00	

Fonte: Larson *et. al.* (2010).