

# Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete. Part 2: APULOT

## Investigação experimental sobre o uso de ensaios de aderência aço-concreto para estimativa da resistência à compressão axial do concreto. Parte 2: APULOT



B. V. SILVA<sup>a</sup>  
dovalesilva@hotmail.com

M. P. BARBOSA<sup>b</sup>  
mbarbosa@dec.feis.unesp.br

L. C. P. SILVA FILHO<sup>a</sup>  
lcarlos66@gmail.com

M. S. LORRAIN<sup>c</sup>  
michel.lorrain@insa-toulouse.fr

### Abstract

The scope of this research investigates the feasibility to use steel-concrete bond tests for estimating the compressive strength of concrete to supplementary use it in the quality control of reinforced concrete. Lorrain and Barbosa (2008)[1] and Lorrain et al. (2011)[2] justify the use of a modified bond test, called APULOT, to estimate the compressive strength of concrete, thereby increasing the possibilities for the technological control of reinforced concrete at construction sites. They propose an adaptation of the traditional pull-out test (POT) method, standardized by CEB/FIP RC6:1983[3], as this is a low complexity test with the advantage of reduced costs. The use of the APULOT test as a technological control test of concrete at construction sites requires determining a standard and also adapting it from the experimental laboratory practice to the field. The first part of this work evaluated the potential to perform compressive strength estimates from the bond strength data obtained by the POT test. The second part of this paper will present and discuss the test results achieved by the APULOT method. Two concrete compositions of different classes (25 MPa and 45 MPa) were tested at 3, 7 and 28 days. Ribbed bar specimens (nominal diameters of 8, 10 and 12.5 mm) were also used in the preparation stage of the specimens, totaling 144 APULOT tests. The results show that under standard test conditions, the correlation between the maximum bond strength and the compressive strength of concrete is satisfactory at all ages tested, corroborating the objective of consolidating this test as a complementary alternative for controlling the quality of reinforced concrete.

**Keywords:** bond steel-concrete; pull-out; APULOT; compressive strength of concrete.

### Resumo

EA presente pesquisa se propõe a estudar a viabilidade do uso de ensaios de aderência aço-concreto para estimativa da resistência à compressão axial do concreto, com o objetivo de empregá-los como um complemento no controle de qualidade do concreto armado. Lorrain e Barbosa (2008) [1] e Lorrain et al. (2011)[2] justificam a utilização de um ensaio de aderência modificado, denominado APULOT, para estimar a resistência à compressão do concreto, incrementando as possibilidades de controle tecnológico do concreto armado em canteiros de obras. Os mesmos propõem uma adaptação do método pull-out test (POT) tradicional, normalizado pela CEB/FIP RC6:1983[3], por ser este um ensaio de baixa complexidade e de custo reduzido. Para viabilizar o uso do ensaio APULOT como ensaio de controle tecnológico do concreto em canteiro de obras é necessário definir um padrão para o mesmo e adaptá-lo da prática experimental do laboratório para o campo. A primeira parte deste trabalho buscou avaliar a potencialidade de efetuar estimativas da resistência à compressão a partir dos dados da tensão de aderência obtidos com uso do POT. Na segunda parte deste trabalho serão apresentados e discutidos resultados de ensaios realizados com o método APULOT. Foram ensaiadas 2 composições de concreto de classes distintas (25 MPa e 45 MPa), aos 3, 7 e 28 dias. Foram, ainda, usadas na confecção dos corpos de prova barras nervuradas com diâmetros nominais de 8, 10 e 12,5 mm, totalizando 144 ensaios do tipo APULOT. Os resultados obtidos mostram que, sob condições padronizadas de ensaio, a correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão do concreto é satisfatória, em todas as idades ensaiadas, fortalecendo o propósito de consolidar este ensaio como uma alternativa complementar para controle de qualidade do concreto armado.

**Palavras-chave:** aderência aço-concreto; pull-out; APULOT; resistência à compressão do concreto.

<sup>a</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, RS, Brasil;

<sup>b</sup> Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil, Ilha Solteira, SP, Brasil;

<sup>c</sup> Institut National des Sciences Appliquées, Département de Génie Civil, Toulouse, França.

## 1. Introdução

Este trabalho foi desenvolvido na UNESP/SP e está inserido dentro do grupo de pesquisa APULOT, formado por pesquisadores da França, Brasil e outros países, que vem trabalhando no aprimoramento de um novo método de ensaio, tomando como base o ensaio de aderência aço-concreto: pull-out test (POT), proposto inicialmente como uma recomendação do CEB/FIP RC6:1983[3], que se caracteriza pela simplicidade e custo reduzido. Dando continuidade à parte 1 deste artigo apresentado em Vale Silva et. al (2013)[4], que abordou sobre os ensaios padronizados POT e suas perspectivas na determinação da resistência à compressão do concreto, esta segunda parte pretende analisar os resultados de outra série de ensaios realizada pelos autores, no qual se trabalhou como proposta do método APULOT porém, utilizando como corpos de prova moldes elaborados com garrafas PET, demonstrando desta maneira que os ensaios podem ser realizados de maneira simplificada sem a necessidade de grandes aparatos tecnológicos. Foram utilizadas as mesmas composições de concreto, idades de ensaios e tipos de barra de armaduras apresentados na parte 1 deste artigo [4], porém o cálculo do comprimento de ancoragem foi baseado na nova premissa desenvolvida por Lorrain e Barbosa (2008) [1].

## 2. Considerações sobre a metodologia APULOT

A essência do método APULOT (Appropriate Pull-Out Test) consiste na possibilidade do emprego em canteiro de obras de um ensaio

de aderência aço-concreto apropriado - tipo pull-out (arrancamento) para estimar a resistência à compressão do concreto, obtendo deste modo um complemento para o controle tecnológico do concreto a partir de um ensaio de aderência.

Existem inúmeras configurações de ensaios de aderência encontrados na literatura, como ilustra a Figura 1: (a) Ensaio de Arrancamento Direto "pull-out test" (POT), (b) Ensaio de Arrancamento excêntrico, (c) Ensaio de Empuxamento Direto "push-in test" (PIT), (d) Ensaio de Arrancamento modificado para minimizar os efeitos de compressão, (e) Ensaio de Tração Direta, (f) Ensaio de Tração Direta com 3 barras, (g) Ensaio de Extremo de Viga "beam end test", (h) Ensaio de flexão em viga modificado (beam test), (i) Ensaio de flexão em viga para estudar efeitos de ancoragem, cobrimento e armadura de traspasse.

Segundo o ACI 408R:2003[6] o ensaio que melhor reproduz o comportamento da aderência aço-concreto é o ensaio de flexão em vigas modificadas (beam-test) (Figura 1(h)). Porém o mais empregado devido a sua simplicidade é o ensaio de arrancamento direto (pull-out)[3] (Figura 1(a)). Apesar do tipo pull-out não reproduzir os efeitos dos esforços de flexão na aderência aço-concreto, levando a restrições quando se deseja determinar a resistência de aderência efetiva de elementos estruturais, o mesmo se mostra atraente para fins de controle tecnológico do concreto, pois o pull-out é eficaz em comparar concretos com resistências distintas em relação à resistência de aderência aço-concreto. Lorrain e Barbosa (2008)[1] conscientes dessa importante característica do pull-out e com o intuito de demonstrar que os ensaios de aderência poderiam ser realizados de forma simplificada, no próprio canteiro de

Figura 1 - Desenhos esquemáticos de alguns ensaios de aderência aço-concreto encontrados na literatura.(ALVAREZ, 1998)(5)

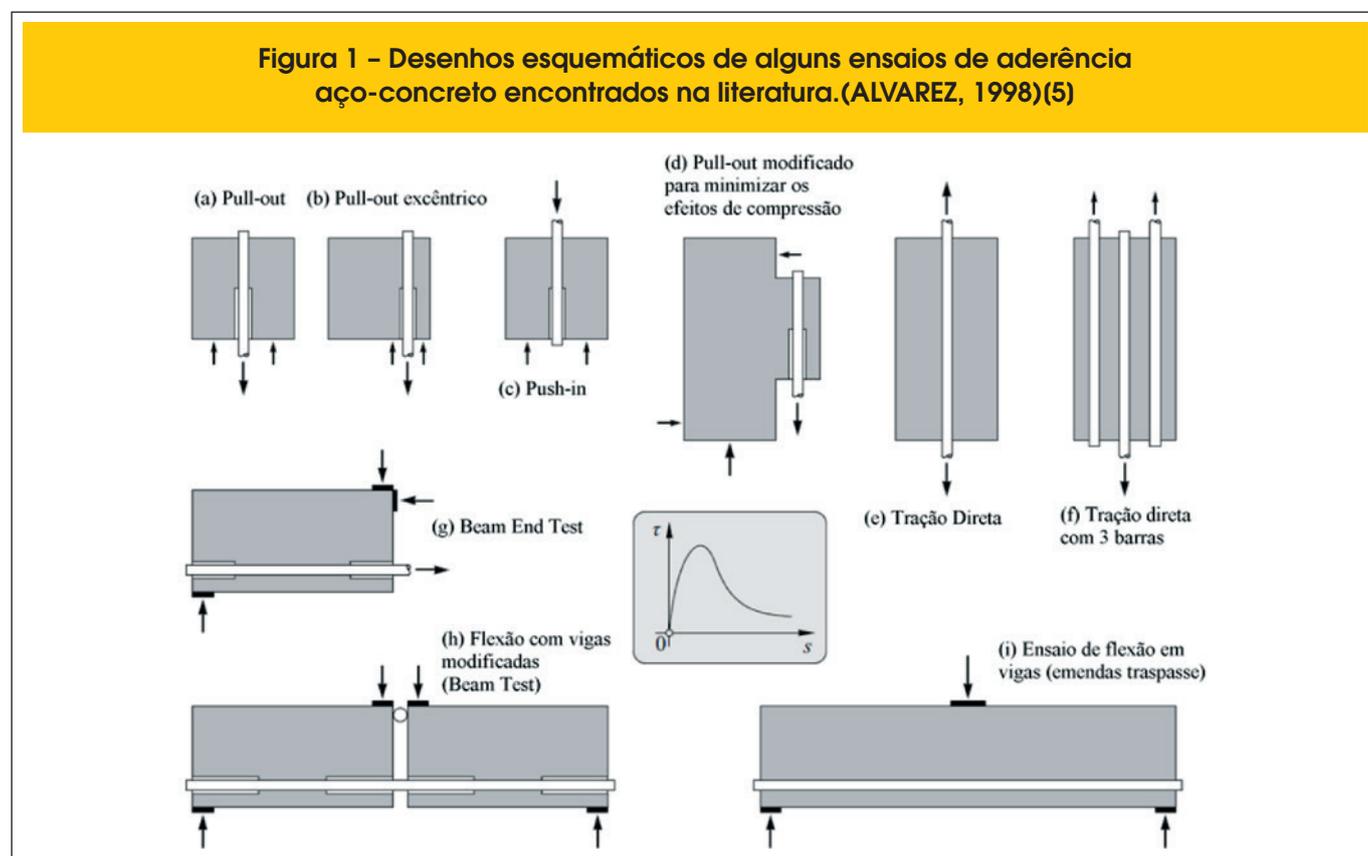
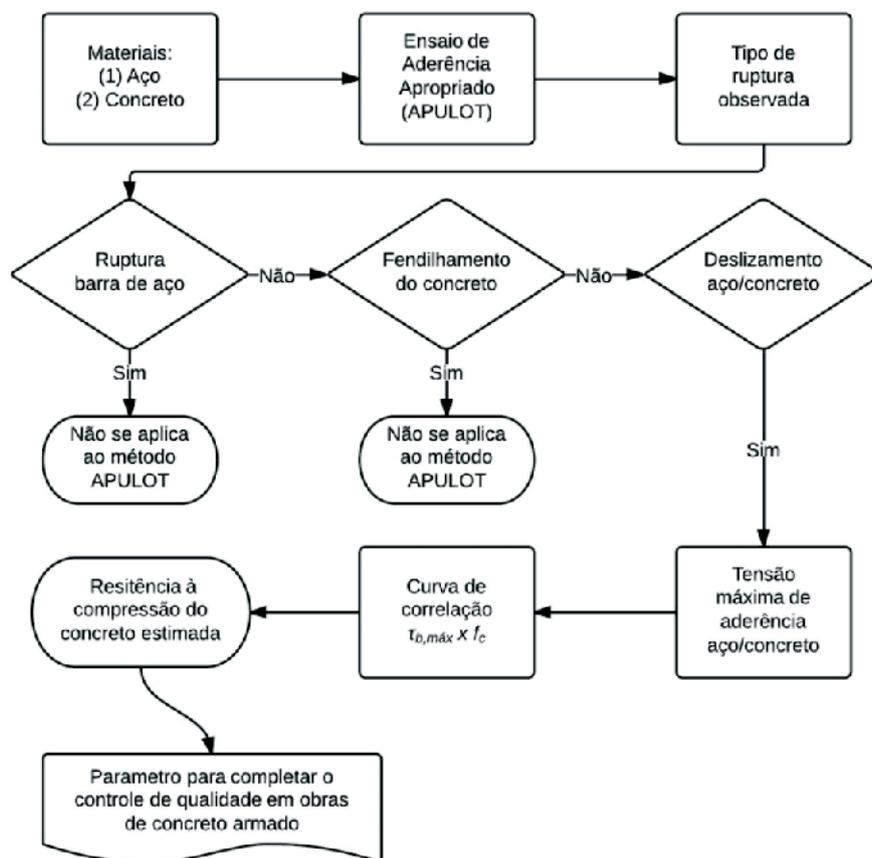


Figura 2 - Fluxograma simplificado da metodologia APULOT



obras, propuseram o novo método APULOT, utilizando como moldes para os corpos de prova as garrafas PET descartadas após uso e, para os ensaios de arrancamento, um macaco hidráulico de pistão vazado, mostrando desta forma ser o mesmo um método de fácil execução e com baixo custo.

Os vários detalhes da pesquisa sobre os ensaios APULOT vem sendo investigados pelo grupo de pesquisa de mesmo nome, Grupo APULOT, constituído por diversos centros de pesquisa de excelência<sup>1</sup>. O grupo acredita que a implementação desse tipo de ensaio de aderência, de forma complementar ou até mesmo alternativa aos ensaios de compressão tradicionalmente usados na construção civil, poderia vir a acarretar melhorias significativas no controle de qualidade das obras, permitindo que o controle de qualidade do concreto possa vir a ser realizado em idades mais curtas, de forma rápida e segura no próprio canteiro de obras. Dentro desse propósito, existem estudos que vem buscando determinar a influência de diversas variáveis na resposta do ensaio de aderência visando consolidar um método de ensaio, por exemplo: avaliação da influência da corrosão superficial na aderência [7]; análise do procedimento de retirada barra do concreto (pull-out ou push-in) [8]; comparação entre diferentes configurações geométricas de barras de aço na resposta do ensaio [9], [10]; avaliação do efeito de variação do cobrimento do concreto ao redor

da barra de aço [11], [12]; análise dos resultados de ensaios de aderência através da utilização de redes neurais artificiais [13]; avaliação da influência da resistência mecânica do concreto nos ensaios de aderência [14], [15]; avaliação da influência da geometria dos moldes no ensaio de aderência [16]; Dentre os estudos, além das atividades experimentais, também estão envolvidas simulações numéricas [17], [18], que visam parametrizar maneiras simplificadas de implementar o ensaio em canteiros de obras; e

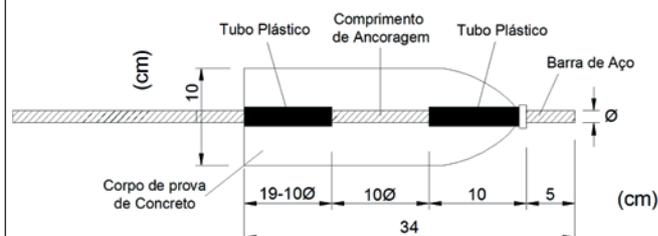
Figura 3 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio APULOT com comprimento de ancoragem de  $10\phi$ .(19)

Figura 4 – (a) Molde de garrafa PET (b) Concretagem do molde de garrafa PET sobre o suporte metálico



por fim o Grupo de Pesquisa LEME/UFRGS vem testando o sistema push-in ao invés de pull-out e os parâmetros para padronização do método em canteiro de obras.

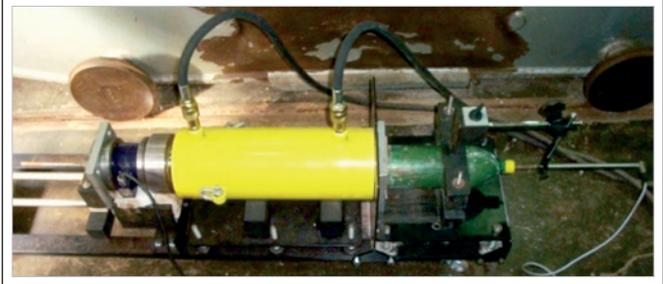
Vale salientar que para a resposta expedida pelo ensaio de aderência seja satisfatória, deve ocorrer necessariamente o deslizamento da barra de aço em relação ao concreto, excluindo da curva de correlação os resultados onde ocorrer a ruptura da barra de aço ou o fendilhamento do concreto. A Figura 2 ilustra um fluxograma para o adequado emprego da metodologia APULOT.

### 3. Desenvolvimento experimental

As características dos materiais utilizados no programa experimental e os procedimentos empregados nos ensaios de aderência foram apresentados na parte 1[3] deste artigo. Na parte 2 do artigo serão discutidos os procedimentos do método APULOT realizados com moldes elaborados com garrafa PET.

A Figura 3 ilustra as dimensões dos corpos de prova para o método de ensaio APULOT com comprimento de ancoragem de  $10\phi$ .

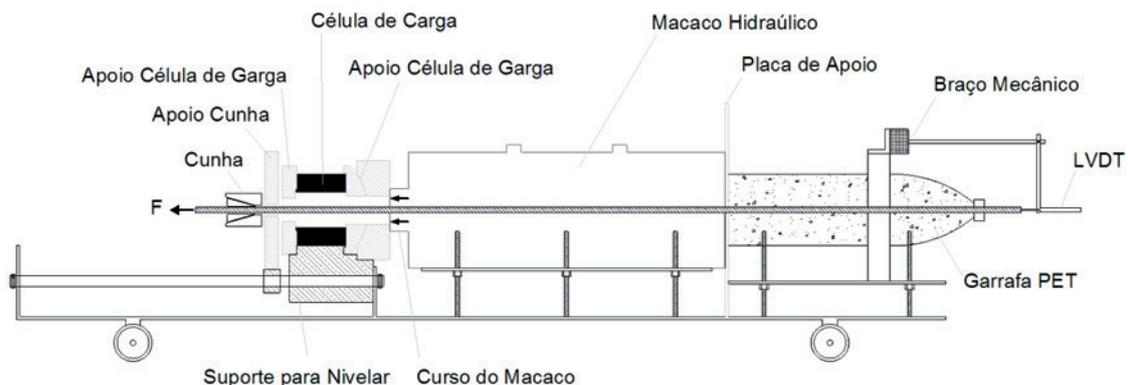
Figura 5 – Sistema do ensaio de arrancamento do método de ensaio APULOT



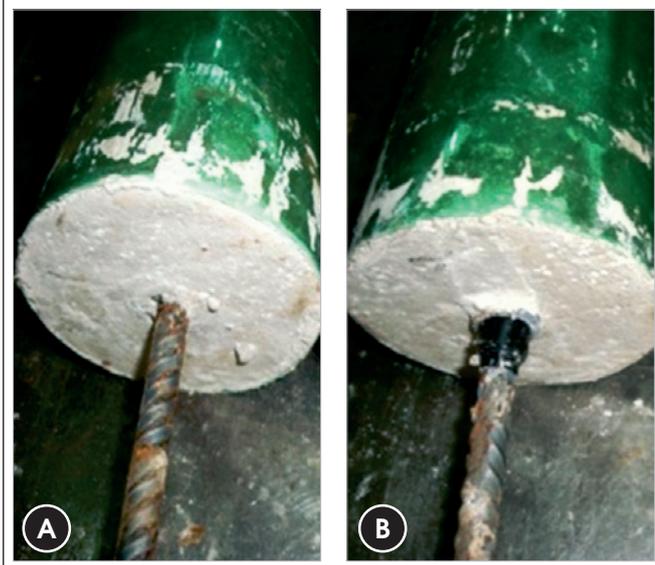
Os moldes de garrafas PET utilizados como corpos de prova foram preparados conforme ilustra a Figura 4(a) e posicionados sobre o suporte para concretagem dos mesmos, como ilustra a Figura 4(b). Após 24 h, os corpos de prova foram colocados em câmara úmida com temperatura e umidade controlada até as datas de ruptura (3 dias, 7 dias e 28 dias), vale salientar que para uma posterior aplicação do método em canteiro de obra pode-se optar pelo procedimento de cura em solução saturada por ser mais comumente empregado em campo. Outro detalhe do método é que o invólucro plástico da garrafa PET utilizado como forma não é retirado durante a cura e mantido até o término do ensaio de arrancamento.

Para a primeira estimativa do comprimento de ancoragem experimental ( $l_{exp}$ ) desse ensaio, foi adotado como premissa básica que ocorra o deslizamento da barra de aço em relação ao concreto circundante. Para que esta condição seja satisfeita, a tensão de aderência não deve provocar o fendilhamento do concreto e a tensão no aço não deve atingir o limite de ruptura. Sendo assim, adotou-se os valores de tensão de aderência máxima ( $\tau_{b,máx}$ ) obtidos experimentalmente em ensaios que ocorreram o deslizamento [1] e [2]. Deste modo, através da correlação entre a resistência à compressão e tensão máxima de aderência, juntamente com a aplicação da Equação 1, fixou-se um comprimento de ancoragem experimental de  $10\phi$ , sendo  $\phi$  o diâmetro da barra de aço, para

Figura 6 – Esquema do método de ensaio de arrancamento APULOT (19)



**Figura 7 – Tipo de ruptura por deslizamento da barra de aço observada no método APULOT com molde PET. (a) antes e (b) depois do ensaio**



o concreto da classe 25 MPa (T25) e para o concreto da classe 45 MPa (T45), o valor de 6 $\phi$ .

$$l_{\text{exp}} = \frac{f_{sy} \cdot \phi}{4 \cdot \tau_{b, \text{máx}}} \quad (1)$$

Na Equação 1:  $f_{sy}$  é a tensão de escoamento do aço;  $\phi$  é o diâmetro da barra de aço;  $l_{\text{exp}}$  é o comprimento de ancoragem experi-

mental nos corpos de prova;  $\tau_{b, \text{máx}}$  é a tensão máxima de aderência obtida através da curva de correlação proposta por Lorrain e Barbosa (2008)[1].

É importante salientar que os valores utilizados para o comprimento de ancoragem nessa pesquisa experimental fazem parte das primeiras tentativas de definir este parâmetro no método APULOT, podendo o mesmo ser reformulado com os avanços das pesquisas. Outra alteração introduzida em comparação ao pull-out recomendado pela RILEM é que a barra de aço possui duas zonas não aderentes posicionadas nas extremidades do corpo de prova que visam garantir uma distribuição mais uniforme da aderência ao longo do comprimento de ancoragem.

O sistema de arrancamento utilizado foi o mesmo utilizado nos ensaios POT e já descritos no artigo anterior: parte 1 [4], como ilustra a Figura 5 e o esquema da Figura 6. Para aplicação da força foi utilizado um macaco hidráulico de pistão vazado com capacidade de 600 kN, conectado a uma bomba manual de pressão onde foi aplicada uma força de tração em um dos extremos da barra, que reagiu contra o corpo de prova.

A força de arrancamento foi medida por meio da célula de carga e o deslocamento linear pelo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) como ilustra a Figura 6. Estes dados foram transmitidos para um sistema de aquisição de dados “QuantumX” e visualizados através do software “CatmanEasy”, ambos da HBM. Com esse sistema foi possível à obtenção de curvas de força versus deslocamento. A opção em utilizar célula de carga juntamente com um transdutor de deslocamento (LVDT) foi com intuito de se obter resultados complementares sobre os ensaios no que se refere aos incrementos de carga com os deslizamentos relativos entre o aço e concreto e os tipos de rupturas. Vale salientar que o objetivo principal do método é obter a força máxima necessária para retirar a barra do concreto, podendo em uma fase posterior de implementação em campo ser utilizada apenas uma célula de carga com capacidade de leitura equivalente a carga do cilindro hidráulico acoplada a um visor digital ou analógico de carga.

**Figura 8 – Tipo de ruptura por fendilhamento do concreto observada no método APULOT com molde PET. (a) vista frontal e (b) vista lateral dos corpos de prova**

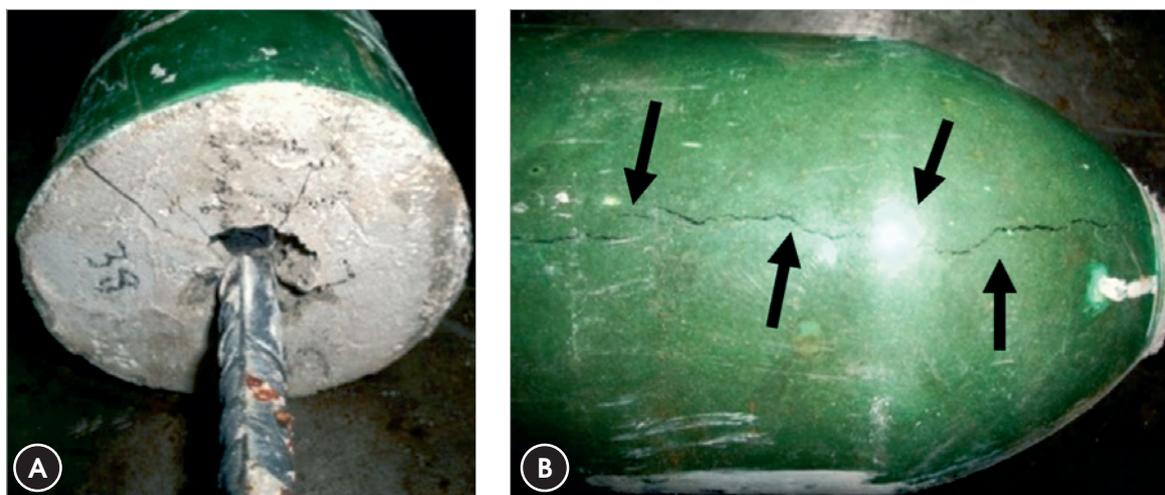
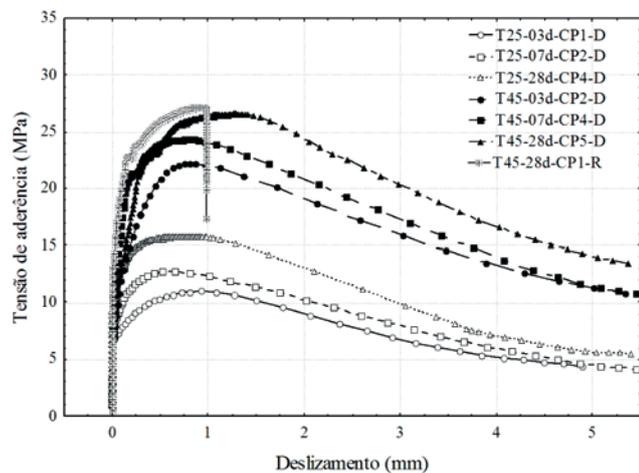
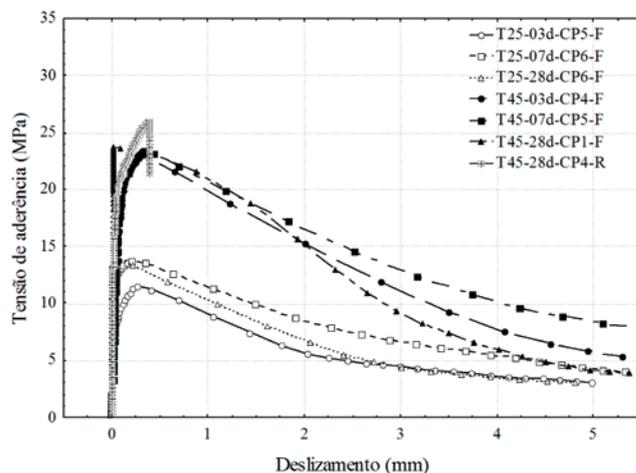


Figura 9 – Método APULOT com molde PET- Ø=8,0 mm



Para estudar a aderência aço-concreto APULOT foram ensaiados duas composições de concreto (T25 e T45), três idades de ruptura (3 dias, 7 dias e 28 dias) e três diâmetros de barras de aço CA-50 (8 mm e 10 mm e 12,5 mm). Para cada combinação descrita acima, foram ensaiados oito corpos de prova, totalizando 144 ensaios. Vale salientar que para todas as concretagens realizadas a resistência à compressão axial do concreto foi verificada usando corpos de prova cilíndricos (Ø10x20cm), cujos resultados foram apresentados no artigo anterior (parte 1)[4]. Com a realização dos ensaios foram obtidas as intensidades das forças em função do deslizamento da barra de aço. De acordo com as recomendações da CEB/FIP RC6:1983[3], com este valor de força dividido pela área lateral de ancoragem da barra, calculou-se a tensão de aderência ( $\tau_b$ ), como mostra a Equação 2.

Figura 11 – Método APULOT com molde PET- Ø=10,0 mm (F)



$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot \varnothing \cdot l_{exp}} \quad (2)$$

Onde F é a força de arrancamento, Ø é o diâmetro da barra de aço e  $l_{exp}$  é o comprimento de ancoragem do ensaio. Vale ressaltar que a tensão máxima de aderência ( $\tau_{bmax}$ ) foi calculada com base na força máxima de arrancamento.

#### 4. Resultados e discussões

Apresentam-se nesta seção os resultados obtidos nos ensaios APULOT, onde são analisados o comportamento mecânico das

Figura 10 – Método APULOT com molde PET- Ø=10,0 mm (D)

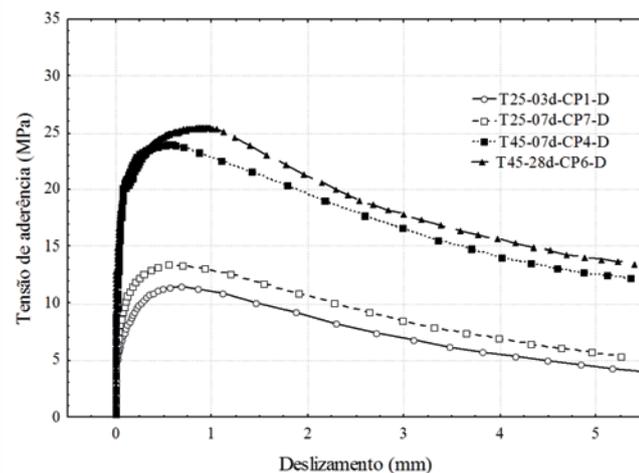
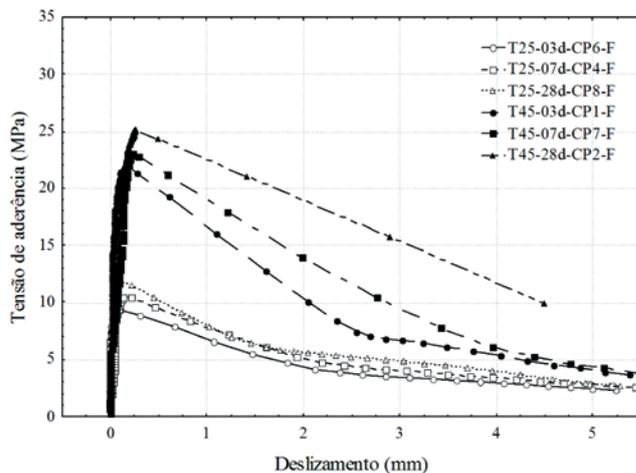


Figura 12 – Método APULOT com molde PET- Ø=12,5 mm

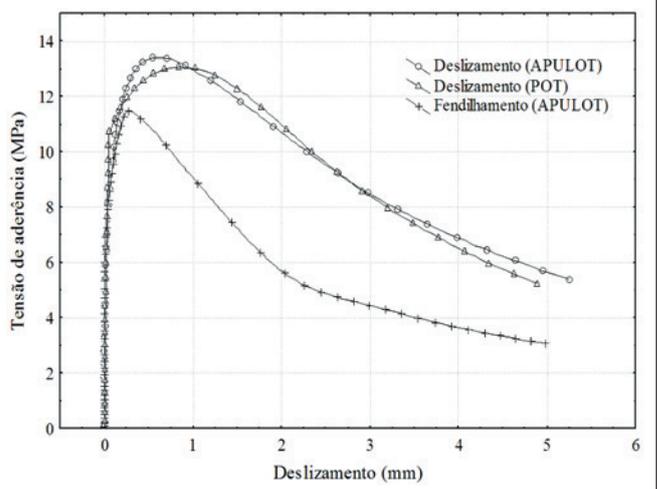


barras de aço arrancadas do concreto através de curvas de deslizamento em função da tensão de aderência e a correlação entre a tensão máxima de aderência com a resistência à compressão axial do concreto.

#### 4.1 Curvas de tensão de aderência versus o deslizamento da barra de aço

Na avaliação do comportamento mecânico da ruptura dos corpos de prova, através das curvas de deslizamento versus tensão de aderência, constatou-se em quais corpos de prova ocorreram o deslizamento da barra de aço em relação ao concreto, o fendilhamento do concreto ou a ruptura da barra de aço. Verificou-se que o tipo de ruptura ocorreu de forma distinta: nas barras de aço com diâmetro de 8,0 mm observa-se que a grande maioria dos corpos de prova (96%) obtiveram deslizamento da barra de aço em relação ao concreto; nas barras de 10,0 mm houve deslizamento da barra de aço em relação ao concreto em 75% dos casos; enquanto que nas barras de 12,5 mm todos os corpos de prova sofreram ruptura por fendilhamento do concreto. As Figuras 7(a) e 7(b) mostram o deslizamento da barra de aço em relação ao concreto

**Figura 13 – Exemplo do tipo de ruptura por deslizamento e o tipo de ruptura por fendilhamento**



antes e após o ensaio APULOT e as Figuras 8(a) e 8(b) mostram o tipo de ruptura por fendilhamento do concreto no ensaio APULOT. As Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram as diferenças das curvas de tensão de aderência versus deslizamento em função da composição e idade do concreto para o método APULOT, com molde PET e com barras de 8 mm, 10 mm e 12,5 mm respectivamente.

Na Figura 9, onde estão as curvas obtidas para os ensaios com barras de 8,0 mm, observa-se que ocorreu o deslizamento da barra de aço em relação ao concreto em todas as idades para os corpos de prova com T25 e que com os corpos de prova com T45 obteve-se o tipo de ruptura por deslizamento aos 3 e 7 dias e aos 28 dias notou-se que além do deslizamento ocorreu o escoamento do aço, sendo que um corpo de prova da série ocorreu a ruptura do aço, como mostra a Figura 9. Na Figura 10 estão às curvas obtidas para os ensaios com barras de 10,0 mm onde se observou o tipo de ruptura por deslizamento da barra de aço em relação ao concreto para T25 e T45, já na Figura 11 estão às curvas obtidas para os ensaios com barras de 10,0 mm onde se observou o tipo de ruptura por fendilhamento do concreto para T25 e T45 e também mostra a ruptura do aço em um corpo de prova da série. Na Figura 12 estão às curvas obtidas para os ensaios com barras de 12,5 mm, onde se observou o tipo de ruptura por fendilhamento do concreto em todos os ensaios.

A Tabela 1 apresenta os tipos de rupturas observadas nos corpos de prova APULOT, onde a letra "D" significa que ocorreu deslizamento da barra de aço em relação ao concreto; a letra "F" significa que ocorreu fendilhamento do corpo de prova de concreto e a letra "R" significa que ocorreu ruptura da barra de aço.

Nota-se que o fendilhamento ocorreu em 100% das barras com diâmetro de 12,5 mm e em 23% das barras com diâmetro de 10,0 mm e apenas em 4% das barras de 8,0 mm, evidenciando uma zona de transição entre o deslizamento da barra de aço e o fendilhamento do concreto entre a relação  $dec/\varnothing > 4,5$  e  $c/\varnothing < 5,75$ , sendo  $c/\varnothing$  a relação do cobrimento de concreto ao redor da barra de aço. Este fato está relacionado com o molde de garrafa PET utilizado, o qual não apresentou dimensões adequadas para suportar as tensões provocadas com o aumento do diâmetro das

**Tabela 1 – Tipos de rupturas observadas nos corpos de prova APULOT**

Descrição Composição - $\varnothing$ (mm)	(c/ $\varnothing$ )	Idade (dias)	D	F	R
T25 - 8,0	5,75	3	7	1	0
		7	8	0	0
		28	8	0	0
T45 - 8,0	5,75	3	8	0	0
		7	8	0	0
		28	7	0	1
TOTAL			96%	2%	2%
Descrição Composição - $\varnothing$ (mm)	(c/ $\varnothing$ )	Idade (dias)	D	F	R
T25 - 10,0	4,50	3	6	2	0
		7	7	1	0
		28	4	4	0
T45 - 10,0	4,50	3	7	1	0
		7	7	1	0
		28	5	2	1
TOTAL			75%	23%	2%
Descrição Composição - $\varnothing$ (mm)	(c/ $\varnothing$ )	Idade (dias)	D	F	R
T25 - 12,5	3,50	3	0	0	8
		7	0	0	8
		28	0	0	8
T45 - 12,5	3,50	3	0	0	8
		7	0	0	8
		28	0	0	8
TOTAL			0%	0%	100%

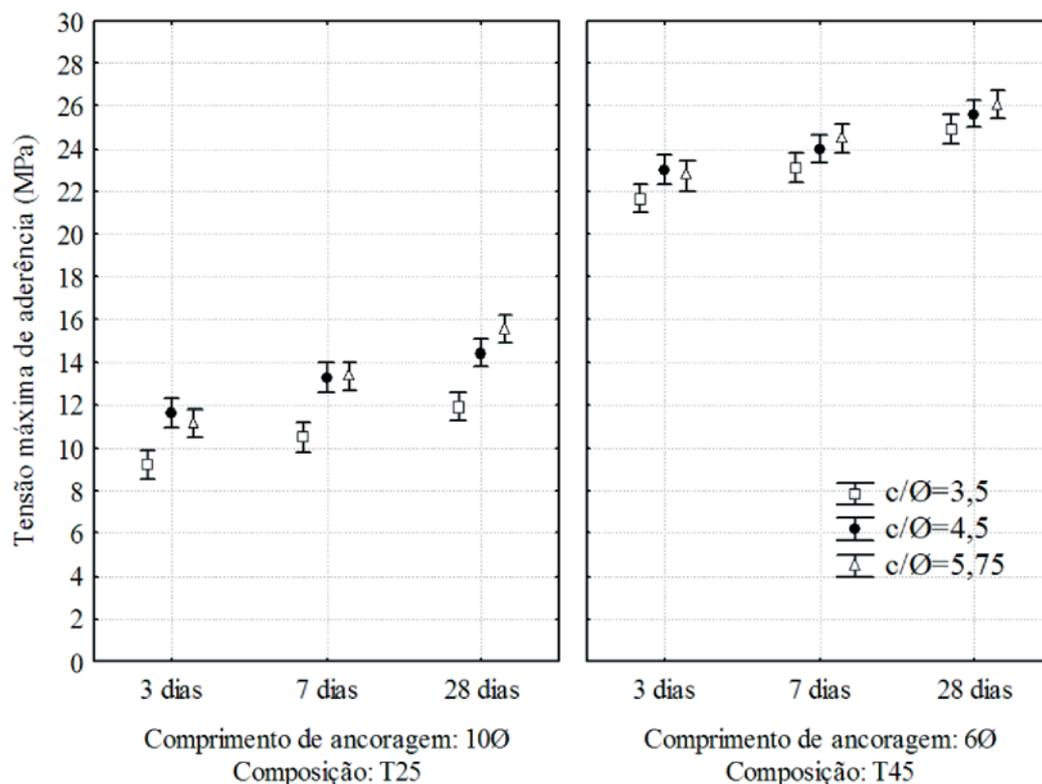
Tabela 2 - Valores de tensão máxima de aderência obtidos nos ensaios APULOT e valores de resistência à compressão axial, juntamente com o desvio padrão

Composição de concreto	Idade (dias)	$f_{cm}$ (MPa)	$\varnothing=8$ mm	$\varnothing=10$ mm	$\varnothing=12,5$ mm
			$\tau_{bm\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{bm\acute{a}x}$ (Mpa)	$\tau_{bm\acute{a}x}$ (Mpa)
T25	3	16,7±1,1	11,16±0,92	11,66±0,53	9,25±0,25
T25	7	21,1±1,6	13,34±1,00	13,27±0,37	10,53±0,34
T25	28	28,0±1,8	15,55±0,76	14,43±0,47	11,94±0,95
T45	3	33,1±1,5	22,73±1,66	23,02±0,90	21,69±1,09
T45	7	40,5±1,7	24,48±0,83	23,98±0,77	23,11±0,78
T45	28	49,9±1,8	26,06±1,16	25,65±1,12	24,91±1,41

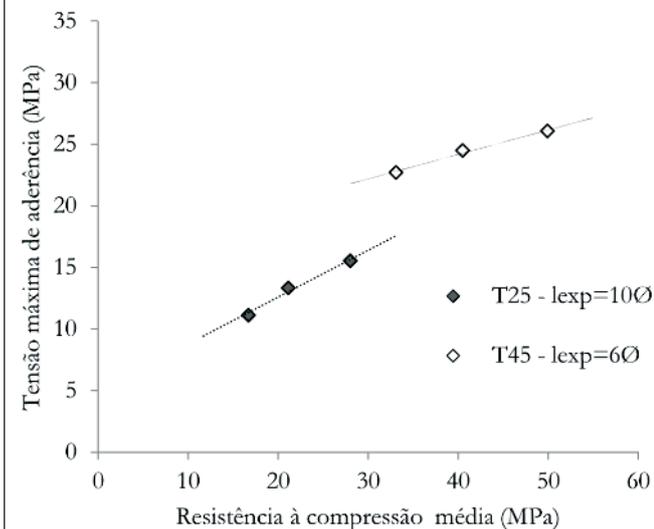
barras. Esses resultados vem ao encontro dos obtidos por Makini et al. (2010)[12] que mostrou que para ocorrer o tipo de ruptura por deslizamento a relação  $c/\varnothing \geq 5$ . Outros autores, como Torre-Casanova et al. (2013)[20] mostraram que a relação  $c/\varnothing > 4,5$  é necessária para ocorrer rupturas por deslizamento da barra de aço. A Figura 13 mostra um exemplo do tipo de ruptura por deslizamento e o tipo de ruptura por fendilhamento, evidenciando que no ensaio POT ou APULOT a tensão máxima de aderência é equivalente, desde que mantidas as condições adequadas de confinamento (relação  $c/\varnothing$ ) e o tipo de ruptura por deslizamento.

Com o comportamento mecânico dos corpos de prova analisados por meio das curvas de deslizamento em função da tensão de aderência, foi realizada uma análise da correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão axial do concreto. Entretanto, como exemplificado no fluxograma da Figura 2, a metodologia APULOT não se aplica aos corpos de prova que apresentaram tipo de ruptura por fendilhamento do concreto e/ou ruptura da barra de aço, deste modo, esses resultados são excluídos da curva de correlação.

Figura 14 - Valores gerais de tensão máxima de aderência obtidos nos ensaios APULOT



**Figura 15 - Correlação entre a resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) e a tensão máxima de aderência ( $\tau_{b,m\acute{a}x}$ )**



#### 4.2 Análise da correlação entre a tensão máxima de aderência ( $\tau_{b,m\acute{a}x}$ ) e a resistência à compressão ( $f_c$ )

A Tabela 2 e a Figura 14 exibem os resultados obtidos nos ensaios de aderência APULOT, assim como a composição e idade do concreto, os resultados de compressão axial e o diâmetro da barra de aço. No entanto vale salientar que a análise de correlação entre as variáveis  $f_c$  e  $\tau_{b,m\acute{a}x}$  é válida somente para os resultados onde foi constatado o deslizamento da barra de aço em relação ao concreto, desde modo os resultados com  $\varnothing=10$  mm e  $\varnothing=12,5$  mm ficaram comprometidos, pois nestes resultados observou-se o fendilhamento e a ruptura da barra de aço em alguns casos.

Com intuito de aplicar a metodologia APULOT, restringindo-se aos resultados onde foram observados o deslizamento do aço em relação ao concreto, o gráfico da Figura 15 mostra as duas composições (T25 e T45) para os resultados com  $\varnothing=8$  mm. Observa-se na Figura 15 a ocorrência de uma não linearidade entre a mudança do comprimento de ancoragem de  $6\varnothing$  para  $10\varnothing$ , esta modificação no comprimento de ancoragem gerou duas famílias de curvas de correlação entre as variáveis  $\tau_{b,m\acute{a}x} \times f_{cm}$ , ou seja, os resultados deixaram claro que há necessidade de fixar esse parâmetro na me-

todologia do ensaio, pois a correlação é melhor se o comprimento de ancoragem for fixado.

Com a finalidade de correlacionar a resistência à compressão axial do concreto com a tensão máxima de aderência aço-concreto, foram realizadas regressões lineares entre os valores de resistência à compressão e de aderência. Cabe destacar que foi efetuada uma regressão linear específica para cada comprimento de ancoragem distinto, como explicado anteriormente. A Tabela 3 mostra as regressões e os valores dos coeficientes de correlação obtidos para as barras de 8,0 mm. Nota-se que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtiveram valores satisfatórios, ou seja, valores próximos do valor 1. Do mesmo modo constata-se que todos os coeficientes angulares obtidos são sempre positivos, ou seja, se observa uma tendência de comportamento marcante, caracterizada por um aumento da tensão máxima de aderência proporcional ao acréscimo da resistência à compressão axial do concreto, na faixa de resistência testada.

#### 4.3 Padronização da metodologia APULOT

A maioria dos métodos utilizados no controle de qualidade do concreto armado tem suas metodologias pré-definidas em normalizações específicas. Estas metodologias normalizadas têm como objetivo padronizar os ensaios, ou seja, melhorar a reprodutibilidade e acurácia das respostas obtidas dos mesmos, diminuindo os erros e as incertezas inerentes ao procedimento. Pode-se dizer que a metodologia APULOT ainda está em fase de experimentação, portanto testar parâmetros que influenciam na resposta do ensaio é de fundamental importância para o bom desenvolvimento do método. Sendo assim, sabe-se que os procedimentos de preparação do molde, preparação da barra de aço, adensamento do concreto no molde, procedimentos de desmoldagem, estocagem e cura dos corpos de prova antes da data do ensaio são fundamentais para a adequada resposta do método. Considerados esses pontos, procurou-se fixar parâmetros para o ensaio APULOT como medida de padronização e comparação para ensaios futuros, como mostra a Tabela 4.

Como podemos observar na Tabela 4, a metodologia APULOT exige definições de determinados parâmetros e não se podem comparar resultados com distintos modelos. Em outras palavras, a fixação é de suma importância para o bom desempenho da metodologia APULOT na estimativa da resistência à compressão.

### 5. Conclusões

As curvas de correlação obtidas nesta pesquisa fortalecem a proposta do método de Lorrain e Barbosa (2011)[1] e [2] de

**Tabela 3 - Equações das retas da regressão linear e os respectivos coeficientes de correlação**

Diâmetro (mm)	Composição de concreto	Intervalo de resistência à compressão (MPa)	Comprimento de ancoragem	Regressão linear	Coefficiente de correlação
8	T25	16,7 à 28,0	10Ø	$\tau_{b,m\acute{a}x} = 0,38 f_{cm} + 4,9$	$R^2 = 0,98$
8	T45	33,1 à 49,9	6Ø	$\tau_{b,m\acute{a}x} = 0,20 f_{cm} + 16,3$	$R^2 = 0,97$

Tabela 4 – Parâmetros para a padronização do método de ensaio em campo

Parâmetros do método		Possibilidades	Modelo 1 (APULOT)
Molde	1	Material constituinte do molde para o corpo de prova (a) Metálico, (b) fibra de náilon, (c) madeira ou (d) PET	(d) PET
	2	Formato do molde para o corpo de prova (a) Cilíndrico, (b) cúbico ou (c) prismático	(a) Cilíndrico
Preparação e moldagem do ensaio	3	Comprimento de ancoragem (le) $3\emptyset \leq le \leq 10\emptyset$	5 $\emptyset$
	4	Relação do cobrimento de concreto ao redor da barra de aço (c/ $\emptyset$ ) c/ $\emptyset$ >5	5,75
	5	Disposição da barra na hora do lançamento do concreto (a) Horizontal ou (b) Vertical	(b) Vertical
	6	Adensamento do concreto no molde (a) Mecânico com mesa vibratória ou (b) Manual com haste metálica	(b) Manual com haste metálica
	7	Quantidade de corpos de prova $\geq 2$ corpos de prova por exemplar	-
Barras de aço	8	Tipo de configuração geométrica das nervuras das barras CA-50 Tipo 1, 2, 3 ... etc.	Tipo 1 (ilustrada na parte 1 deste artigo (4))
	9	Diâmetro da barra de aço CA-50 (a) $\emptyset=8$ mm; (b) $\emptyset=10$ mm; (c) $\emptyset=12,5$ mm...etc.	(a) 8 mm
	10	Estado em que se encontra a superfície da barra (a) Sem oxidação superficial ou (b) com oxidação superficial	(a) Sem oxidação superficial
Concreto	11	Resistência à compressão do concreto Grupo 1: $f_c \leq 50$ MPa Grupo 2: $50 < f_c \leq 100$ MPa ABNT NBR 8953:2011	Grupo 1: C15; C20; C25; C30; C35; C40; C45; C50. Grupo 2: C55; C60; C70
	12	Dimensão máxima característica dos agregados 4x menor que a dimensão mínima do molde	$D_{max} \leq 25$ mm
Desmoldagem, cura e estocagem	13	Tempo para desmoldagem $\geq 24$ h	24h
	14	Cura e estocagem dos corpos de prova (a) Apenas armazenado longe das intempéries; (b) Câmara úmida com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%; (c) Solução saturada de hidróxido de cálcio com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$	(c) Solução saturada de hidróxido de cálcio com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$
	15	Idade de ruptura $\geq 3$ dias	7 dias
Execução dos ensaios	16	Tipo de carregamento (a) Pull-out ou (b) Push-in	(a) Pull-out
	17	Taxa de carregamento Velocidade com controle ou não	Velocidade com controle manual. Duração do ensaio não inferior a 60s
	18	Tipo de ruptura (a) Deslizamento; (b) Fendilhamento concreto; (c) Ruptura da barra	(a) Deslizamento

tornar os ensaios de aderência em ensaios de qualificação do concreto armado em razão da boa proporcionalidade da resistência a compressão axial e a tensão máxima de aderência. A análise da correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão para o ensaio APULOT com  $\varnothing=8$  mm, permite concluir que os ensaios de aderência são adequados para estimar a resistência à compressão axial do concreto, desde que respeitados os parâmetros apresentados na Tabela 4, principalmente a relação entre o cobrimento de concreto ao redor da barra e o diâmetro da barra ( $c/\varnothing$ ) que necessariamente deve ser maior que 5 para ocorrer o tipo de ruptura por deslizamento.

Para a aplicação da metodologia APULOT com diâmetros de barras de 10,0 mm e 12,5 mm é necessário aumentar o cobrimento de concreto ao redor das barras, garantindo o tipo de ruptura por deslizamento. Em outras palavras, o aumento do diâmetro dos moldes torna-se imprescindível para aplicação da metodologia ilustrada na Figura 2.

A resposta do método para o concreto ensaiado aos 7 dias o torna especificamente atrativo quando se busca subsídios para tomadas de decisões referentes a concretos não-conformes logo nas primeiras idades. A padronização do método apresentada na Tabela 4 é essencial para sua adequada implementação e comparação de resultados de pesquisas posteriores.

Por fim acredita-se que com a desmistificação do ensaio de aderência apropriado, o mesmo se tornará de grande auxílio ao controle de qualidade em obras de concreto, possibilitando incrementar o controle de forma pouco onerosa em canteiro de obras. Entretanto para o método ser normalizado e aplicado com segurança em canteiros de obras há necessidade de numerosos testes e repetições para verificações das limitações e abrangências no que se refere a tipos de materiais diferentes aplicados em locais distintos.

## 6. Agradecimentos

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo); Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico); Ao LCEC (Laboratório CESP de Engenharia Civil - Ilha Solteira/SP); Ao Laboratório Central de Engenharia Civil da UNESP - Ilha Solteira/SP; À empresa ArcelorMittal que forneceu as barras de aço; À empresa Holcim do Brasil pelo fornecimento do cimento; À empresa Grace Concrete Products pelo fornecimento do superplastificante.

## 7. Referências bibliográficas

- [1] LORRAIN, M. S.; BARBOSA P. M. Controle de qualidade dos concretos estruturais: ensaio de aderência aço-concreto. In: Revista Concreto & Construções, São Paulo, Nº51, 3º trimestre, p. 52-57, 2008.
- [2] LORRAIN, M. S. ; BARBOSA, M. P. ; SILVA FILHO, L. C. P. Estimation of compressive strength based on Pull-Out bond test results for on-site concrete quality control. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 4, p. 4, 2011.
- [3] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. RILEM/CEB/FIP RC6: Bond test for reinforcement steel - 2 Pull-out test. Paris, 1983.
- [4] VALE SILVA, B.; BARBOSA, M.P.; SILVA FILHO, L. C. P.; LORRAIN, M.S.. Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete: part 1. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 6, p. 715-736, 2013.
- [5] ALVAREZ, M.: Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton. ETH Zürich, Diss., Basel: Birkhäuser (IBK Bericht 236), 1998.
- [6] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 408R: Bond and development of straight reinforcing bars in tension. Farmington Hills, 2003.
- [7] BARBOSA, M.P. ; GASPARETO, K. ; VALE SILVA, B. ; SILVA FILHO, L. C. P. ; LORRAIN, M. . Experiências sobre a influência da corrosão superficial das armaduras nos ensaios de aderência APULOT. In: CONPAT 2011 - Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y el Congreso de Control de Calidad en la Construcción, 2011, ANTIGUA-GUATEMALA. ANAIS DO CONPAT 2011. GUATEMALA, p. 17-24.2011.
- [8] DAL BOSCO, V. I. ; VALE SILVA, B. ; TROIAN, P. ; BARBOSA, M.P. ; SILVA FILHO, L. C. P. Comparativo experimental entre os métodos de ensaios pull-out e push-out para determinação da tensão de aderência aço-concreto. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió/AL. Anais do 54º CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2012.
- [9] LORRAIN, M. ; CAETANO, L. F. ; VALE SILVA, B. ; GOMES, L.E.S. ; BARBOSA, M. P. ; SILVA FILHO, L. C. P. . Bond strength and rib geometry: a comparative study of the influence of deformation patterns on anchorage bond strength. In: PCI Annual Convention & 3rd International FIB Congress FIB, WASHINGTON, D C. CHIGACO: 3rd FIB International Congress FIB, 2010.
- [10] SILVA FILHO, L. C. P. ; VALE SILVA, B. ; DAL BOSCO, V. I. ; GOMES, L.E.S. ; BARBOSA, M.P. ; LORRAIN, M. Analysis of the influence of rebar geometry variations on bonding strength in the pull-out test. In: Bond in Concrete 2012 - Bond, Anchorage, Detailing, 2012, Brescia, Italy. General aspects of bond, Vol. 1. 2012.
- [11] VALE SILVA, B. ; BARBOSA, M.P. ; SILVA FILHO, L. C. P. ; LORRAIN, M. ; DAL BOSCO, V. I. Correlação entre a tensão última de aderência e a resistência do concreto usando ensaio APULOT : avaliação do efeito de variação do cobrimento do concreto ao redor da barra de aço. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis/SC. Anais do 53º CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2011.
- [12] MAKNI, M.; DAOUD, A.; KARRAY, M. A.; LORRAIN, M.. Towards a standard pull-out test specimen: geometrical specifications. 3rd fib International Congress. Washington D. C., FIB, 2010.
- [13] VALE SILVA, B. ; LORENZI, A. ; BARBOSA, M.P. ; SILVA FILHO, L. C. P. Análise dos resultados de ensaios de aderência aço-concreto através da utilização de redes neurais artificiais. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado/RS. Anais do 55º CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2013.
- [14] BARBOSA, M. P. ; PEREIRA, J.B.; LORRAIN, M.; Análise experimental e avaliação da influência da resistência à compressão do concreto no ensaio de aderência APULOT. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado/RS. Anais do 55º CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2013.

- [15] GARCÍA-TAENGUA E.; MARTÍ-VARGAS J. R.; SERNA-ROS P. Bond of reinforcement in concrete applied to concrete quality control: The Bottle Bond Test. *Strain*, v.50, p.57–67, 2014
- [16] CALDERARO, R. P.; BARBOSA, M.P. Aderência Aço-Concreto: Análise experimental da influência da variação da geometria da garrafa PET e do cobrimento do concreto ao redor da barra de aço. In: 54° Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió/Al Anais do 54° CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2013.
- [17] TAVARES, A. J. Aderência aço-concreto: Análise numérica dos ensaios pull-out e APULOT. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2012.
- [18] TAVARES, A. J.; BARBOSA, M. P.; BITTENCOURT T. N.; LORRAIN, M.. Bond steel-concrete: simulation analysis of the pull-out tests and APULOT using the program ATENA. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 7, p. 138-157, 2014.
- [19] VALE SILVA, B. Investigação do potencial dos ensaios APULOT e pull-out para estimativa da resistência a compressão do concreto. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2010.
- [20] 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, 2013.

## 8. Nomenclatura

APULOT - Appropriate PULL-Out Test;

F - Força aplicada no arrancamento (kN);

$l_{exp}$  - Comprimento de ancoragem experimental (mm);

$\varnothing$  - Diâmetro da barra de aço (mm);

POT - Pull-Out Test (RILEM/CEB/FIP RC6: 1983 [4]);

$f_c$  - Resistência à compressão axial (MPa);

$f_{cm}$  - Resistência à compressão axial média (MPa);

$f_{sy}$  - Resistência ao escoamento do aço (MPa);

$\tau_b$  - Tensão de aderência entre o aço e o concreto (MPa);

$\tau_{b,máx}$  - Tensão máxima de aderência entre o aço e o concreto (MPa).