

# Steel and concrete bond stress: a contribution to the study of APULOT tests using concrete with rubber addition

## Aderência aço e concreto: uma contribuição ao estudo do método APULOT usando concreto com borracha



A. E. P. G. DE AVILA JACINTHO <sup>a</sup>  
anajacinto@puc-campinas.edu.br

L. L. PIMENTEL <sup>a</sup>  
lialp@puc-campinas.edu.br

M. P. BARBOSA <sup>a</sup>  
monica.barbosa@puc-campinas.edu.br

P. S. P. FONTANINI <sup>a</sup>  
pspuca@puc-campinas.edu.br

### Abstract

The bond stress between steel and concrete is the essential condition to the good behaviour of reinforced concrete structures. To preview the use of concrete with waste incorporation for structural aims, the verification of its quality control is necessary, whether of compression strength and bond. This paper presents the study results about the viability use of APULOT tests, that is a bond tests, to prevent the compression strength of concrete with rubber addition. The purpose of APULOT tests become study in many laboratories in France and Brazil, where is to estimate the compression strength using the bond stress obtained in tests execute inside of building construction. Also the use of concrete with rubber addition to structural use has been made with safe because this kind of addition makes the concrete compression strength decrease. To study its compression strength behavior is also make part of this research. This work aims to contribute with standardization of APULOT tests, and also give conditions to use the concrete with rubber addition in structural elements with more safe.

**Keywords:** bond stress, compression strength, concrete, rubber.

### Resumo

A aderência entre o concreto e o aço (armadura) é o principal fator do bom desempenho do concreto armado. Para prever a utilização do concreto com incorporação de resíduos para fins estruturais, a verificação do controle de qualidade se faz necessária, quer seja de sua resistência à compressão axial quer seja de sua aderência. Este artigo apresenta os resultados do estudo sobre a viabilidade do ensaio de aderência aço-concreto, denominado ensaio APULOT, para estimativa da resistência à compressão axial do concreto com adição de fibras de borracha. A proposta do ensaio APULOT, vem sendo estudada em vários laboratórios de pesquisa, na França e no Brasil e consiste em determinar a resistência à compressão axial do concreto, a partir dos resultados da tensão de aderência realizados na obra. A utilização do concreto com incorporação de resíduos de borracha para fins estruturais deve ser feita com cautela, pois comprovadamente a adição de borracha no concreto faz com que a resistência à compressão do mesmo venha a diminuir. Estudar seu comportamento quanto à resistência axial à compressão, além da aderência aço e concreto, também é necessária. Este trabalho visa contribuir com a normalização do ensaio APULOT possibilitando um melhor controle tecnológico em canteiros de obra, assim como verificar as condições de utilização para fins estruturais do concreto com resíduos de borracha.

**Palavras-chave:** tensão de aderência, resistência à compressão, concreto, borracha.

<sup>a</sup> Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP, Brasil.

## 1. Introdução

Existem várias formas de se exercer o controle de qualidade em uma obra de concreto armado, tais como gerenciamento dos projetos, formas, escoramento, e um dos aspectos essenciais sobre esse controle repousa no monitoramento da eficácia do material concreto, já que o aço tem um controle extremamente rigoroso na sua fabricação.

O controle tecnológico atual das obras de concreto armado, na maioria dos países, repousa quase que exclusivamente sobre a realização de ensaios de resistência à compressão axial de corpos de prova de concreto, cúbicos ou cilíndricos, que são normalmente moldados no recebimento do concreto no canteiro de obras, antes do lançamento nas formas. Este tipo de ensaio, padronizado no Brasil pela ABNT NBR 5739:2007[1], requer equipamentos apropriados e mão de obra treinada, disponíveis em laboratórios de engenharia civil cadastrados. Só assim se obtém este parâmetro de resistência para averiguar a eficiência dos elementos estruturais.

Todavia, o inconveniente deste ensaio está no fato de que os laboratórios especializados para a sua execução, estão muitas vezes, distantes dos canteiros de obras além da necessidade de se controlar uma série de fatores tais como a moldagem, armazenamento, capeamento e velocidade de carregamento do corpo de prova. Somados a esses fatores tem-se que o ensaio de resistência à compressão axial é feito sobre um único material, o concreto, ignorando a aderência entre o aço e o concreto, condição essencial da existência do concreto armado. O material aço já possui um controle extremamente rigoroso sobre a sua fabricação, sendo ignorada a necessidade de ensaios de resistências mecânicas em uma obra.

Reconhecendo a importância e a utilidade do ensaio tradicional para se determinar a resistência à compressão do concreto, um grupo de pesquisadores liderados pelo Professor Michel LORRAIN do INSA de Toulouse, vem analisando a possibilidade de empregar um ensaio de aderência aço-concreto adaptado ao canteiro de obra para estimar a resistência à compressão do concreto, devido aos inconvenientes experimentais obtidos ao se realizar esses ensaios tradicionais. Este grupo vem trabalhando no aprimoramento de um novo método de ensaio que se caracteriza pela sua simplicidade e baixo custo, tomando como base o ensaio de aderência aço-concreto *pull-out-test*, recomendado pela RILEM RC6:1983[2].

O método proposto por Lorrain e Barbosa(2008)[3] recebeu a denominação de APULOT (Appropriate pull-out-test) e, desde sua criação vem sendo testado em laboratórios de diversas universidades brasileiras e estrangeiras (tais como UNESP de Ilha Solteira, UFRG, PUC de Campinas, o INSA de Toulouse e etc), apresentando bons resultados e uma adequada capacidade de estimativa da resistência à compressão. Alguns testes realizados em canteiros de obras também obtiveram resultados satisfatórios. As vantagens do método proposto recaem na simplicidade de sua execução, na redução do tempo recomendado para a realização do ensaio, de 28 dias para 7 dias ou até mesmo 3 dias, além da possibilidade de aferição não somente da resistência mas também do comportamento da aderência aço-concreto, fator primordial para o bom funcionamento das estruturas de concreto armado.

Esta pesquisa, dentro do contexto apresentado, pretende contribuir para o estudo da viabilidade do ensaio de aderência APULOT como proposta de controle tecnológico e segurança das obras de

concreto armado, trabalhando com uma nova gama de concretos: os concretos com adições de resíduos. A busca por materiais alternativos, tais como porcelana de isoladores elétricos, borracha de pneus, resíduos de demolição e etc., que possam ser utilizados no concreto, diminuindo o uso dos materiais naturais extraídos da natureza, tais como areia dos rios (agregado miúdo) e a pedra britada ou seixo rolado (agregado graúdo), vem crescendo no Brasil e o emprego desse concreto em elementos estruturais deve ser avaliado em todos os seus aspectos, dentre eles a sua aderência com a armadura.

Ensaaios experimentais foram realizados para se determinar a resistência à compressão do concreto com a adição de fibras de borracha, tanto pelo método tradicional segundo a NBR 5735:2007[4], como pelo novo método proposto, obtendo a resistência à compressão a partir dos resultados do ensaio APULOT.

### 1.1 Justificativa

O aspecto principal de interesse dessa pesquisa é que a resistência à compressão do concreto é determinante no comportamento da aderência aço-concreto. A hipótese de trabalho do projeto APULOT é que, se o ensaio for realizado em condições controladas e padronizadas, esta relação se torna ainda mais evidente e robusta, permitindo que se faça a estimativa da resistência à compressão máxima de aderência. Somado a esse fato, avaliar o comportamento dos concretos com incorporação de resíduos na substituição parcial ou total dos agregados convencionais se justifica, pela necessidade de avaliação desse novo tipo de concreto para fins estruturais.

## 2. O controle tecnológico do concreto armado

A qualidade de um produto pode ser entendida como a capacidade de atender a determinadas exigências nas condições de uso previstas. Desta forma, o controle de qualidade abrange um conjunto de técnicas operacionais e atividades desenvolvidas, cuja finalidade é assegurar que o produto final atenda aos padrões pré determinados (Brandão, 1998)[5].

O controle de qualidade de uma estrutura de concreto é um processo amplo e complexo, pois engloba variáveis diversas que vão desde o planejamento, o controle dos serviços empregados até as questões ligadas à durabilidade e vida útil da estrutura.

Dentre essas variáveis a parcela do controle tecnológico empregado nos materiais utilizados nas obras de construção civil, mais especificamente o aço e o concreto, é a que interessa mais diretamente para este trabalho.

A evolução do conhecimento da tecnologia do concreto, nas décadas de 50 e 60, passou a tratar a resistência do concreto como uma grandeza aleatória, de distribuição normal (gaussiana) de valores e também a fazer parte das variáveis estruturais. Fusco (2011)[6] afirma que esta metodologia ganhou espaço devido aos avanços das pesquisas do cálculo estrutural em regime de ruptura e da probabilidade das variáveis estruturais.

No que se refere ao aço a ABNT NBR 6118:2007[7] estabelece que os parâmetros para o controle de qualidade das barras e fios de aço destinados a armaduras de estruturas de concreto devem atender as especificações da ABNT NBR 7480:2007[8].

Para o controle de qualidade do concreto destinado a estruturas,

a ABNT NBR 6118:2007[7] estabelece que os parâmetros devem atender as especificações da ABNT NBR 12655:2006[9].

No estado endurecido do concreto, as principais propriedades mecânicas exigidas pela ABNT NBR 6118:2007[7] são; resistência à compressão( $f_c$ ), módulo de elasticidade( $E_c$ ) e resistência à tração ( $f_{ct}$ ).

O único ensaio de aderência aço-concreto recomendado pela normalização brasileira é o normalizado pela ABNT NBR 7477:1982[10], o qual determina o coeficiente de conformação superficial ( $\eta$ ) das barras e fios de aço.

A resistência à compressão axial do concreto é o parâmetro mais comumente avaliado e utilizado para o controle tecnológico do concreto. Este valor refere-se aos resultados de ensaios de corpos de prova cilíndricos moldados com concreto segundo a ABNT NBR 5738:2008[11] e rompidos segundo a ABNT NBR 5739:2007[1]. Segundo a NBR 6118:2007[7] para efeito de projeto estrutural de concreto armado e protendido, a partir da resistência à compressão é possível se determinar o módulo de elasticidade e a resistência à tração e até mesmo a tensão de aderência para fins de ancoragem das armaduras. Segundo Silva Filho e Helene (2011)[12] embora as normas e recomendações mais recentes, no âmbito mundial, sugiram que se aumente o número de parâmetros de controle de qualidade de obras de concreto, a tradição da área ainda é fundamental este controle essencialmente na resistência à compressão de corpos de prova, cilíndricos no Brasil, moldados durante a concretagem.

## 2.1 Relação da aderência aço-concreto com a resistência à compressão do concreto

Segundo FUSCO (1995)[13] o princípio do concreto estrutural é a ação solidária entre aço-concreto que deve respeitar condições que permitam, a cada um deles, chegar aos limites de suas capacidades resistentes, sem prejudicar ou ser prejudicado pelos

esforços atuantes em um ou outro material separado. Sendo o concreto um material frágil e de baixa resistência à tração, e o aço ductil e de alta resistência à tração, um material complementa o outro formando assim o concreto armado ou protendido, desde que a condição de aderência entre os materiais seja atendida.

Na literatura são encontrados vários tipos de ensaios para a determinação da tensão de aderência entre a armadura de aço e o concreto e de curva de tensão versus deslocamento. Um dos mais conhecidos e utilizados, dada a eficiência, é o ensaio pull-out-test (POT) que tem suas diretrizes recomendadas na RILEM RC6: 1983[2] e na ASTM C234:1996 [14].

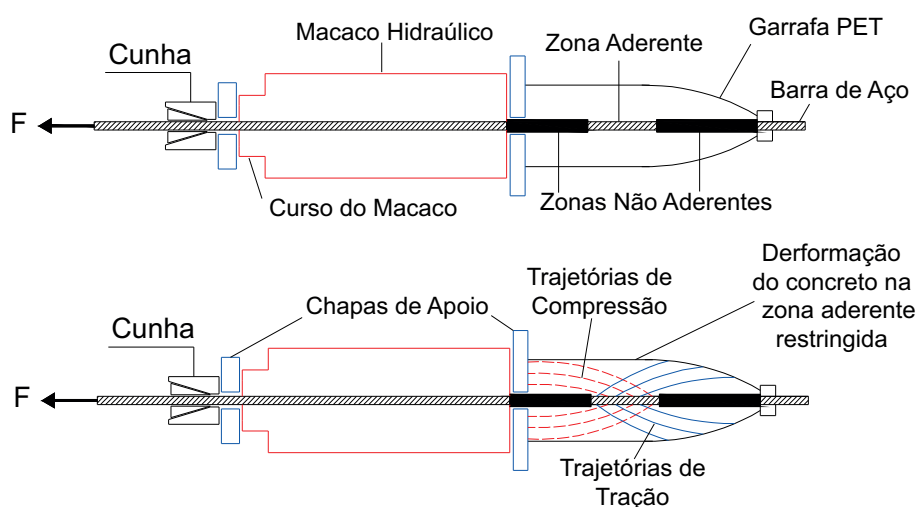
A pesquisa realizada por Abrams(1913)[15] utilizando ensaios de aderência do tipo *pull-out* verificou a influência de algumas variáveis inerentes a resposta do ensaio. Dentre essas variáveis o efeito das resistências mecânicas mostrou, há mais de 100 anos atrás, a existência de uma forte correlação entre a resistência à compressão do concreto e a resistência máxima de aderência aço-concreto. Posteriormente, em 1956, os estudos de Rush[16] demonstraram a importância das nervuras na tensão de aderência aço-concreto, confirmando a nítida e forte correlação entre a resistência à compressão e a tensão de aderência.

Na NBR 6118:2007[7], a tensão de aderência ( $\tau_u$ ) é dada pela seguinte equação:

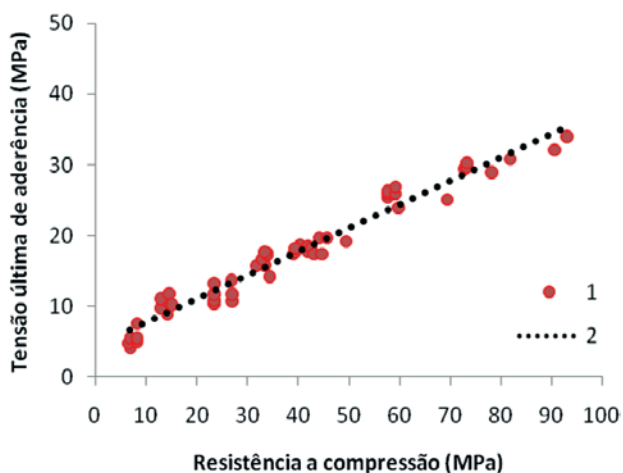
$$\tau_u = \frac{F}{\pi\phi L} \quad (1)$$

Onde :  $\tau_u$  = tensão última de aderência;  
F= força de arrancamento;  
 $\phi$  = diâmetro da barra;  
L= comprimento de ancoragem.

Figura 1 - Esquema ensaio APULOT (LORRAIN et al.(7))



**Figura 2 – Equação de correlação linear proposta por Lorrain e Barbosa (2008)(3)**



Nesta equação não está explicitada a relação entre a tensão de aderência e a resistência à compressão do concreto. A proposta de se relacionar os dois parâmetros através de uma reta, construída empiricamente, foi dada em Lorrain e Barbosa (2008)[3].

### 3. Método de ensaio APULOT

O aspecto principal de interesse dentro do tema dessa pesquisa é que a resistência do concreto armado é um aspecto determinante no comportamento da aderência. O conceito principal do ensaio APULOT é que, se o ensaio de aderência aço-concreto for realizado em condições controladas e padronizadas, essa relação se torna ainda mais evidente e robusta, permitindo que se faça a

estimativa da resistência à compressão do concreto a partir de dados da resistência máxima de aderência. A filosofia do ensaio APULOT é realizar o controle de qualidade do concreto armado a partir de ensaios apropriados de aderência aço-concreto em canteiro de obras, ou seja, averiguar a conformidade da resistência à compressão do concreto “in situ” por meio da resistência de aderência através de correlação entre essas respectivas resistências, propostas por Lorrain et al.[17].

O método é baseado no mesmo princípio do POT (arrancamento de uma barra de aço inserida num corpo de prova de concreto), no entanto usa como molde garrafas PET, com o formato mais homogêneo possível no comprimento de ancoragem, e um macaco hidráulico, que é um equipamento facilmente encontrado nos canteiros. A figura 1 apresenta o esquema do ensaio APULOT.

Para obter o comprimento de ancoragem (Equação 4), são utilizadas as fórmulas da tensão última de aderência (Equação 1) e a tensão de escoamento do aço (Equação 2). O valor da tensão última de aderência é obtido, pela correlação proposta por Lorrain e Barbosa(2008)[3] (Figura 2). É importante salientar aqui que estes valores sugeridos de comprimento de ancoragem desta pesquisa experimental são as primeiras tentativas de caracterização do ensaio APULOT, podendo estes valores serem renovados com os avanços das pesquisas com estes ensaios.

$$f_y = \frac{F}{\pi \frac{\phi^2}{4}} \quad (2)$$

$$\tau_u \pi \phi L > F > f_y \pi \frac{\phi^2}{4} \quad (3)$$

**Tabela 1 – Características da borracha**

Granulometria (borracha)			
Peneira ABNT (# em mm)	Massa retida acumulada (%)	Massa específica	Peso unitário
6,3	7,65	1,45	0,40
4,8	7,90	1,45	0,40
2,4	12,32	1,45	0,40
1,2	38,10	1,45	0,40
0,6	75,41	1,45	0,40
0,3	91,21	1,45	0,40
0,15	97,91	1,45	0,40
Fundo	100,00	1,45	0,40
Total	100,00	1,45	0,40

**Tabela 2 – Características do agregado miúdo**

Granulometria areia			
Peneira ABNT (# em mm)	Massa retida acumulada (%)	Massa específica	Peso unitário
6,3	1,67	2,62	1,51
4,8	2,85	2,62	1,51
2,4	9,16	2,62	1,51
1,2	23,07	2,62	1,51
0,6	47,11	2,62	1,51
0,3	75,22	2,62	1,51
0,15	91,87	2,62	1,51
Fundo	100,00	2,62	1,51
Total	100,00	2,62	1,51



**Tabela 3 - Características do agregado graúdo**

Coarse aggregate granulometry			
Peneira ABNT (# em mm)	Massa retida acumulada (%)	Massa específica	Peso unitário
32	0,00	2,95	1,59
25	0,00	2,95	1,59
19	1,96	2,95	1,59
12,5	47,06	2,95	1,59
9,5	76,47	2,95	1,59
6,3	94,12	2,95	1,59
Fundo	100,00	2,95	1,59
Total	100,00	2,95	1,59

$$L > \frac{f_y \phi}{4 \tau_u} \quad (4)$$

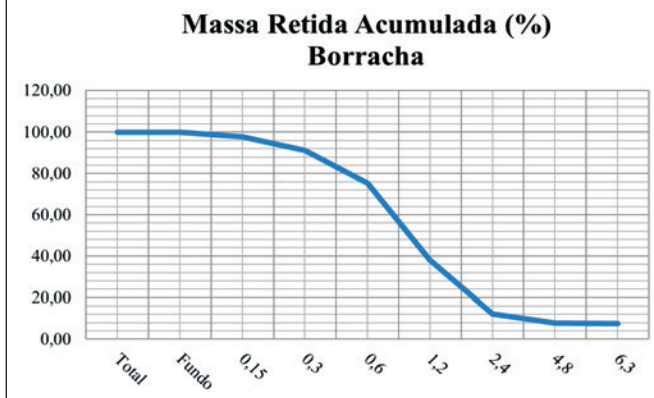
Onde:

$f_y$  = Tensão de escoamento do aço (MPa);

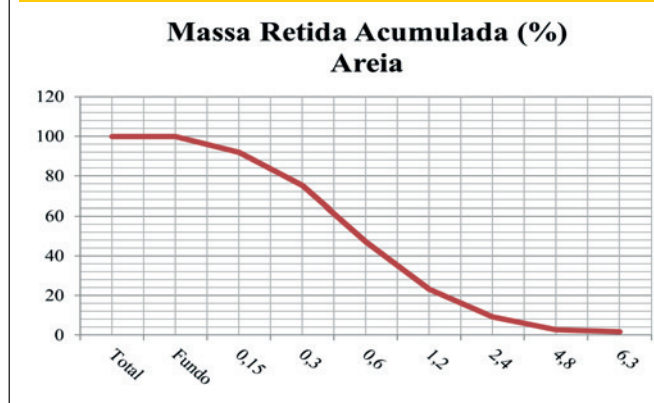
#### 4. Aderência aço e concreto com borracha

Uma das pesquisas realizadas no Brasil sobre aderência aço e concreto, sendo o concreto com resíduos de borracha de pneus, foi feita por França(2004)[18] na UNESP de Ilha Solteira. Ele comparou a tensão de aderência obtida em ensaios de *pull out*, entre concreto convencional de resistência à compressão de 35MPa, com concreto com resíduos de borracha de resistência de 25MPa para as idades de 28 dias e 90 dias.

**Figura 3 - Curva granulométrica da borracha**



**Figura 4 - Curva granulométrica da areia**



FRANÇA(2004)[18] comparou seus resultados experimentais com outros pesquisadores e concluiu que o concreto com borracha pode ser usado em estruturas de concreto armado, apesar das resistências mecânicas não alcançarem valores muito altos. As curvas tensão de aderência x deslizamento da barra tiveram desenvolvimento similar entre o concreto convencional e o concreto com borracha, apesar do concreto com borracha apresentar tensão de aderência com valores inferiores.

Tomando-se por base as constatações feitas em diversas pesquisas já concluídas sobre o comportamento mecânico do concreto com borracha. AKASAKI et al. (2003)[19] observaram que os resíduos chamados fibras de borracha podem atuar como obstáculos no desenvolvimento de fissuras, quando interceptam as microfissuras que surgem durante o endurecimento do concreto, impedindo sua progressão. Já YUNPING XI et al. (2004)[20] verificaram que o concreto com borracha possui características únicas com potencial para uso em variadas aplicações. Segundo Jacintho et.al. (2010)[21] o concreto com borracha pode ser utilizado na fabricação de peças pré-moldadas para piso como uma alternativa de contribuir para a diminuição da disposição deste

**Figura 5 - Curva granulométrica da brita**

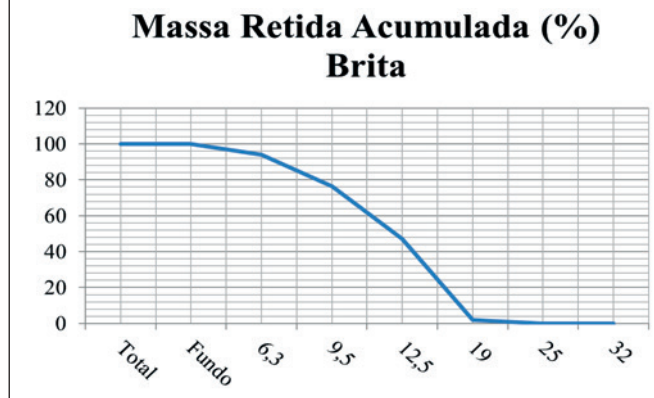


Tabela 4 – Resultados médios dos ensaios de resistência mecânica do concreto

Tipo de concreto	Idade do concreto	Resistência à compressão	Resistência à tração indireta	Resistência à tração na flexão	Módulo de elasticidade
Referência	7 dias	17,02	9,45	3,30	36,50
	28 dias	26,24	13,64	3,40	41,97
15% de borracha	7 dias	10,88	6,76	2,81	31,51
	28 dias	14,09	6,90	3,19	32,91
20% de borracha	7 dias	6,70	5,33	1,97	17,08
	28 dias	9,67	5,56	2,48	17,55

Figura 6 – Borracha triturada em tiras finas usadas como adição no concreto



material em aterros e para a preservação de recursos naturais não-renováveis.

## 5. Materiais e programa experimental

Os materiais empregados no programa experimental dessa pesquisa são oriundos da Região Metropolitana de Campinas.

Os resultados da caracterização com relação à granulometria dos agregados (borracha, areia e brita), são mostrados nas tabelas 1, 2 e 3, bem como nas figuras 3, 4 e 5.

A borracha utilizada nesta pesquisa pode ser vista na figura 6.

Os resultados da caracterização do concreto com borracha, ou seja, as suas propriedades mecânicas, assim como sua composição são apresentados neste item.

Para esta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: cimento: tipo CP ARI RS; água: da rede de abastecimento da cidade de Campinas; agregado miúdo: areia tipo quartzosa; agregado graúdo: pedra tipo basalto; borracha: de pneu inservível triturada; aditivo: polifuncional e aço: CA-50.

Foram atendidas as normas: NBR5738:2003[11] para o procedimento de moldagem e cura de corpos-de-prova; NBR5739:2007[1] para o ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto; NBR7222:2011[22] para a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos; NBR12142:2010[23] para a determinação da resistência à tração

Figura 7 – Resistência à compressão

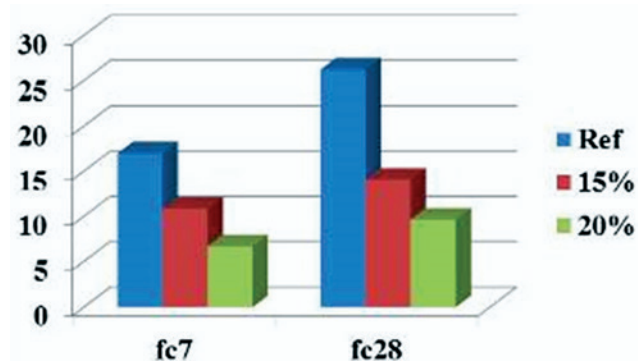
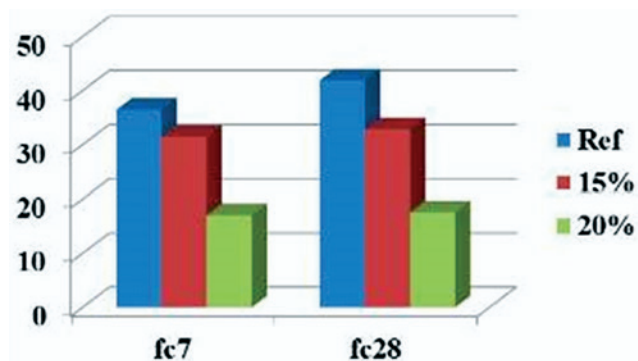
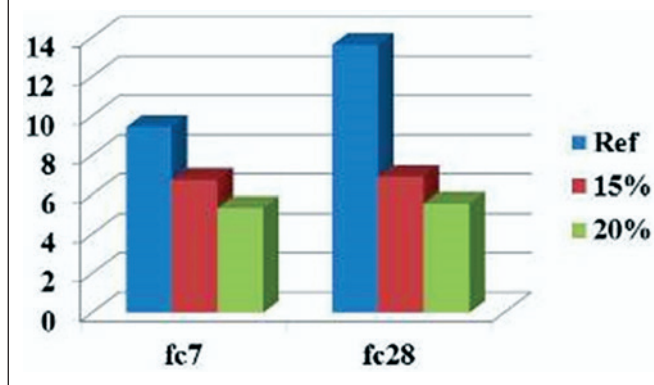


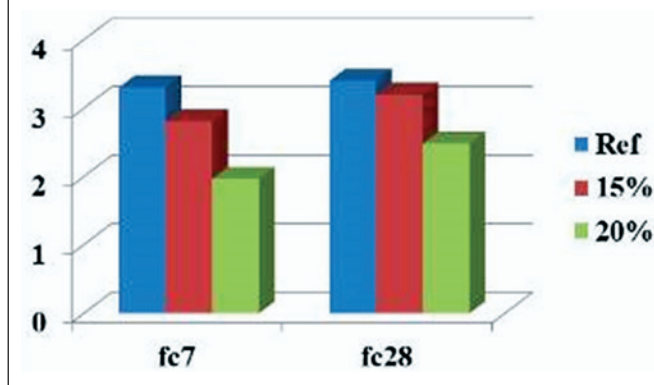
Figura 8 – Módulo de elasticidade



**Figura 9 – Resistência à tração na compressão diametral**



**Figura 10 – Resistência à tração na flexão**



na flexão em corpos-de-prova prismáticos; e a NBR8522:2008[24] para os ensaios para determinação do módulo de elasticidade.

Em um primeiro momento, foi estudado o concreto com borracha nas proporções de 15% e 20%. Foi feito um concreto convencional como referência para comparação dos resultados. As fibras foram adicionadas ao concreto tomando como referência o consumo de cimento, não substituindo nada com relação ao concreto referência. Os corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foram corpos de prova cilíndricos de 10cm x 20cm e os corpos de prova usados nos ensaios de resistência à tração na flexão foram os prismáticos de 15cm x 15cm x 50cm.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, podem ser vistos na tabela 4.

Nas figuras de 7 a 10 podem ser vistos os gráficos com os valores médios encontrados nos ensaios citados na tabela 4.

As características do aço encontradas para esta pesquisa foram: tensão de escoamento  $f_y = 583,0\text{MPa}$  e tensão de ruptura  $f_u = 708,3\text{MPa}$ . O diâmetro das barras usadas foi de 8mm.

### 5.1 Análise dos resultados das características mecânicas do concreto

Pelos gráficos apresentado nas figuras de 7 a 10 e pelos resul-

tados médios apresentados na tabela 4, pode-se observar uma queda nos valores das resistências e do módulo de elasticidade dos concretos contendo borracha, quando comparados com o concreto de referência, também observado por França[18] em proporções diferentes das aqui avaliadas.

A tabela 5 mostra de forma resumida, em porcentagem, a queda nos valores das resistências dos concretos desta pesquisa.

### 5.2 Ensaios de arrancamento e procedimentos

Após os testes iniciais de resistência do concreto, optou-se por fazer ensaios de arrancamento com uma porcentagem de adição de borracha, com taxa de 10%. Isto se deve ao fato da queda na resistência ter sido acentuada para a proporção de 20% de adição e os resultados de 15% não terem amenizado esta queda. O objetivo foi de se tentar obter resultados da tensão de aderência mais próximos do trabalho realizado por Granzotto[25] e por Jacintho et al[21].

Desta forma foram realizadas quatro concretagens e quatro moldagens: uma para o concreto referência, uma para o concreto com 10% de adição de borracha, uma para o concreto com 15% e uma para o concreto com 20% de adição de borracha.

Após a moldagem, os corpos de prova e os modelos de garrafa PET foram colocados no dia seguinte submersos em água para cura. Um dia antes de cada ensaio eles foram retirados da cura para que não fossem ensaiados na condição saturada.

**Tabela 5 – Parcelas de resistências mecânicas dos concretos em porcentagem**

Concreto	Idade do concreto	Resistência à compressão	Resistência à tração indireta	Resistência à tração na flexão	Módulo de elasticidade
Referência	7dias	100%	100%	100%	100%
	28dias	100%	100%	100%	100%
15%	7dias	63,9%	71,5%	85,2%	86,3%
	28dias	53,7%	50,6%	93,8%	78,4%
20%	7dias	39,4%	56,4%	59,7%	46,8%
	28dias	36,9%	40,8%	72,9%	41,8%



Figura 11 - Ensaio de arrancamento (APULOT)



O comprimento de ancoragem usado, para barras de diâmetro de 8mm foi de 11cm e foi calculado usando a Equação 4, admitindo as considerações da Equação 3, entretanto utilizando-se a tensão de ruptura do aço. Optou-se por esta tensão por entender-se que sendo este um concreto com borracha, onde suas características ainda não estão totalmente comprovadas, o comprimento de aderência deveria ser maior que o convencional, pois o concreto com borracha tem resistências menores que o concreto usual.

Foram realizados ensaios com 7 e 14 dias de idade para corpos de provas cilíndricos de dimensões 10x20cm e ensaios aos 14 dias de idade para modelos moldados com garrafas PET. Aos 7 dias obteve-se resultados da resistência à com-

Figura 13 - Ensaio de compressão diametral



pressão axial do concreto e do módulo de elasticidade.

Aos 14 dias foram realizados os ensaios de arrancamento das barras APULOT (figura 11) e também foram obtidas as seguintes características mecânicas do concreto: resistência à compressão (figura 12), resistência à tração por compressão diametral (figura 13) e módulo de elasticidade (figura 14).

Figura 12 - Ensaio de compressão axial

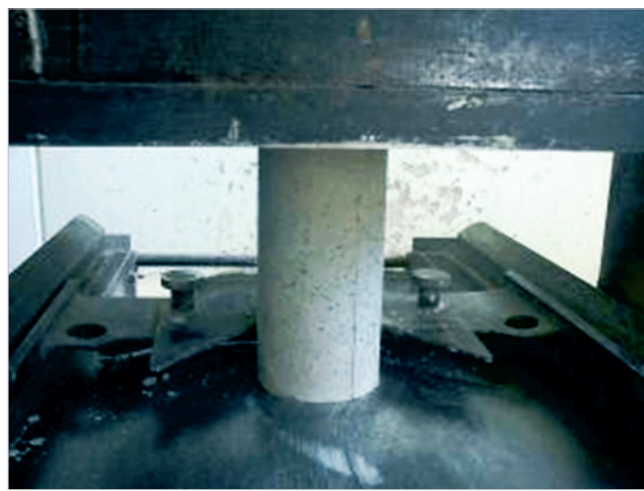


Figura 14 - Ensaio de módulo de elasticidade

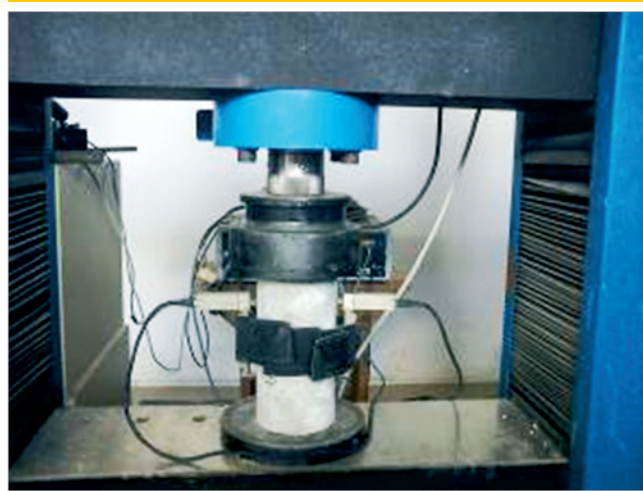




Tabela 6 - Características mecânicas dos concretos usados no ensaios APULOT

Tipo de concreto	Idade do concreto	Resistência à compressão	Resistência à tração indireta	Módulo de elasticidade
Referência	7 dias	37,25	-	46,78
	14 dias	38,37	4,32	48,51
	28 dias	43,27	3,97	47,79
10% de borracha	7 dias	26,22	-	40,93
	14 dias	30,59	3,76	42,72
	28 dias	30,94	2,77	43,16
15% de borracha	7 dias	19,08	-	38,10
	14 dias	18,53	2,80	43,17
	28 dias	19,77	2,65	42,73
20% de borracha	7 dias	18,29	-	32,61
	14 dias	20,01	2,54	35,81
	28 dias	18,45	2,42	33,63

## 6. Resultados e discussões parciais

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade podem ser vistos na tabela 6.

Na tabela 7, apresenta-se os resultados dos ensaios de arrancamento. Para todos os ensaios foram utilizados barras de 8mm de diâmetro e comprimento de ancoragem de 11cm. Foram ensaiados 5

modelos para cada série de concreto, entretanto alguns resultados foram descartados por se apresentarem muito discrepantes. Para a série do concreto referência, um resultado foi descartado, para a série do concreto com adição de 10% de borracha, 2 resultados foram descartados e para a série de concreto com 20% de borracha, um resultado não foi considerado.

As figuras de 15 a 18 mostram os gráficos de Tensão de Aderência x Deslizamento obtidos nos ensaios.

Tabela 7 - Resultados da tensão última de aderência obtidas nos ensaios APULOT

Tipo de concreto	Idade do concreto	Resistência à compressão (MPa)	Carga de ruptura (kN)	Tensão de aderência (MPa)
Referência	14 dias	38,37	45,14	16,33
		38,37	46,05	16,66
	28 dias	43,27	35,11	12,70
		43,27	53,59	19,38
		43,27	29,16	10,55
10% de borracha	14 dias	30,59	41,31	14,94
		30,59	39,90	14,43
		30,59	30,38	10,99
	28 dias	30,94	29,14	10,54
		30,94	45,89	16,60
		30,94	36,31	13,13
15% de borracha	14 dias	18,53	31,50	11,39
		18,53	33,11	11,98
	28 dias	19,77	37,06	13,41
		19,77	37,59	13,60
20% de borracha	14 dias	20,01	9,60	3,47
		20,01	14,91	5,39
		20,01	9,59	3,47
	28 dias	20,01	11,08	4,01
		18,45	8,21	2,97
		18,45	8,78	3,18
		18,45	9,70	3,51

Nota-se que quanto maior a quantidade de borracha adicionada ao concreto, menor foi a tensão última de aderência, entretanto os ramos das curvas pós tensão de pico mostram-se mais suaves com relação à sua inclinação. Com a adição de 10% de borracha, a perda da tensão última de aderência não foi muito acentuada. Isto se deve ao fato de que o concreto com esta quantidade de borracha não teve perda significativa na resistência à compressão, ao contrário, sua resistência acabou ficando superior ao concreto referência. Mesmo assim a tensão última de aderência ficou menor do que aquelas encontradas para o concreto referência. Já no concreto com 15% de adição de borracha percebe-se que as curvas de aderência se aproximam do concreto com 10% de adoção, com uma ligeira queda. Quando a adição de borracha no concreto foi de 20%, a resis-

tência à compressão foi menor e a tensão de aderência ficou em patamares bem menores, muito abaixo dos concretos com 10% e 15% de adição.

Na figura 19 é apresentada a correlação entre as tensões de aderência e as resistências à compressão obtida nos ensaios, com uma interpolação linear entre os pontos obtidos. Pode-se notar que os resultados do concreto com 20% de adição de borracha estão mais distantes dos outros concretos no gráfico.

## 7. Conclusões

A análise da correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão permitem concluir que os ensaio de aderência APULOT é adequado para estimar a resistência à com-

Figura 15 - Ensaios de arrancamento do concreto referência de 14 e 28 dias

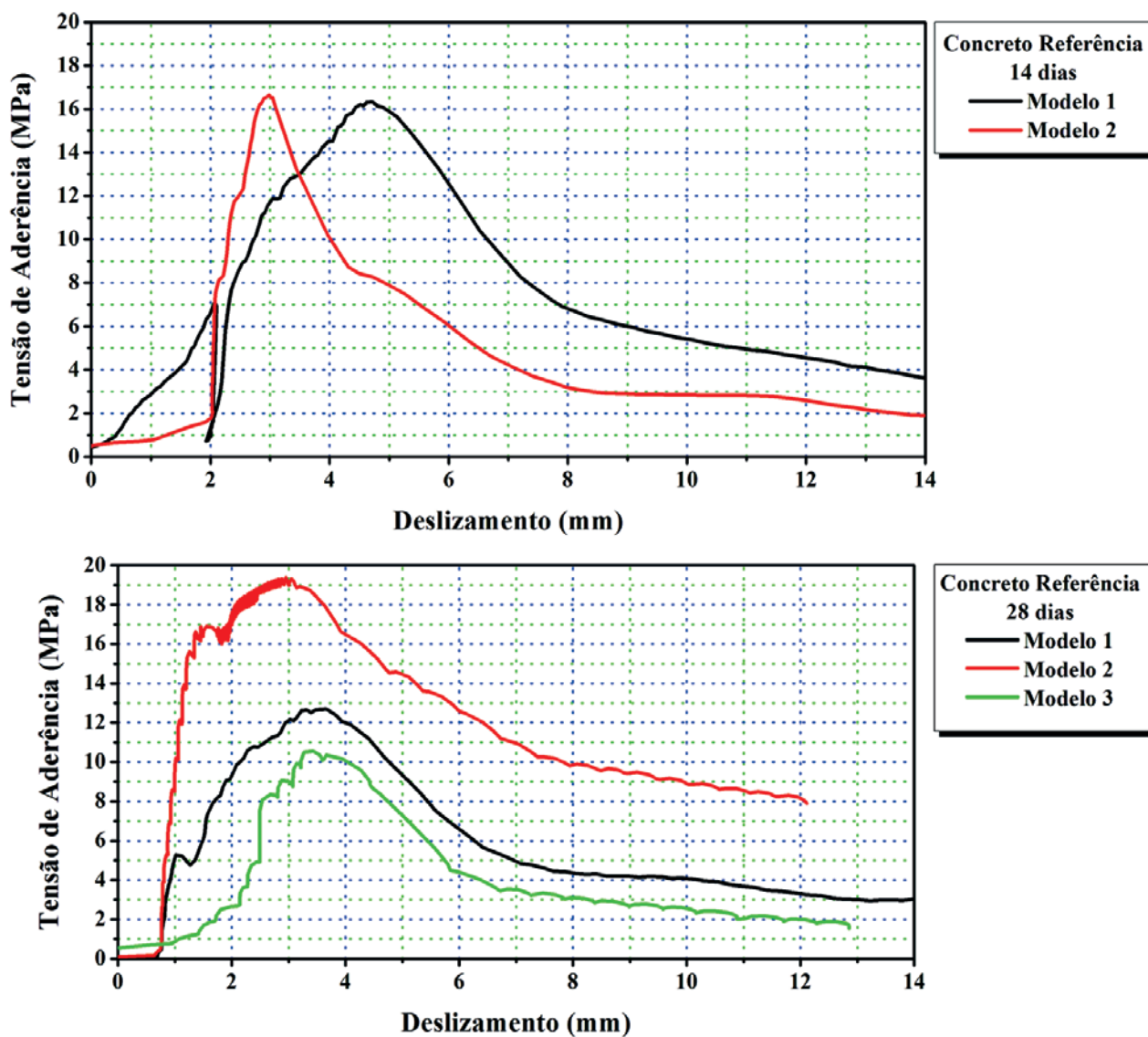
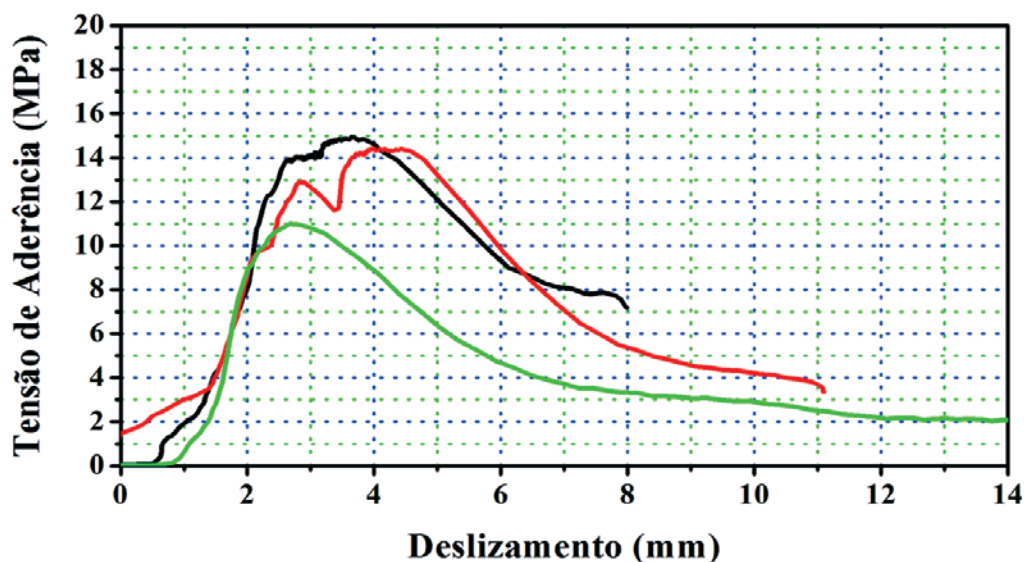
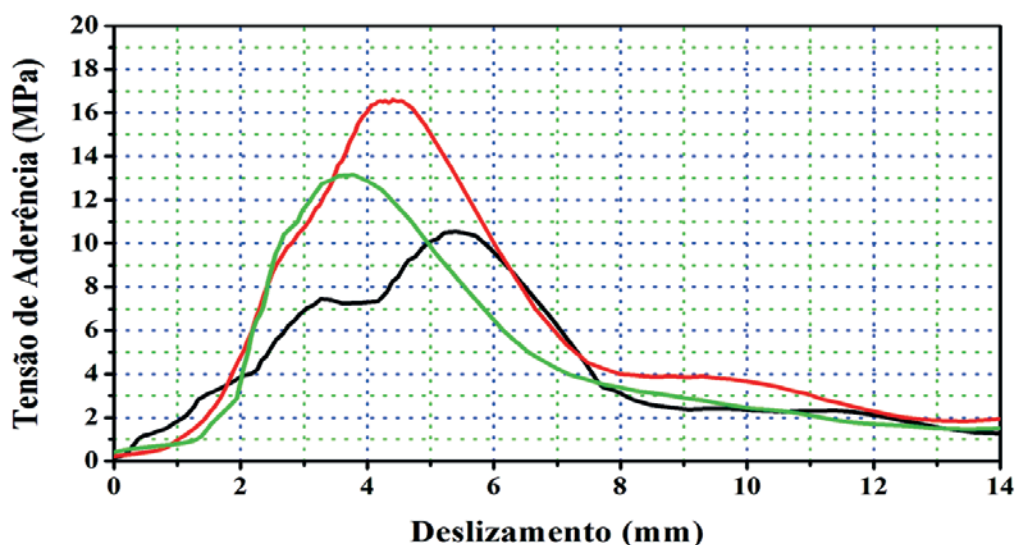


Figura 16 – Ensaio de arrancamento do concreto com 10% de borracha aos 14 e 28 dias



**Concreto  
10% Borracha  
14 dias**

— Modelo 1  
— Modelo 2  
— Modelo 3



**Concreto  
10% Borracha  
28 dias**

— Modelo 1  
— Modelo 2  
— Modelo 3

pressão axial do concreto, em todas as idades testadas. Com a análise das correlações é possível concluir que o acréscimo da tensão máxima de aderência é proporcional ao crescimento da resistência à compressão do concreto.

Uma conclusão parcial obtida neste trabalho já é clássica, a de que a adição de borracha no concreto faz com que o mesmo tenha uma diminuição na resistência à compressão.

Uma outra conclusão importante obtida foi a de que a adição de borracha no concreto faz com que a tensão de aderência também diminua. Portanto os valores indicados para o cálculo do comprimento de ancoragem para o concreto convencional devem ser revistos e aumentados para quando o elemento estrutural for feito com concreto com borracha, onde observou-se que para pequenas adições no concreto é possível de ser realizado.

E um indicativo obtido nesta pesquisa é de que os valores deste comprimento de ancoragem são proporcionais à quantidade de borracha adicionada ao concreto. Entretanto, para se chegar a equação correlacionando o comprimento de ancoragem com a quantidade de borracha adicionada ao concreto, mais pesquisas precisam ser realizadas, para uma gama maior de quantidades de borracha adicionadas ao concreto.

## 8. Agradecimentos

Os autores agradecem a à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo Auxílio financeiro prestado para que esta pesquisa pudesse ser realizada.

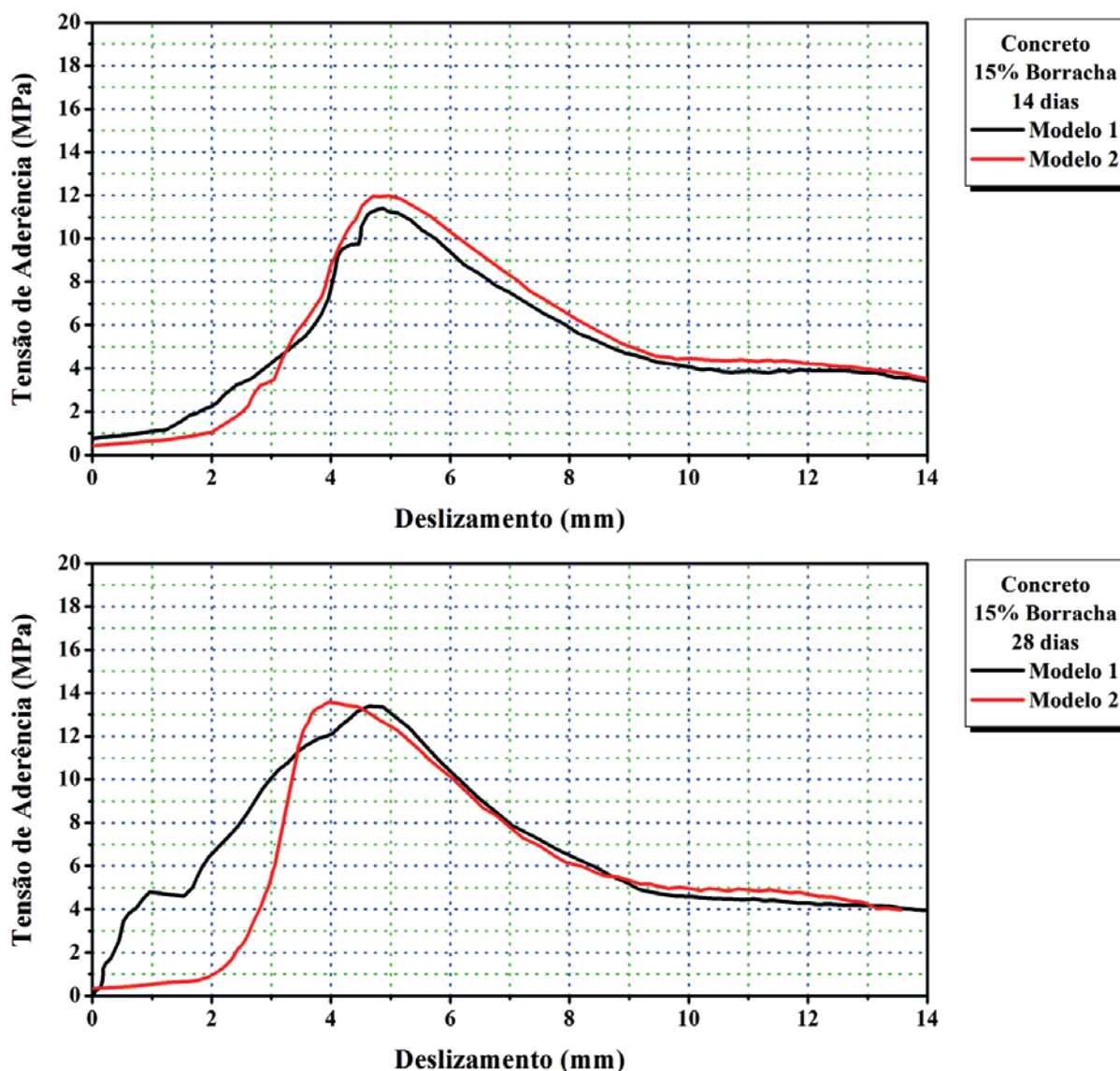
Também agradecem aos técnicos do laboratório de Materiais de

Construção e Estruturas, aos alunos Jonas Luís de Godoy e Ruy José Aun, da Pontifícia Universidade Católica da Campinas pelo auxílio prestado na elaboração e execução dos ensaios.

## 9. Referências bibliográficas

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [02] COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON: RILEM/CEB/FIB/RC6. Concrete Reinforcement Technology. Paris, Georgi Publishing Company, 1983
- [03] LORRAIN, M.; BARBOSA, M.P. Controle de qualidade dos concretos estruturais: Ensaio de aderência aço-concreto. Revista Concreto e Construções. n.51, pp. 52-57. jul, ago, set, 2008.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno, Rio de Janeiro, 2007
- [05] BRANDÃO, A.M.S. Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto, 1998. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1998.
- [06] FUSCO, P.B. , Princípios Básicos para Projeto de Estruturas de Concreto. In: IBRACON - instituto Brasileiro do Concreto. (Org.). CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA. 1 ed. São Paulo: Ipsis Gráfica e Editora, 2011, v. 1, p. 101-126.

Figura 17 - Ensaios de arrancamento do concreto com 15% de borracha aos 14 e 28 dias





- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2007.
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado. Especificações. Rio de Janeiro, 2007.
- [09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento, Rio de Janeiro, 2006.
- [10] 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, Rio de Janeiro, 1982.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. NBR 5738, Rio de Janeiro, 2008.
- [12] SILVA FILHO, L.C.P.; HELENE, P. Análise de estruturas de concreto com problemas de resistência e fissuração. In.: ISAIA G.C., Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ª Edição. São Paulo: Editora IBRACON, 2011. vol.2, cap. 32, p 1124-1174.
- [13] FUSCO, P. B. Técnica de armar as estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 1995, 265p.
- [14] American Standardization for Testing and Materials (ASTM) C 234 91a – Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforcing steel. 1996.
- [15] ABRAMS, D.A., “Test of Bond Between Concrete And

Figura 18 – Ensaios de arrancamento do concreto com 20% de borracha aos 14 e 28 dias

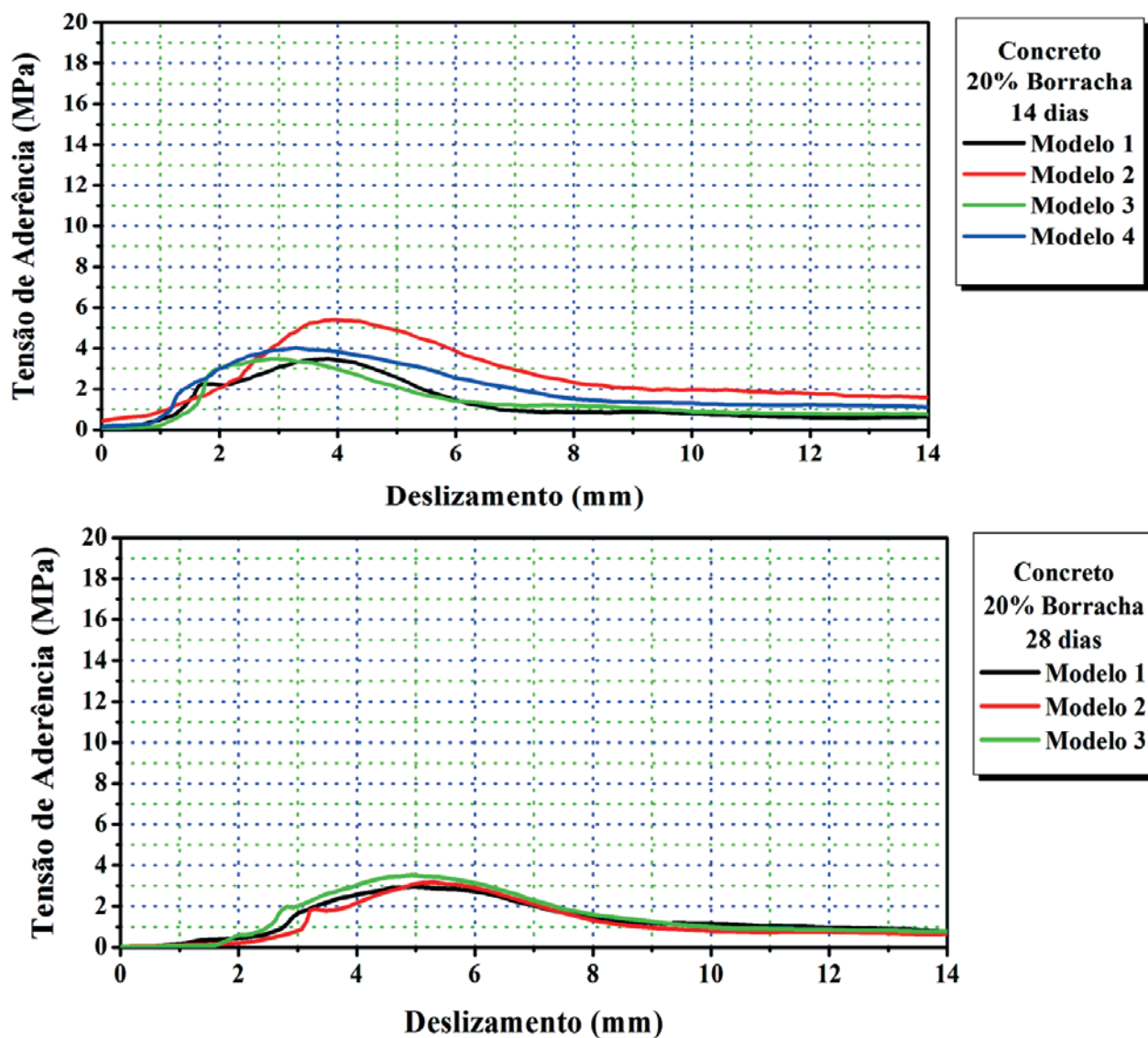
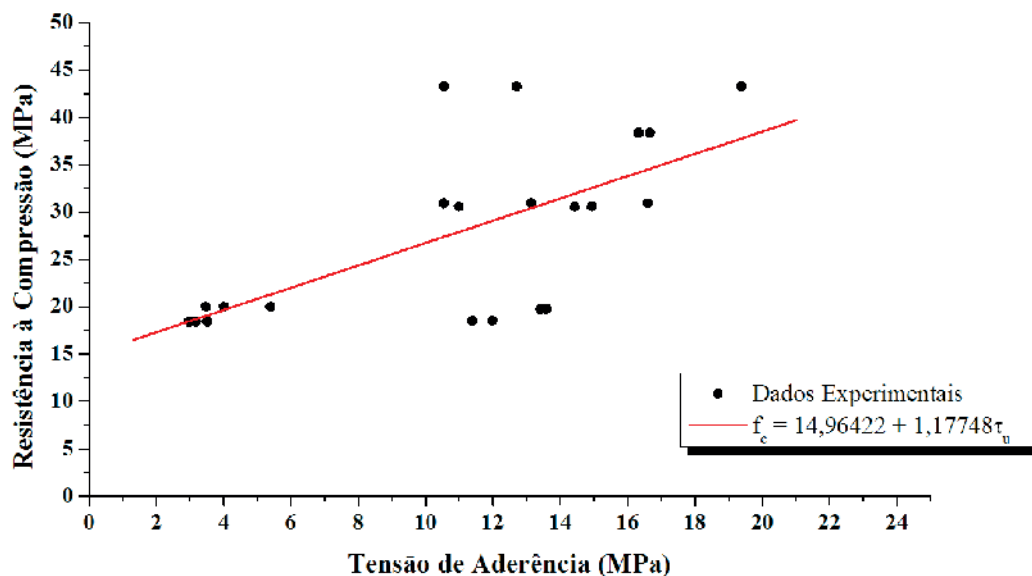


Figura 19 - Correlação entre a tensão de aderência e a resistência à compressão dos concretos ensaiados



Steel,"Engineering Experiment Station, Bulletin No. 71, University of Illinois, Champaign, 1913.

- [16] RÜSCH, H. Der Zusammenhang zwischen rissbildung und Haftfestigkeit unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung hoher Stahlspannungen. In: Stüssi, F.; Lardy, P. (Hrsg.) Fifth Congress (Lisboa-Porto), Preliminary publication. Lisboa; IABSE, 1956, S. 791-813.
- [17] LORRAIN, M.; BARBOSA, M.P.; ARNAUD M.. Bond test and on-site structural concrete quality control. 3rd fib International Congress – 2010. Anais. EUA. 2010.
- [18] FRANÇA, V. H. Aderência aço-concreto – uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha. Dissertação de Mestrado. UNESP de Ilha Solteira. 2004.
- [19] AKASAKI, J. L.; SERNA ROS, P.; REYES, B.; TRIGO, A. P. M.. Avaliação da Resistência à Flexão do Concreto com Borracha de Pneu com Relação ao Concreto Convencional. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. Vitória, E. S., IBRACON, 2003.
- [20] YUNPING XI, YUE LI, ZHAOHUI XIE, AND JAE S. LEE. Utilization of solid wastes (waste glass and rubber particles) as aggregates in concrete. In: International Workshop on Sustainable Development And Concrete Technology. pp.45-54, 2004.
- [21] JACINTHO, Ana Elisabete P. G. A.; CAMPOS, Wenderson C.; PIMENTEL, Lia L. Concreto com adição de fibras de borracha: um estudo frente às resistências mecânicas. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, 2010.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. NBR 7222, Rio de Janeiro, 2011.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. NBR 12142, Rio de Janeiro, 2010.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. NBR 8522, Rio de Janeiro, 2008
- [25] GRANZOTTO, I. Concreto com adições de borracha: uma alternativa ecologicamente viável. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, UEM, 2010.