UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

"Aderência Aço-Concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha"

Eng. Valério Henrique França

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

ORIENTADORA: Profª Drª Mônica Pinto Barbosa
CO-ORIENTADOR**:** Prof Dr Jorge Luís Akasaki

Ilha Solteira
Agosto de 2004

Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha

Valério Henrique França

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DO CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profª Drª Mônica Pinto Barbosa – UNESP/Ilha Solteira
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira

Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti – UNICAMP/Campinas
Professor Adjunto do Departamento de Construção Civil
Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP – Campinas

Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes – UNESP/Ilha Solteira
Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira

Ilha Solteira/SP, agosto de 2004.

Aos meus queridos pais: Antonio e Eunice
a minha irmã Judy e a querida Renata.

AGRADECIMENTOS

A professora Dra.Mônica Pinto Barbosa enquanto orientadora principal responsável pelo trabalho de pesquisa e ao professor Dr.Jorge Luis Akasaki pela co-orientação da elaboração do concreto.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil, na pessoa do engenheiro Flávio Moreira Salles, que colocou a disposição todas as instalações e apoio técnico, sem os quais seria difícil alcançar o meu objetivo.

A Holcim do Brasil, que forneceu o cimento utilizado na fabricação do concreto.

A Belgo Mineira, localizada na cidade de Piracicaba (SP), pelo fornecimento do aço utilizado nesta pesquisa.

A Araçá Recauchutadora de Pneus LTDA pelo fornecimento dos resíduos de borracha.

Aos técnicos que se tornaram amigos Ronaldo, Gilson, Mário, Silvio, Cavassano, Michelan, Francisco, Gilberto, Branco, Pascoalin, Lana, Milton, Jorge, Sergio, Picuila, Joaquim, Bertoluci, Sumy e a todos que colaboraram para a realização desta pesquisa.

Ao amigo e parceiro Prof. Adriano Souza que sempre esteve a disposição para auxiliar e colaborar em tudo que esteve ao seu alcance e pela amizade. Aos amigos que ajudaram na confecção da parte experimental Alex, Ana Carolina, André, André Ferraz, Carlos Adriano, Carlos Rogério, Felipe, Israel, Luciano, Mario, Mauro, Micheli, e em especial ao amigo Odair José Costa que colaborou em toda esta etapa.

Ao secretário do departamento de Engenharia Civil Sr. José Carlos de Oliveira, pela amizade e pelo apoio prestado na impressão deste trabalho.

Aos meus pais Antonio França e Eunice Alves França a minha irmã Judy Bell Lee França e a querida Renata Cristina Costa que contribuíram para tornar mais amenos os períodos de incerteza e hoje partilham comigo a satisfação de concluir essa etapa.

ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO –ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO FABRICADO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEUS

Valério Henrique França

Agosto/2004

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Mônica Pinto Barbosa

Co-Orientador: Prof. Dr.Jorge Luis Akasaki

Resumo

O bom comportamento das estruturas de concreto armado é assegurado pelo fenômeno da aderência existente entre o aço e o concreto, garantindo que os materiais trabalhem em conjunto formando, assim, um conjunto solidário.

Esse trabalho apresenta os resultados dos ensaios de tração direta, segundo a ABNT/NBR 7477 e de arrancamento normalizado pela CEB RC6 e referido também na ASTM C-234, realizados com concreto convencional e com concreto contendo 10% de resíduo de borracha em substituição a areia, em volume, nas idades de 28 e 90 dias. As barras de aço utilizadas neste trabalho foram do tipo nervuradas e com os diâmetros variando entre 10, 12,5 e 16 mm.

Com a introdução dos resíduos de borracha no concreto, foi avaliado o comportamento das mesmas em sua composição e a viabilidade da utilização estrutural desse tipo de concreto como material de construção, em substituição ao concreto convencional.

Os resultados obtidos através dos ensaios de aderência confirmam ma viabilidade da utilização do resíduo de borracha em substituição ao agregado miúdo em concreto, seguindo a composição adotada.

Palavra chave: aderência aço-concreto, concreto com resíduo de borracha, pneus, materiais alternativos, experimentação física.

BOND OF STEEL-CONCRETE – AN ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE CONCRETE MANUFACTURED WITH RUBBER RESIDUES

Valério Henrique França

August /2004

Advisors : Prof.ª Dr.ª Mônica Pinto Barbosa

Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki

Abstract

The good behavior of the structures of concrete reinforced is assured by the phenomenon of the existing bond between the steel and the concrete, guaranteeing that the materials work in set forming, thus, a solidary set. This work presents the results of the assays of direct traction, according to ABNT/NBR 7477 and of pulling up normalized for CEB RC6 and also related in the ASTM C-234, carried through with conventional concrete and concrete I contend 10% of rubber residue in substitution the sand, volume, the ages of 28 and 90 days. The used bars of steel in this work had been of the type with rib and with the diameter varying between 10, 12,5 and 16 mm. With the introduction of the rubber residues in the concrete, it was evaluated the behavior of same in its composition and viability of the structural use of this type of concrete as material of construction, in substitution to the conventional concrete. The results gotten through the bond assays confirm me the viability of the use of the rubber residue in substitution to the small aggregate in concrete, following the adopted composition.

Word key : bond steel-concrete, concrete with rubber residue, tires, materials alternative, physical experimentation.

ÍNDICE DO TEXTO

Página

LISTA DE FIGURAS i
LISTA DE TABELAS iv
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS vii

I FIBRAS DE BORRACHA - RESÍDUO DE RECAUCHUTAGEM 1
1 GENERALIDADES 1
1.2 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BORRACHA NA CONSTRUÇÃO CIVIL 6

II ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO 21
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 21
2.2 TIPOS DE ADERÊNCIA 33
2.3 PARÂMETROS QUE INFLUEM NA ADERÊNCIA 35
2.3.1 Composição do Concreto 36
2.3.2 Idade de Carga 36
2.3.3 Resistência Mecânica do Concreto 37
2.3.4 Diâmetro da Barra 38
2.3.5 Posição das Barras na Concretagem 40
2.3.6 Adensamento 41
2.3.7 Estado Superficial das Barras 42
2.4 ENSAIOS DE ADERÊNCIA 42
2.4.1 Ensaio de Arrancamento Direto: "PULL-OUT TEST (POT *)"* 42
2.4.2 Ensaio de Arrancamento com Anel Circunferencial 44
2.4.3 Ensaios de Flexão – "Beam Test (Bt)" 44
2.4.4 Ensaio de Aderência do Tipo "Push-Out Test" 45
2.4.5 Ensaio de Extremo de Viga – "Beam End Test" 45
2.4.6 Ensaios das Quatro Barras 46
2.4.7 Ensaio de Conformação Superficial ou Ensaio de Tirante 47

III PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 49
3.1 MATERIAIS 49
3.1.1 Agregado Miúdo 49
3.1.2 Agregado Graúdo 49
3.1.3 Cimento 52
3.1.4 Água 53
3.1.5 Resíduos de Borracha 53
3.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO 57
3.2.1 Fabricação e Conservação dos Corpos-de-Prova 58
3.3 ARMADURAS 61
3.4 MÉTODO EXPERIMENTAL 66
3.4.1 Ensaios de Tirantes 66
3.4.2 Fabricação dos Tirantes 69
3.4.3 Sistema de Carregamento 71
3.4.4 Sistema de Leitura 72
3.5 ENSAIO "PULL-OUT-TEST" 72

3.5.1 Sistema de Carregamento e Leitura 75

IV ESTUDO EXPERIMENTAL 78
4.1 ENSAIO DE TIRANTE.....78
4.2 ENSAIO "PULL-OUT-TEST".....86

V ANÁLISE ESTATÍSTICA.....100
5.1 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA AMOSTRA 100
5.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA 107

VI CONCLUSÕES.....111
VII BIBLIOGRAFIA.....114

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 -Estrutura do Pneu de Automóvel..... 3
Figura 2 - Raspagem da carcaça..... 4
Figura 3 - Esquema da seção transversal de uma pista de teste com tiras de borracha..... 8
Figura 4 - Efeito do tratamento da borracha na resistência do concreto..... 8
Figura 5 - Execução de aterro com utilização de pneus..... 15

CAPÍTULO II

Figura 6 - Diagrama esquemático da deformação do concreto ao redor da barra após a formação das fissuras internas causadas por tensões principais de tração..... 22
Figura 7 - Desenvolvimento das trajetórias das tensões principais junto a uma barra de armadura..... 23
Figura 8 - Influência do teor de microssílica na tensão de aderência..... 26
Figura 9 - Gráfico Deslizamento x Tensão de aderência..... 29
Figura 10 - Acabamento superficial de fios e barras lisas..... 34
Figura 11 - Geometria de uma barra nervurada e a interação mecânica entre a barra e o concreto..... 35
Figura 12 - Efeito da resistência à compressão do concreto na resistência da aderência, Ø=25mm..... 37
Figura 13 - Efeito da resistência à compressão na relação da tensão de aderência x escorregamento para barras nervuradas..... 38
Figura 14 - Formação de espaços vazios ou poros sob as barras concretadas em posição horizontal devida à segregação e ao acúmulo de água..... 40
Figura 15 - Disposição geral do ensaio de arrancamento “pull-out-test” proposto pela RILEM (1973)..... 43
Figura 16 - Ensaio de arrancamento com anel circunferencial..... 44
Figura 17 - Ensaio de flexão em vigas CEB RC5 (1993)..... 45

Figura 18 - Corpo-de-prova para o ensaio de extremo de viga..... 46
Figura 19 - Desenho esquemático do corpo de prova..... 46
Figura 20 - Ensaio de Tirantes de Concreto..... 47

CAPÍTULO III

Figura 21 - Resultados da caracterização da areia..... 50
Figura 22 - Resultados da caracterização da brita 1..... 51
Figura 23 - Resíduos de borracha no estado natural..... 53
Figura 24 - Resíduos de borracha que passaram pela peneira nº 16..... 54
Figura 25 - Resultados da caracterização da fibra de borracha no estado natural..... 55
Figura 26 - Resultados da caracterização da fibra de borracha que será utilizada..... 56
Figura 27 - Slump Test Concreto Convencional..... 57
Figura 28 - Slump Test Concreto Convencional..... 58
Figura 29 - Película plástica nos corpos-de-prova..... 59
Figura 30 - Resistência à Compressão..... 60
Figura 31 - Resistência à Tração..... 61
Figura 32 - Módulo de Deformação..... 61
Figura 33 - Leitura do ângulo de inclinação das nervuras..... 63
Figura 34 - Medição da altura das nervuras..... 64
Figura 35 - Distância entre as nervuras..... 65
Figura 36 - Formas para confecção dos tirantes..... 67
Figura 37 - Montagem das formas para Tirantes..... 68
Figura 38 - Formas untadas e posição dos aços..... 69
Figura 39 - Adensamento do tirantes utilizando mesa vibratória..... 70
Figura 40 - Formas cobertas com sacos de aniagem úmidos..... 70
Figura 41 - Sistema de Carregamento..... 71
Figura 42 - Marcação das fissuras..... 72
Figura 43 - Dimensão dos cps utilizados no ensaio “pull-out”..... 73
Figura 44 - Confecção das formas “Pull-Out”..... 73
Figura 45 - Direção da concretagem realizada..... 74
Figura 46 - Moldes cobertos com sacos de aniagem úmidos..... 75
Figura 47 - Sistema montado para ensaio “pull-out-test”..... 75
Figura 48 - Sistema de Carregamento e Leitura..... 76

Figura 49 - Detalhe da placa de aço e chapa em couro utilizado..... 77

CAPÍTULO IV

Figura 50 - Comparação entre os corpos-de-prova fabricados com concreto convencional e com incorporação de fibras de borracha..... 78
Figura 51 - Corpos-de-prova ensaiados – Concreto com fibra..... 79
Figura 52 - Corpos-de-prova ensaiados – Concreto convencional..... 79
Figura 53 - Coeficiente de aderência da barra de aço Ø 10,0 mm 82
Figura 54 - Coeficiente de aderência da barra de aço Ø 12,5 mm 82
Figura 55 - Coeficiente de aderência da barra de aço Ø 16,0 mm 83
Figura 56 - Tensão de aderência x deslizamentos – aço 10,0 mm..... 89
Figura 57 - Tensão de aderência x deslizamentos – aço 12,5 mm..... 92
Figura 58 - Tensão de aderência x deslizamentos – aço 16,0 mm..... 95
Figura 59 - Corpo-de-prova fendilhado..... 97
Figura 60 - Corpo-de-prova fendilhado..... 97
Figura 61 - Deslizamento do aço..... 98
Figura 62 - Ruptura do aço..... 98

CAPÍTULO V

Figura 63 - Espaçamento médio entre fissuras Ø 10,0 mm (28 e 90 dias).... 101
Figura 64 - Espaçamento médio entre fissuras Ø 12,5 mm (28 e 90 dias).... 102
Figura 65 - Espaçamento médio entre fissuras Ø 16,0 mm (28 e 90 dias).... 102
Figura 66 - Tensão de Aderência para os aços de 10,0 mm (28 e 90 dias).. 104
Figura 67 - Tensão de Aderência para os aços de 12,5 mm (28 e 90 dias).. 104
Figura 68 - Tensão de Aderência para os aços de 16,0 mm (28 e 90 dias).. 105
Figura 69 - Comparação do coeficiente de variação para os ensaios de "pull-out-test" e tirantes..... 106

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1- Análise química da cinza de borracha e do cimento do tipo I usados no estudo 19

CAPÍTULO III

Tabela 2 - Resultados da Caracterização do Cimento..... 52
Tabela 3 - Composição do Concreto Convencional..... 57
Tabela 4 - Composição do Concreto 10% de fibra..... 58
Tabela 5 - Valores obtidos nos ensaios das características mecânicas dos concretos..... 60
Tabela 6 - Resultados da caracterização das barras de aço 62
Tabela 7 - Conformação Geométrica dos Aços Estudados..... 65
Tabela 8 - Valores para área relativa da nervura (F_R)..... 66
Tabela 9 - Dimensão dos tirantes ensaiados..... 68

CAPÍTULO IV

Tabela 10 - Espaçamento médio entre fissuras (cm) e CV (%)..... 80
Tabela 11 - Resumo dos valores obtidos de XM e CV..... 80
Tabela 12 - Coeficiente de conformação superficial das barras estudadas... 81
Tabela 13 - Aumento em porcentagem do (η) em relação ao aumento do diâmetro da barra..... 83
Tabela 14 - Tensão de aderência segundo Castro (2000)..... 84
Tabela 15 - Tensão de aderência segundo a ABNT..... 85
Tabela 16 - Tensão de aderência (MPa) Concreto convencional - 10,0mm-28dias..... 87
Tabela 17 - Tensão de aderência (MPa) Concreto com borracha - 10,0mm-28dias..... 87
Tabela 18 - Tensão de aderência (MPa) Concreto convencional- 10,0mm-90dias..... 88

Tabela 19 - Tensão de aderência (MPa) Concreto com borracha - 10,0mm 90dias..... 88

Tabela 20 - Tensão de aderência (MPa) Concreto convencional – 12,5 mm 28 dias..... 90
Tabela 21 - Tensão de aderência (MPa) - Concreto borracha – 12,5 mm - 28 dias..... 90
Tabela 22 -Tensão de aderência (MPa) - Concreto convencional – 12,5mm 90 dias..... 91
Tabela 23 - Tensão de aderência (MPa) - Concreto borracha - 12,5 mm - 90 dias..... 91
Tabela 24 -Tensão de aderência (MPa) - Concreto convencional – 16,0mm 28 dias..... 93
Tabela 25 - Tensão de aderência (MPa) - Concreto borracha – 16,0 mm - 28 dias..... 93
Tabela 26 -Tensão de aderência (MPa) - Concreto convencional – 16,0mm 90 dias..... 94
Tabela 27 - Tensão de aderência (MPa) - Concreto borracha – 16,0 mm - 90 dias..... 94
Tabela 28 -Tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem para idade de 28 dias..... 96
Tabela 29 -Tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem para idade de 90 dias..... 96
Tabela 30 - Forma de ruptura da aderência..... 96

CAPÍTULO V

Tabela 31 - Coeficiente de variação do espaçamento médio entre fissuras (Xm)..... 103
Tabela 32 - Coeficiente de variação p/ média da tensão de aderência..... 105
Tabela 33 - Resultados obtidos na análise estatística das observações p/ as barras de Ø circular e os dois tipos de concreto 28 dias..... 108
Tabela 34 - Resultados obtidos na análise estatística das observações para as barras de seção circular e os dois tipos de concreto

90 dias..... 108
Tabela 35 - Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 0,01mm – 28 dias..... 108
Tabela 36 - Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 0,1mm – 28 dias..... 109
Tabela 37 - Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 1,0 mm – 28 dias..... 109
Tabela 38 - Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 0,01mm – 90 dias..... 109
Tabela 39 - Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 0,1mm – 90 dias..... 109
Tabela 40 - Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 1,0 mm – 90 dias..... 110

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

a – espaçamento médio entre 10 nervuras consecutivas das barras de aço;

A_c – área de concreto;

An – área da nervura;

A_s – área de aço;

BT – beam test;

CAD – concreto de alto desempenho;

CEB – Comité Euro-International du Béton;

CP – corpo-de-prova;

CV – coeficiente de variação da amostra;

E_c – módulo de elasticidade do concreto;

E_s – módulo de elasticidade do aço;

e – altura mínima da nervura das barras de aço;

Fcalculado – valor de F (calculado) onde F é a distribuição de fischer;

Ftabelado - valor de F (tabelado) onde F é a distribuição de fischer;

f_{bd} – tensão de aderência (de cálculo) adotada pela norma brasileira;

f_c – resistência à compressão do concreto;

f_{cm} – resistência média à compressão do concreto;

f_{ct} – resistência à tração do concreto;

f_{ctm} – resistência média à tração do concreto;

f_y – resistência de escoamento do aço à tração;

f_R – área relativa da nervura;

h_s – altura máxima da nervura;

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas;

La – comprimento de ancoragem;

Lb – comprimento de ancoragem (normalização brasileira);

LI – teorema do limite inferior;

LS – teorema do limite superior;

$l_{0,\ 1,...}$ – comprimento de aderência associado ao deslizamento s_0, s_1, ...

M – valor médio;

n – número de nervuras no comprimento de ancoragem;

N – força de tração;

NBR – norma brasileira de regulamentação;

q – carga aplicada;

P – força;

POT – ensaio de pull out (arrancamento);

S_n – distância entre nervuras transversais centro a centro;

s – deslizamento;

$s_{máx}$ – deslizamento máximo;

u_s – deslocamento do aço;

X_m – valor médio do espaçamento entre as nervuras;

β - ângulo de inclinação da nervura;

ε_c – deformação no concreto;

ε_s – deformação no aço;

φ - ângulo de fricção do concreto;

$\varnothing$ - diâmetro da barra;

ρ - taxa de armadura;

σ_c – tensão no concreto;

σ_s – tensão no aço;

η - coeficiente de conformação superficial das barras de aço;

$\eta_{(1,, 2, 3)}$ – coeficientes da normalização brasileira;

τ - tensão de aderência;

τ_{bm} – tensão média de aderência oriunda da rigidez da peça;

τ_m – tensão média de aderência;

$\tau_{máx}$ – tensão máxima de aderência;

τ_u – tensão última (ruptura) da aderência;

Δ - variação percentual;

Δ_x – distância entre duas fissuras;

RESÍDUO DE BORRACHA – PROVENIENTE DE RECAUCHUTAGEM DE PNEUS

1. GENERALIDADES

A borracha natural é um polímero obtido a partir da seiva da seringueira, árvore de origem amazônica, mas que ganhou o mundo, principalmente pela rápida adaptação que sofreu quando, na virada do século, foi plantada com sucesso nas florestas tropicais asiáticas.

Para sua extração, são feitos pequenos cortes superficiais no tronco da árvore, através dos quais o látex é captado. Depois de sua coagulação e secagem, este material é aquecido e posteriormente processado com outras substâncias químicas, transformando-se em borracha.

Com o passar do tempo criou-se, na Alemanha, a tecnologia para fabricá-la artificialmente a partir do petróleo. Apesar da borracha sintética ser muito parecida com a borracha natural, ela não é tão resistente ao calor e racha facilmente com mudanças rápidas de temperatura. Por isso, os artefatos são sempre constituídos de uma parcela da borracha natural.

No Brasil, a maior parte da borracha produzida industrialmente é usada na fabricação de pneus, correspondendo a 70% da produção. Além disso, ela pode ser empregada em calçados e instrumentos cirúrgicos como, por exemplo, tubos, seringas e outros produtos farmacêuticos.

Atualmente, a maior parte dos pneus é feita com 10% de borracha natural (látex), 30% de petróleo (borracha sintética) e 60% de aço e tecidos (tipo lona), que servem para fortalecer ainda mais a estrutura.

Os pneus foram inventados em 1845, depois que o norte-americano, Charles Goodyear, descobriu casualmente o processo de vulcanização da borracha, quando deixou cair borracha e enxofre no fogão.

Os pneus tornaram-se então, substitutos das rodas de madeira e ferro, usadas em carroças e carruagens. A borracha, além de ser mais resistente e durável, absorve melhor o impacto das rodas com o solo, o que tornou o transporte mais confortável e funcional.

Em 1993, 0,5% do lixo urbano brasileiro eram de pneus velhos e fora de uso. Hoje são descartados no país cerca de 17 milhões de pneus por ano

O pneu usado é um resíduo indesejável, que tem se tornado um grande problema para sociedade. No que tange à saúde, ele tem sido um meio de proliferação do mosquito Aëdes Aegypti, devido ao acúmulo de água em sua parte interna. Para o meio ambiente, o problema causado pela disposição de pneus em aterros sanitários e lixões é grave, uma vez que eles possuem grande resistência à degradação, podendo levar até 240 anos para se decomporem. Quando se opta pela queima desses pneus, o prejuízo causado ao meio ambiente acontece devido à enorme quantidade de fumaça negra e óleo que penetram e contaminam solos e lençóis d'água.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA conseguiu em agosto de 1999, que o governo brasileiro oficializasse através da resolução nº 258, publicada no Diário Oficial de 2/12/1999, uma destinação final de forma ambientalmente adequada e segura, aos pneumáticos inservíveis, dispondo entre outras coisas, sobre a reciclagem e os prazos de coleta.

Muitas das indústrias pneumáticas têm realizado a coleta destes pneus inservíveis, efetuando a destinação final em instalações próprias ou mediante contratação de serviços especializados de terceiros. Estas instalações deverão atender à legislação ambiental. A resolução 258 proíbe a destinação final de pneus inservíveis em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços e queima a céu aberto.

Uma forma de diminuir este impacto é a reutilização dos pneus, processo denominado recauchutagem. A Figura 1 mostra a estrutura do pneu de automóvel.

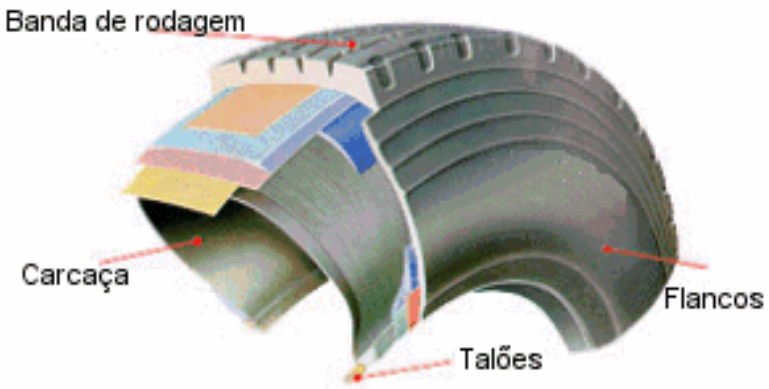


Figura- 1 Estrutura do Pneu de Automóvel. (http://www.rodasepneus.com.br) visitado em 05/04/2004

- **Carcaça:** parte resistente do pneu que deve resistir à pressão, ao peso e a choques. Compõe-se de lonas de poliéster, nylon ou aço.
- **Talões:** constituem-se internamente de arames de aço de grande resistência, tendo por finalidade manter o pneu fixado ao aro da roda.
- **Flancos:** são as laterais da carcaça, sendo revestidas por uma mistura de borracha com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga;
- **Banda de Rodagem:** é a parte do pneu que fica em contato direto com o solo, a qual possui desenhos com partes cheias chamadas de biscoitos e partes vazias conhecidas como sulcos; devem oferecer aderência, tração, estabilidade e segurança ao veículo.

Em grande parte das recauchutadoras de pneus o processo de recauchutagem é mecânico, e é através dele que se realiza a raspagem das bandas de rodagem, por intermédio de dois cilindros ranhurados. Deste processo originam-se os resíduos de borracha que são utilizadas nesta pesquisa.

A raspagem é a remoção da borracha remanescente da banda de rodagem, configurando a carcaça no diâmetro, contorno e textura adequada.

Segue abaixo a Figura 2 que mostra o equipamento utilizado para a raspagem da banda de rodagem.

Figura- 2. Raspagem da carcaça. (http://www.renosul.com.br) visitado em 05/04/2004

De acordo com a ANIP (Associação Nacional das Indústrias Pneumáticas), cerca de 70% da frota de transporte de cargas e passageiros utilizam pneus recauchutados. O processo de recauchutagem, por sua vez, gera uma grande quantidade de resíduos que são descartados da mesma maneira que os pneus. A fim de amenizar este problema, projetos têm sido realizados para dar fim ecologicamente correto a este material.

Uma empresa de Curitiba pioneira no setor - a Ecija Comercial Exportadora, fundada em 1992, exporta por ano 1,2 mil toneladas de raspa da borracha dos pneus, obtida após o processo de recauchutagem, colaborando com a preservação do meio ambiente. Este material é vendido a outros países que o utilizam na fabricação de pisos, tapetes para carros e outros

Com o intuito de retirar os pneus velhos do meio ambiente para reutilização em todo o país, a Usina de Xisto da Petrobrás, em São Mateus do Sul, está testando um sistema de produção industrial de óleo e de gás em que parte da matéria-prima utilizada são pneus inservíveis. Caso o sistema receba a licença do Instituto Ambiental do Paraná (IAP), para ser operado em caráter industrial, a

unidade da Petrobrás poderá utilizar como matéria-prima até 24 milhões de pneus por ano, de acordo com Rubens Novicki, superintendente da usina .

Vale ressaltar que com investimentos de US$ 500 mil, a ANIP já ajudou na montagem e operação de três centros de trituração em São Paulo (Jundiaí, Sorocaba e São Bernardo) e está organizando a coleta de pneus em seis ecopontos pelo país. Com isso, já superou a meta do CONAMA para o ano de 2003, que era de 80 mil toneladas, e acabou reciclando 115 mil toneladas.

Uma outra solução, para reduzir o impacto negativo provocado por pneus usados ao meio ambiente, foi apresentada pela ONG Guardiões da Terra. A ONG pretende utilizá-los para a fabricação de móveis e utensílios domésticos e promover a geração de emprego e de renda. Várias peças demonstrativas já foram confeccionadas e despertaram a atenção da comunidade local.

O projeto prevê o aproveitamento de 98% do pneu para a fabricação manual de mesas, cadeiras, vasos e outros utensílios duradouros, sem agressão ao meio ambiente. “A técnica é nova, porém eficiente. Além de aproveitar os pneus, reduz o impacto na natureza, reduz os focos de doenças como a dengue e colabora para geração de empregos”, explicou o diretor da ONG, Ciro Gomes de Freitas.

Outro processo desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), visa à reciclagem de borracha vulcanizada.

O método inédito é mais simples e barato do que o empregado hoje. Converte a borracha vulcanizada em um material polimérico (uma espécie de plástico viscoso) que, por sua vez, pode ser transformado em pneus novos, combustível, óleo, graxa, plásticos, asfaltos de maior elasticidade e durabilidade ou aditivos para outros polímeros.

O químico, Rochel Montero Lago, do Departamento de Química da UFMG, coordenador da equipe que desenvolveu o processo, explica que os métodos existentes para desvulcanizar borracha são caros: "A composição da borracha vulcanizada dá a este material alta resistência química e física o que torna a reciclagem um processo complexo e não economicamente atraente para a indústria; além disso, o material resultante dos atuais métodos de desvulcanização é poluente e não dá para ser reaproveitado”.

Assim, a tecnologia criada na UFMG, além de ser mais barata, permite o controle da emissão de poluentes como o gás carbônico e o dióxido de enxofre durante o processo de desvulcanização.

Na cidade de Cascavel, no estado do Paraná, os pneus descartados estão sendo utilizados pela Prefeitura local para a construção de galerias pluviais em substituição ao manilhamento de cimento. Com isso, estão conseguindo economia de até 50%, ao mesmo tempo em que produzem bons resultados ambientais com a retirada dos pneus de terrenos baldios e a prevenção contra mosquitos nocivos à saúde.

A idéia da utilização dos pneus como substituição de manilhas de cimento é do microempresário Antonio Guedes. De cada pneu são tiradas duas faixas - aquelas que encostam na roda - com cerca de 5 centímetros. Esses pedaços são encaixados um no outro formando uma espécie de tubo com diâmetro entre 40 e 60 centímetros. Com o tempo, a própria resina da borracha faz com que esses pedaços se colem, garantindo total impermeabilidade.

Os técnicos da prefeitura realizaram análises da reação do novo manilhamento após as chuvas pesadas e aprovaram a eficiência deste material.

Estas são algumas opções para utilização de pneus inservíveis. Na construção civil estão sendo desenvolvidas pesquisas que vão permitir o seu reaproveitamento como material de construção.

2. UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BORRACHA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

No Brasil, a construção civil é responsável por cerca de 30% do consumo dos recursos naturais extraídos, o equivalente a 220 milhões de toneladas de agregados naturais por ano, retirados da natureza para serem utilizados principalmente na produção de concretos e em argamassas. Devido a este elevado consumo os agregados naturais tornam-se cada vez mais escassos. Com isso, os locais para a captação destes ficam cada vez mais distantes, elevando o seu custo final.

Com a necessidade de novos materiais que venham a substituir estes agregados, alguns pesquisadores tiveram a idéia de utilizar o resíduo de borracha, proveniente da recauchutagem, como parte do agregado miúdo. Diversos estudos vêm sendo realizados, na construção civil, visando à utilização deste resíduo, que resulta na retirada deste material do meio ambiente.

Segundo CINCOTTO (1988), os critérios gerais para avaliação do resíduo de borracha para uso na construção civil, são:

- a quantidade disponível em um local deve ser suficientemente grande para que se possa justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte;
- as distâncias de transporte envolvidas devem ser competitivas com os materiais convencionais;
- o material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação na estrutura.

O resíduo de borracha utilizado nesta pesquisa atende aos critérios acima mencionados. Sendo encontrado em grande quantidade na região segundo pesquisas anteriores, pode ser incorporado aos materiais de construção sem causar danos.

A maioria das pesquisas que vêm sendo realizadas sobre a viabilidade da utilização de resíduos de borracha na construção civil, estão voltados à implementação da borracha de pneu em rodovias.

ELDIN e SENOUCI (1992), em uma de suas pesquisas, utilizaram tiras de borracha provenientes da raspagem de pneus com grande área de sulco. Com este material executou-se uma base de pista de teste, conforme Figura 3, misturando as tiras com materiais da região, como solo e rochas. Utilizou-se porcentagem de 20 a 30% em volume, que foram adicionados ao material da região. Após a realização de vários testes concluíram que houve problemas de compressibilidade, mas o resíduo de borracha apresentou resultados positivos que levaram os pesquisadores a desenvolverem outros estudos.

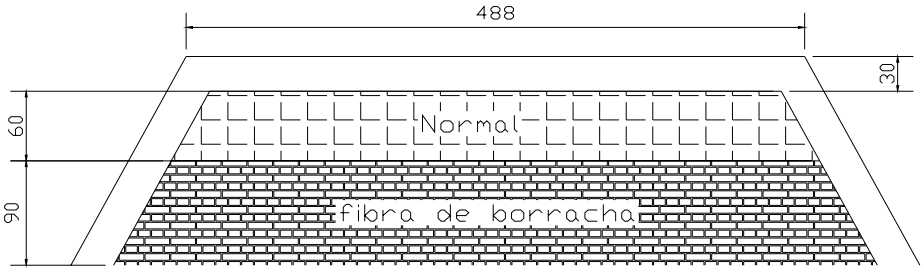


Figura 3 - Esquema da seção transversal de uma pista de teste com tiras de borracha (ELDIN e SENOUCI (1992)

Em outra pesquisa ELDIN e SENOUCI (1993a) substituíram o agregado miúdo por borracha de pneu no concreto constatando uma diminuição da resistência à compressão na ordem de 85%, em relação ao concreto comum. Foi observado também que ao substituir o agregado graúdo pelo resíduo de borracha, o concreto teve uma redução de 25% em relação ao seu peso de um concreto sem resíduo. Os autores notaram que, quando a borracha foi substituída por agregados miúdos, houve uma menor perda de resistência à compressão, comparada com a substituição da borracha por agregados graúdos.

A borracha utilizada pelos autores acima citados, não sofreu nenhum tipo de tratamento. ROSTAMI *et al*. (1993) experimentaram realizar tratamentos superficiais com água, tetracloreto de carbono (CCl4) e látex aplicados à borracha. Os resultados obtidos podem ser comparados na Figura 4. O tratamento da borracha foi justificado pela fraca adesão entre suas partículas e a matriz de cimento.

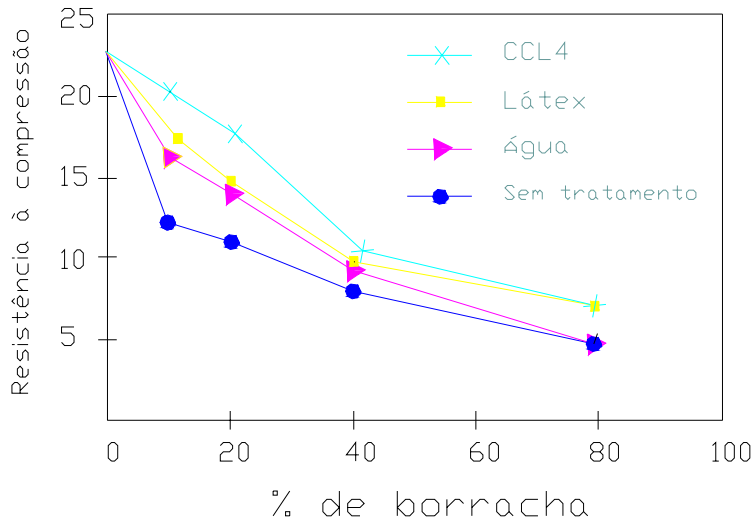


Figura 4 – Efeito do tratamento da borracha na resistência do concreto (ROSTAMI et al., 1993)

Os pesquisadores observam que a borracha contém uma significante quantidade de impurezas e contaminações superficiais, oriundas do processo de trituração. O simples fato de lavá-la com água melhorou a resistência em 16% em relação à borracha não tratada.

A lavagem com água, no entanto, não foi capaz de eliminar todos os resíduos superficiais. Com a utilização de um solvente (CCl4), houve um aumento de 57% da resistência em relação à borracha não tratada. A adição de látex, que funcionou mais como um agente de acoplamento, melhorou a resistência em 42%. LI *et al*. (1998) e SEGRE e JOEKES (2000) também experimentaram outros tipos de tratamento, obtendo resultados que indicam melhor adesão entre a matriz de cimento e a borracha.

TOPÇU (1995) observou, em sua pesquisa, uma redução geral nas propriedades físicas e mecânicas do concreto com resíduos, constatando uma maior redução com utilização de resíduos de diâmetros maiores. A diminuição da resistência à compressão foi da ordem de 50%, enquanto a de tração foi de 64 % para os concretos misturados com partículas de borracha finas. Usando partículas de borracha grossas, a diminuições da força de compressão e a de tração chegou até a 74%. Isto indica que os agregados de borracha graúdos afetam as propriedades do concreto com maior intensidade que os agregados de borracha finos. Os concretos com resíduos, comparados aos concretos convencionais, têm capacidade plástica mais elevada. Com adição da borracha, considerado como material elástico, o concreto torna-se ductil e apresenta o comportamento semelhante ao de uma estrutura elástica sob ação de carregamento. De acordo com o mesmo, estes concretos podem ser aplicados em construções sujeitadas a efeitos de impacto, tais como muros de contenção, pontes e estradas. Com a adição da borracha de pneu, o concreto apresenta um comportamento elástico, que segundo o autor, daria ao concreto maior resistência a impactos.

FATTUHI *et al*.(1996) verificaram que a adição do resíduo de borracha no concreto provoca uma redução de sua resistência à compressão. Segundo os autores, o decréscimo na resistência está relacionado à ação da borracha suportar pouco carregamento em relação aos outros componentes. Este fator

pode estar relacionado com o fato do módulo de elasticidade ser mais baixo que o do concreto convencional, ocasionando um acréscimo de deformação lateral o que leva a uma ruptura mais rápida. Os autores também relatam que geralmente, concretos contendo borracha fina (passando na peneira nº 4 - 4,8 mm e retido na peneira nº 20 abertura 0,8 mm) têm uma resistência à compressão maior do que a dos concretos contendo uma borracha grossa; este fato também foi observado por outros pesquisadores.

A fim de estudar a durabilidade do concreto com borracha RAGHAVAN *et al* (1998) pesquisaram a estabilidade química da borracha de pneu submetida a ambientes altamente alcalinos, como é o caso do concreto (pH $\cong$ 12,5). Para este estudo, a borracha foi submetida às soluções de NaOH (pH = 10), Ca(OH)2 (pH = 12,5), cimento (pH $\cong$ 13) e água (pH = 7) por um período de 4 meses. Nesse período foram realizados ensaios de perda de massa, resistência à tração, análise microestrutural e determinação da variação do pH das soluções com borracha de pneu em imersão. Dentre esses ensaios não foi verificado nenhuma grande variação das propriedades da borracha. No ensaio de variação do pH das soluções, foi observado que houve redução do pH com o aumento do tempo de imersão. De acordo com os autores esse fato pode ser atribuído à reação das hidroxilas com o dióxido de carbono da atmosfera, uma vez que uma solução teste, contendo somente NaOH, apresentou a mesma variação de pH.

RAGHAVAN (2000), em um outro estudo, avaliaram a trabalhabilidade e propriedades mecânicas de argamassa de cimento contendo borracha de pneus de automóveis e caminhões. Dois tipos de partículas de borracha foram usados. Como esperado, a adição de borracha diminuiu a resistência à flexão. Houve influência na forma das partículas de borracha, pois aquelas em forma de fibras tiveram maior resistência à flexão, quando comparadas com as borrachas em forma granular. Os autores constataram que as argamassas contendo resíduos de borracha apresentaram melhor trabalhabilidade que a argamassa sem adições. Constataram também, o aparecimento da propriedade de tenacidade nos corpos de prova, quando submetidos à flexão.

Algumas propriedades do concreto podem ser melhoradas utilizando-se a borracha, como por exemplo, a propagação de fissuras. Segundo ACCETTI e PINHEIRO, (2000) os resíduos de borracha atuam como

obstáculos ao desenvolvimento das fissuras. Ao interceptarem as microfissuras que surgem durante o endurecimento da pasta, elas impedem sua progressão e evitam o seu aparecimento prematuro. Na mistura endurecida, elas também limitam o comprimento e a abertura das fissuras.

Com a adição de resíduos de borracha na argamassa, segundo LIMA (2000), a isolação sonora foi melhorada comparada à argamassa convencional. Foram realizados estudos nos quais utilizou um pórtico de concreto para ensaios de portas e janelas. Segundo o autor, as placas produzidas com o compósito argamassa de cimento e borracha podem atingir níveis de atenuamento de 26 a 39 dB, sendo consideradas com capacidade de isolamento acústico.

LIMA (2000) realizou também ensaio de condutividade térmica, o qual consiste em duas placas: uma superior, quente, e outra inferior fria; no meio delas foi colocada a amostra de 30,5 cm x 30,5 cm x 3 cm, confeccionada com argamassa de cimento reforçada com resíduos de borracha vulcanizada. Segundo o autor, as placas apresentaram características de isolamento, com valores de condutibilidade térmica inferiores ao valor máximo permitido pela Norma C 208 – 95 ASTM, “Standard Specification for Cellulosic Fiber Insulating Board”.

Em outra pesquisa, SEGRE (1999) estudaram a adição dos resíduos residuais de pneus na composição da pasta de cimento. Em suas pesquisas a autora tratou as partículas com solução saturada de NaOH e observou que as resíduos de borracha melhoram a adesão na pasta de cimento, e a absorção de água. Foram, também, observadas algumas melhorias nas propriedades mecânicas da pasta, tais como a força de flexão e a energia de fratura.

Por sua vez, SEGRE e JOEKES (2000) definiram que as adições dos resíduos de pneus ao concreto devem ser realizadas com partículas de borracha com dimensão máxima de 16 mm, já que todos os resultados obtidos em seus trabalhos apresentaram decréscimo nas propriedades mecânicas da argamassa, após a adição de partículas de borracha vulcanizada como agregado, sendo mais negativas na substituição dos agregados graúdos.

BAUER (2001), trabalhando com resíduo de borracha de pneu em argamassa utilizou “aparas” de pneus sem aço, com dimensões compatíveis às

dos agregados miúdos e graúdos, que foram adicionadas em relação à massa do cimento, em porcentagem.

Os resultados obtidos no estado endurecido apresentaram queda de resistência à compressão simples nas argamassas com adições de aparas de pneus comparadas à argamassa convencional. Mesmo com esta queda de resistência, o resultado superou a resistência à compressão mínima exigida pela norma NBR-7171, para argamassa de assentamento de blocos cerâmicos de vedação sem função estrutural, que é de 1,0 MPa. Desta forma, mostrou-se a viabilidade do uso de argamassa com adição de aparas de pneus para painéis em argamassa para alvenaria, com adições de até 30% em relação à massa de cimento.

Estudou-se também a possibilidade de utilizar a borracha de pneu em argamassa para contrapiso (traço 1:4) e para regularização (traço 1:3), com adições de 15%, 30% e 40%, os quais apresentaram queda de resistência à compressão e diminuição da massa específica. Esta última, segundo BAUER (2001), pode ser vista de maneira positiva, pois a estrutura sofrerá menor carga permanente. Quanto à queda de resistência à compressão, esta não prejudica as finalidades de uso em obras como argamassa de contrapiso, regularização e material de enchimento em lajes, até os 40% de adição estudado. O mesmo não se recomenda para aplicações em locais de tráfego pesado.

A pesquisa realizada por BAUER (2001) demonstra que mesmo com perdas de resistência mecânica, a adição de aparas de pneu é viável tecnicamente para utilização no envelopamento de dutos em valas, onde a exigência de resistência é de 10,0 MPa, e na confecção de passeio público com resistência máxima exigida de 15,0 MPa. O autor é uns dos poucos que utilizam o resíduo de pneu com granulometria acima de 16 mm para a argamassa e para o concreto, pois entre os demais autores, a maioria trabalha com uma faixa granulométrica menor.

Em sua pesquisa, FIORITI (2002) estabeleceu composições de argamassa com a incorporação de resíduo de borracha para a confecção de blocos de alvenaria. Foram pesquisados alguns traços com a substituição parcial de areia média pelo resíduo de borracha, que variou de 15 a 35%, tanto na utilização para a confecção de blocos estruturais como para os de vedação. Os testes realizados comprovaram a possibilidade de se utilizar tal resíduo em substituição à areia,

atendendo aos requisitos estipulados pelas normas brasileiras. As vantagens são que além de apresentar massas inferiores as dos concretos convencionais, facilitando a execução, diminui o desgaste de equipamentos na sua fabricação.

A pesquisa que vem sendo realizada na FEIS/UNESP, desde 2000, apresentou os primeiros resultados das diversas composições de concreto com adição de resíduo de borracha provenientes da raspagem de pneus. O volume de resíduo utilizado foi de 15%, 20% e 25%, em substituição ao agregado miúdo, que em peso seria aproximadamente cerca de 50 a 70 kg de resíduos.

Segundo o estudo de AKASAKI *et al* (2002), os resultados obtidos com a substituição de 25%, em volume, do agregado miúdo pelo resíduo de borracha, apresentou elevadas dificuldades quanto a trabalhabilidade da mistura. Além disso, obteve-se baixa resistência a compressão. De acordo com os autores, esta pesquisa deve continuar com a investigação de outros parâmetros que merecem ser melhor avaliados, tais como a influência do tipo de cimento, em relação ao fogo, envelhecimento do concreto, entre outros.

RIBEIRO *et al* (2002) estudaram o comportamento do concreto com adição de borracha de pneus. Foi utilizado pneu picado com dimensões aproximadas a brita zero e pneu em fibras na proporção de 10% em volume seco. Na avaliação do módulo de deformação longitudinal e da resistência à compressão, para a realização dos ensaios, foram executadas três séries distintas, a fim de comparação:

Série 1 = 8 corpos de prova sem adição de borracha de pneus;

Série 2 = 8 corpos de prova confeccionados com 10% de borracha de pneus com graduação aproximada à brita zero;

Série 3 = 8 corpos de prova confeccionados com 10% de borracha de pneus em forma de fibras.

Todas as séries foram ensaiadas aos 7 e 28 dias de idade, sendo utilizados 4 corpos de prova para cada etapa. Nas três séries utilizaram o aditivo Mastermix 390N, sendo que na série 3 utilizaram também o Rheobuild 1000, para que fosse mantido o mesmo abatimento do tronco de cone.

Os autores verificaram um aumento de 48% no valor da deformação da Série 2 em relação à Série 1, e de 147%, quando comparadas as Séries 3 e 1.

Conclui-se que, mesmo com a perda de resistência devida à utilização da borracha, verificada nos corpos de prova das Séries 2 e 3, no concreto ao qual foi adicionado 10% da borracha picada, os valores obtidos para a resistência à compressão ficaram em patamares aceitáveis para utilização estrutural. Concluíram, ainda, que o concreto ao qual foi adicionado 10% de borracha em fibras, pode ser aplicado com vantagens, em elementos estruturais onde a resistência elevada não seja um fator essencial e onde o baixo peso específico ou a alta deformabilidade possam ser fatores colaborantes, como por exemplo, a confecção de placas para divisórias internas ou muros de divisa, bem como placas para pavimentação de praças ou escolas públicas.

A fim de se observar o efeito da incorporação de agregados de borracha na resistência à fissuração de argamassas, BONNET (2003) mostrou que a incorporação destes agregados usados em argamassa confere ao compósito um ganho na capacidade de deformação antes da ruptura e, em contrapartida, uma queda significante de resistência à compressão. Os resultados têm mostrado que o efeito benéfico da incorporação dos agregados de borracha é limitar a fragilidade do compósito. Graças ao impedimento da retração, pelo teste do anel, foi mostrado que a grande deformabilidade do compósito incorporado de agregados de borracha é dominante se comparado à sua grande sensibilidade à variação dimensional de retração. Isto resulta que o compósito incorporado de agregados de borracha tem uma maior resistência à fissura por retração que as argamassas conhecidas como tradicionais.

Este compósito é de interesse evidente em todas as aplicações onde a luta contra a fissuração devido à deformação é uma prioridade.

Com a pesquisa “O uso de pneus descartados em aterros reforçados”, MADUREIRA (2002) constatou que os pneus radiais, convenientemente amarrados, apresentam resistência semelhante aos melhores produtos geossintéticos utilizados como reforço de solos, atualmente disponíveis no mercado, além de reduzir o custo da obra. A Figura 5 ilustra o processo de preparação dos pneus.

Figura 5 – Execução de aterro com utilização de pneus (MADUREIRA 2002)

O autor recomenda a possibilidade de se utilizarem os reforços de pneus nos aterros de encontros de pontes, na proteção de taludes de córregos urbanos, na proteção de edificações construídas ao pé de encostas, na construção de aterros em terraços, entre outras.

Para a amarração dos pneus, o autor comparou diversos materiais, pois esta ligação é o ponto mais fraco da corrente que forma os reforços. As fitas de poliester, empregadas comercialmente na amarração de embalagens, mostraram melhor desempenho como ligação por serem resistentes, leves, apresentarem pequena deformação sob carregamento e serem muito fáceis de trabalhar.

A maior parte das pesquisas se deu na área da jazida de calcário da Companhia de Cimento Itambé. Na parte principal da pesquisa três aterros reforçados com pneus com dez metros de altura foram construídos. Com os aterros executados foi possível a determinação dos deslocamentos ao longo de quase 12 meses. De acordo com MADUREIRA, trabalhando em escala real podem-se utilizar as cargas reais que são esperadas em obras de construção de aterros.

Nos ensaios realizados verificou-se que as deformações medidas foram insignificantes, o que demonstrou a grande eficiência dos reforços de pneus na estabilização dos aterros. Além disso, foram executados ensaios de arrancamento de correntes de pneus. Desta maneira, o autor obteve parâmetros de resistência e deslocamento que podem servir de base para o projeto de aterros reforçados.

Os órgãos ambientais brasileiros não vêem com bons olhos o uso de pneus em obras de terraplenagem, pois acreditam que pode haver contaminação do lençol freático. No entanto, o autor destaca que pesquisas desenvolvidas no Canadá mostraram que o resíduo resultante da percolação de água pelos aterros reforçados com pneus é insignificante.

Uma outra utilização para a borracha de pneu foi investigada por PIERCE *et al* (2003) que estudou experimentalmente o uso de borracha triturada para produção de um fluido leve (flowable lightweight). Lascas de pneus e borracha triturada têm sido usadas com sucesso em uma série de aplicações na engenharia civil. Quando a borracha triturada é misturada em argamassa ou concreto, pesquisas têm mostrado que a massa específica e resistência à compressão decrescem com o aumento da quantidade de borracha, enquanto que a ductilidade aumenta. Esses resultados sugerem que a borracha triturada é um agregado ideal para fluido de preenchimento, sob outros aspectos, conhecido como material controlado de baixa resistência, por causa da redução na densidade do produto final e da resistência.

Quando analisado com outras fontes de agregados leves, o custo da borracha triturada tem uma comparação favorável. Em suma, a borracha triturada prova ser uma fonte alternativa de agregado de leve fluidez (flowable fill) tecnicamente benéfica, benigna ao ambiente e economicamente viável.

Baseado nos resultados experimentais realizados os autores chegaram às conclusões a seguir.

- Borracha triturada pode ser usada como substituição completa para a areia de concreto em fluido de preenchimento. As quantidades de borracha triturada consideradas altas (38% em peso, 57% em volume) podem ser misturadas em fluidos leves sem segregação notável da borracha, embora tenha sido medido escorrimento (bleeding) mensurável em alguns casos. Nenhum aditivo foi necessário para cobrir suas partículas.
- Para trabalhar efetivamente o fluido leve deve ter fluência e escorrimento no estado fluido. A fluidez pode ser razoavelmente alcançada quando se utiliza a borracha triturada, embora os níveis de escorrimento medidos sejam geralmente maiores que os limites aceitáveis para uso em campo. A

quantidade de borracha triturada pode ser otimizada para satisfazer os dois requisitos. A velocidade de mistura, o tempo de mistura, e conteúdo de “fly ash” também deveriam ser aumentados para ajudar a controlar a fluidez.

- Devido sua baixa massa específica, a borracha triturada pode ser adicionada ao fluido leve para produzir uma material de baixo peso. Com o aumento da quantidade de borracha triturada, a densidade volumétrica cai. Misturas de fluidos leves com borracha triturada produzem densidades volumétricas que são de 60 a 80% da densidade típica dos fluidos leves padrão misturados com areia. Um fluido de baixo peso produzido com borracha triturada fornece à indústria da construção um material que exerce menos tensão ao solo, atenuando assim a solicitação deste, especialmente quando os solos utilizados são do tipo fofos e compressíveis.
- A redução na densidade volumétrica pelo uso da borracha triturada não é desfavorável à resistência ao impacto do fluido leve de preenchimento. Este material mais leve é forte o suficiente para preencher os requisitos mínimos, mas não tão forte que não possa ser escavado no futuro. A faixa de resistência medida é bem próxima, comparada às alcançadas pelo material típico de fluido de preenchimento.
- A borracha triturada oferece outros benefícios quando usada em fluidos de preenchimento, tais como aumento de ductilidade e alto isolamento térmico.

Com o crescimento da utilização do concreto de alta resistência devido a sua maior dureza, menor permeabilidade e maior durabilidade que o concreto comum, OLIVARES *et al* (2004) realizaram um estudo da incorporação do resíduo de borracha neste tipo de concreto a fim de amenizar algumas de suas características como por exemplo a ruptura brusca.

O concreto de alta resistência tem maior tendência de desplacamento explosivo quando submetido a aquecimento rápido, como no caso do fogo. Este comportamento é devido principalmente a sua baixa permeabilidade que resulta em um acúmulo de pressão dentro da pasta de cimento.

Os ensaios de resistência ao fogo foram realizados segundo a EN-UNE 1363-1 (equivalente a ISSO 834) e os testes foram conduzidos até que o lado exposto ao fogo alcançasse 1000°C. As amostras sem borracha apresentaram

desplacamento no lado exposto e curvatura bem acentuada, mas as amostras com borracha não apresentaram desplacamento e uma curvatura menor com o aumento da quantidade de borracha.

Ensaios termogravimétricos mostraram que o aumento da borracha diminui a temperatura alcançada a uma certa distância da superfície exposta, diminuindo o cobrimento da armadura.

Foi observado também pelos autores que o concreto com borracha diminui a resistência à compressão e a dureza. Segundo OLIVARES, isto pode ser proveitoso quando é requerida maior ductilidade do material mantendo alta resistência.

Ensaios de resistência ao fogo mostraram uma redução de desplacamento explosivo em concreto utilizando borracha, comparado ao concreto convencional. A profundidade de dano (à 500°C) foi diminuída em concreto com borracha. Com isso a utilização da borracha em concreto pode obter uma diminuição do cobrimento da armadura ou maior segurança em elementos estruturais contra o fogo.

RAFAT *et al* (2004) fez um apanhado geral das pesquisas realizadas nos Estados Unidos para utilização da borracha do pneu na construção civil e observou que, quando se incorpora a borracha no concreto, há uma diminuição da resistência à compressão e das características mecânicas do concreto. Este comportamento foi observado por todos os pesquisadores que estudam esta incorporação. Foram observadas também algumas características desejáveis, tais como densidade mais baixa, resistência mais elevada ao impacto, ductibilidade, realçando ainda uma melhor isolação acústica e térmica.

Em outra pesquisa realizada por BENAZZOUK *et al* (2004) foi avaliado o comportamento do concreto com borracha quando colocado em contato com a água. Foram realizados estudos de absorção de água; por capilaridade, em concreto com incorporação da borracha. Foi observado que a presença das partículas de borracha diminui a absorção da água, da mesma forma, a permeabilidade do ar foi consideravelmente reduzida. Estes resultados demonstram que a borracha colabora para a durabilidade do concreto em ambientes agressivos.

Já NABIL *et al* (2004) utilizou a cinza da borracha de pneu (TRA) a partir da queima de pedaços que ficaram em um forno com temperatura controlada de 850º C por 72 horas. Este material foi resfriado ao tempo e utilizado em substituição ao agregado miúdo para a composição de argamassas. Vale ressaltar que o diâmetro máximo das partículas utilizadas foi de 150 μm. Para a dosagem dos traços foram utilizadas as respectivas porcentagens: 2,5; 5 ; 7,5 e 10% em substituição à areia em peso. A relação água /cimento foi mantida de 0,65. As propriedades investigadas incluem quantidade de ar, tempo de pega , resistência à compressão e flexão, dano ao gelo e degelo, e penetração de íons cloreto. Realizou-se um analise química da cinza de borracha a fim de se verificar suas propriedades, que estão ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1- Análise química da cinza de borracha e do cimento do tipo I usados no estudo

Componentes	Cinza de Borracha (%)	Cimento Utilizado (%)
SiO_2	26,5	21,2
Al_2O_3	8,7	5,5
Fe_2O_3	9,3	3,1
CaO	12,9	63,7
MgO	6.4	1.5
SO_3	1.6	2.63
Na_2O	1.4	0.14
K_2O	1,1	0,71
TiO_2	1,0	-
CL	0.1	-
Zn	20,2	-

Podemos observar que algumas propriedades químicas são parecidas com a do cimento utilizado.Com os resultados dos ensaios realizados os autores chegaram as conclusões a seguir.

- A TRA poderia ser usada como substituição parcial da areia em misturas de argamassa.
- A quantidade de ar das argamassas com TRA diminuíram com o aumento da quantidade de TRA. A quantidade de ar diminuiu de 2,6% da argamassa controle para 1,5% da argamassa contendo 10% de TRA.

- O início e fim de pega da pasta de TRA aumentaram com o aumento da quantidade de TRA. O tempo inicial de pega aumentou de 145 min da pasta controle para 220 min para a pasta contendo 10% de TRA. O tempo final de pega aumentou de 270 min da a pasta controle para 390 min na pasta contendo 10% de TRA.
- A resistência à compressão das amostras de argamassa aumentou com o aumento dos níveis de substituição de TRA para todos os períodos de cura testados (1, 7, 28 e 90 dias). O aumento da resistência à compressão, para cada nível de TRA, foi maior para as menores idades que para as maiores idades.
- A resistência à flexão da argamassa com TRA aumentou com o aumento do nível e substituição de TRA.
- As argamassas contendo 5% e 10% de TRA mostraram maior resistência ao dano de gelo-degelo e penetração de íons cloreto, que a argamassa controle.

Os trabalhos existentes até o momento sobre o uso do resíduo de borracha na construção civil, mostraram a viabilidade de utilizar a borracha como parte do agregado graúdo ou miúdo, na argamassa de assentamento como: contra-piso, blocos de concreto, pavimentações, painéis de alvenaria e outros.

A viabilidade da utilização dos resíduos de borracha acima citada e a importância do estudo da aderência para o concreto armado conduziram a realização desta pesquisa, onde se propõe avaliar o comportamento da aderência aço-concreto com utilização de resíduos de borracha em substituição parcial do agregado miúdo, a fim de verificar a viabilidade desse tipo de concreto para fins estruturais.

II ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A razão da existência do concreto armado fundamenta-se no trabalho conjunto do concreto e do aço. Esse trabalho só é possível devido à aderência entre os dois materiais. A ação solidária entre a armadura e o concreto é a principal causa do bom desempenho estático do concreto armado.

A aderência assegura a igualdade de deformações específicas da armadura e do concreto que as envolve, quando sob a ação de cargas. O seu comportamento tem importância decisiva com relação à capacidade de cargas das estruturas de concreto armado.

As tensões originárias das solicitações atuantes na superfície de contato aço-concreto são denominadas tensões de aderência, as quais podem ser estimadas a partir de expressões de cálculo propostas por Normas provenientes de ensaios executados ou de modelos matemáticos.

A aderência é avaliada pela relação entre a tensão de cisalhamento no concreto circunvizinho à armadura e o deslocamento relativo entre os dois materiais, provocado pela diferença entre as deformações especificas de cada um deles.

DUCATTI (1993) descreve a aderência como uma tensão de cisalhamento entre a superfície de uma barra de armadura e o concreto que a envolve.

Alguns autores costumam chamar de aderência à ligação existente entre o aço e o concreto que impede ou reduz o deslizamento entre eles. O deslizamento, no início do carregamento, é causado em parte pela deformação elástica do

concreto; entretanto, para cargas mais altas, ele é causado pelo esmagamento do concreto em frente às nervuras.

Nas barras sem nervuras classificadas como barras lisas ocorre ruptura por arrancamento e a aderência ocorre principalmente devida à adesão química entre a pasta de cimento e a barra. Quando a adesão química é rompida surge uma resistência aos deslizamentos devido ao atrito. Quando esta resistência se torna esgotada, o fendilhamento não é generalizado, mas a barra é arrancada deixando atrás de si um orifício quase intacto dentro do concreto (Figura 6).

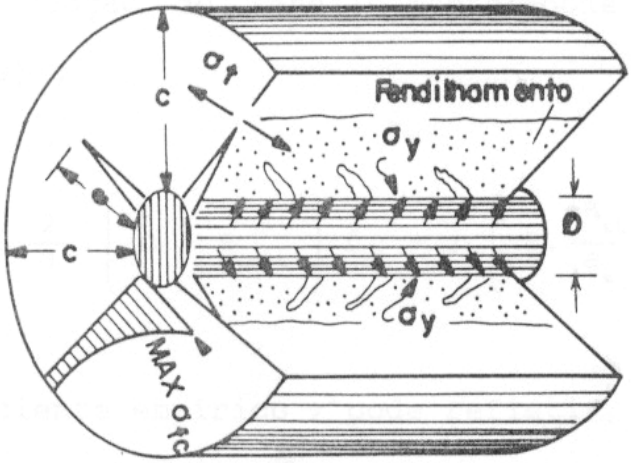


Figura 6. Diagrama esquemático da deformação do concreto ao redor da barra após a formação das fissuras internas causadas por tensões principais de tração, conforme GOTO (1971).

Nas barras nervuradas, criadas para desenvolver maior aderência do que as lisas, o fenômeno da aderência tem natureza fundamentalmente diferente. Embora nessas barras se desenvolvam também a adesão e o atrito, a resistência aos deslizamentos se deve principalmente à resistência que o concreto oferece às pressões que sobre ele são exercidas pelas nervuras, ou seja, nas barras nervuradas a aderência depende principalmente da ação mecânica entre o concreto e as nervuras. O efeito da adesão química é pequeno e o atrito não ocorre até que haja escorregamento entre a barra e o concreto.

Segundo DUCATTI (1993) a grande diferença, comparando com o caso das barras lisas, descrito acima, é que a engrenagem com as nervuras não pode ser perdida. Conseqüentemente, somente um fendilhamento generalizado pode pôr um fim a este estágio de aderência.

De acordo com VIEIRA (1994) a ruptura da aderência nas barras nervuradas pode ocorrer:

- pelo esmagamento do concreto junto aos flancos das nervuras;

- pelo corte do concreto em torno da barra ou entre nervuras;

- pelo fendilhamento longitudinal do concreto de recobrimento ao longo da barra;

- pela combinação destes três modos de ruptura.

A tensão de aderência causa tensões principais de tração e compressão no concreto cujas trajetórias estão ilustrados na Figura 7

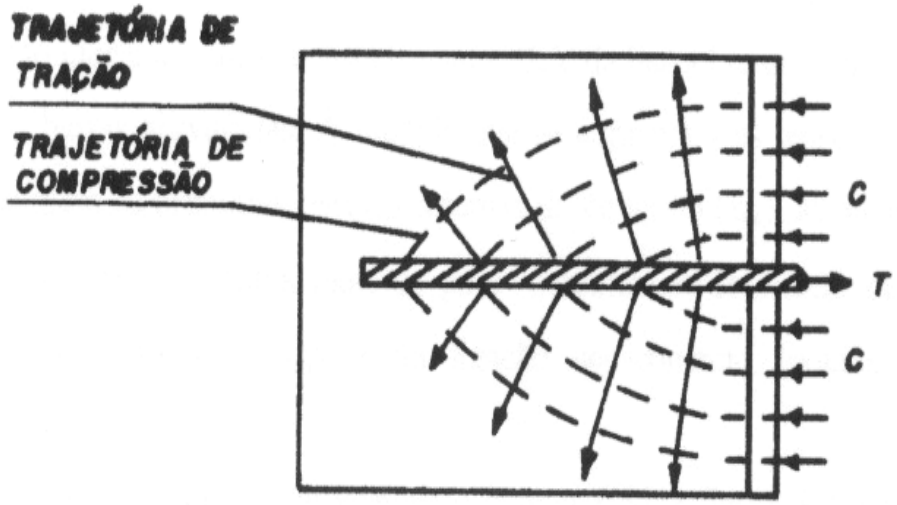


Figura 7. Desenvolvimento das trajetórias das tensões principais junto a uma barra de armadura. (LEONHARDT, 1979)

Na compressão e na tração antes da fissuração, a armadura e o concreto a ela circunvizinho possuem deformações iguais. Tão logo haja fissuração no concreto, essas deformações, na proximidade das fissuras, passam a ser diferentes, a armadura alonga mais que o concreto. A diferença de alongamento dos materiais implica a existência do deslizamento da armadura

em relação ao concreto. No primeiro caso em que há igualdade de deformações, tem-se a chamada aderência rígida, pois não há deslizamentos; no segundo caso que os alongamentos diferem entre si esta aderência é chamada deslizante ou móvel.

O estudo da aderência deslizante entre as barras de armadura e o concreto que as envolve está, portanto, intimamente relacionado com a fissuração. Sobre isso existem na literatura diversos temas com diferenças de abordagem. Podem-se distinguir duas formas de tratamento do problema. Na primeira, de acordo com pesquisadores canadenses e norte americanos COLLINS e MITCHELL(1986) e HSU e BELARBI(1994), entre outros, não se faz uma consideração direta da lei de tensão de aderência em função do deslizamento, mas antes estabelecem leis constitutivas do aço em termos de deformações médias. Na deformação média do concreto, igual à da armadura, inclui o seu efetivo alongamento e as aberturas desta transformadas em deformação, dividindo as distâncias entre as fissuras, as quais são assim espalhadas ao longo da peça fissurada. Novamente transformam o descontínuo em um contínuo equivalente. Na segunda forma, o problema é tratado por meio de definição de uma lei de tensão de aderência em função do deslizamento. Desta ocorre como uma simplificação da lei tensão de armadura na fissura, associada a sua deformação média. Em qualquer uma desta formas de tratamento do problema fica considerado o chamado efeito de enrijecimento das barras de armadura de aço na tração (tension stffening), em contraposição da barra nua. Este fenômeno precisa ser considerado na determinação das deformações dos elementos estruturais não só antes como após o escoamento do aço.

O interesse em se conhecer o complexo mecanismo da aderência entre o aço e o concreto nas estruturas, vem, a partir da década de 40, crescendo substancialmente. Através de análises teóricas e/ou ensaios práticos, pesquisadores têm tido como interesse a explicação desse fenômeno para que, conceituada de forma mais realista, permita o desenvolvimento de métodos e modelos que serão aplicados na análise comportamental e no cálculo de estruturas. A seguir temos alguns dos principais estudos do fenômeno da aderência obtidos na literatura.

WATSTEIN (1941) analisou a distribuição da tensão de aderência, ao longo de barras de aço, a partir do ensaio de arrancamento (pull-out test). Com o auxílio de extensômetros mecânicos, mediu o alongamento e a tensão na barra da parte encravada no cilindro de concreto e observou uma maior concentração de tensão na região próxima ao apoio do bloco de concreto. O autor observou um comportamento linear da barra quando submetida a uma carga constante.

REHM (1961) estudou a influência da posição das barras durante a concretagem na aderência. Segundo ele, tratando-se das barras verticais, o desempenho da aderência é muito melhor quando a carga é aplicada em direção contrária àquela da sedimentação do concreto. Na situação inversa, isto é, carga aplicada na mesma direção do lançamento do concreto, a aderência pode registrar valores mais pobres ainda do que em caso das barras horizontais no topo da formas. A explicação para isto, de acordo com o autor, está no acúmulo de argamassa porosa na metade inferior das primeiras e embaixo das nervuras das outras.

Em 1967, NGO utilizou o método dos elementos finitos para a construção de um modelo numérico e para estudar o comportamento de vigas de concreto armado, considerando os efeitos das tensões de aderência. Para a representação da rigidez da aderência entre as barras de aço e o concreto, foi desenvolvido e apresentado um elemento finito de ligação adimensional (bond link), colocado entre os elementos finitos que representam o concreto e os elementos finitos que representam as barras de aço, com isso o autor conseguiu reproduzir numericamente o comportamento da vigas de concreto.

NILSON (1968), utilizando o método dos elementos finitos e o elemento de ligação apresentado por NGO (1967), desenvolveu modelos analíticos de representação de amostras de concreto armado submetidas a ensaio de arrancamento excêntrico. A rigidez dos elementos de ligação, utilizada nos cálculos, foi obtida a partir do desenvolvimento de uma função polinomial de terceiro grau que relaciona a tensão de aderência com o deslizamento entre a barra de aço e o concreto. Para o desenvolvimento dessa equação foram utilizados os resultados experimentais obtidos por BRESLER (1968).

BRESLER *et al* (1968), que por sua vez, investigou experimentalmente a contribuição da história do carregamento e do meio ambiente na deterioração de estruturas de concreto armado, a partir de ensaios de arrancamento submetidos a ciclos de carregamento e descarregamento. Este estudo foi baseado no efeito acumulativo de diversos danos: fissuração, redução da rigidez etc, sendo verificadas as suas influências na transferência de tensão entre o aço e o concreto.

Um dos trabalhos que tiveram destaque pela colaboração para outras pesquisas foi efetuado por TASSIOS (1979), que estudou as propriedades da aderência entre concreto-aço. Os resultados por ele alcançados são descritos no decorrer deste trabalho.

Utilizando o método de ensaio da ASTM C 234 e trabalhando com concreto com sílica, BURGE (1982) apresenta a curva de aderência de concreto com um dia na Figura 8, onde se nota variação linear da tensão de aderência com a substituição do cimento por sílica. Segundo o autor, que mediu a porosidade em pastas de cimento e sílica, a aderência à armadura aumenta numa razão similar à diminuição da porosidade.

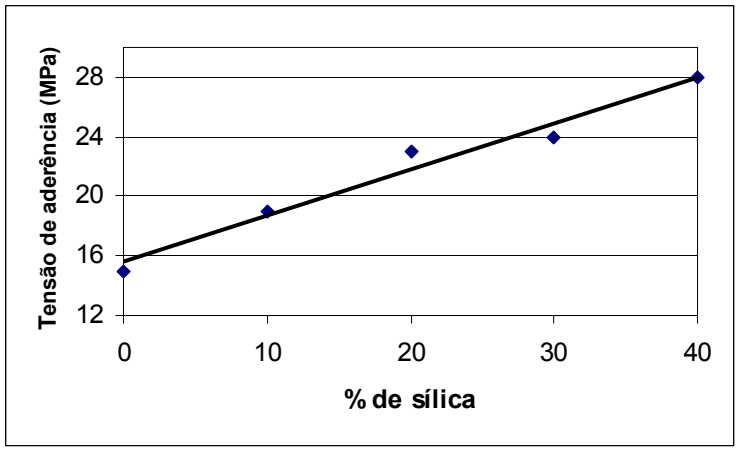


Figura 8- Influência do teor de sílica na tensão de aderência BURGE (1982)

RIBEIRO (1985) realizou uma análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas. Os ensaios realizados foram do tipo pull-out e do tipo extremo de viga; as variáveis foram o diâmetro da barra, a

qualidade do concreto, o recobrimento e a percentagem de estribos. Após a análise dos resultados, o autor chegou às seguintes conclusões:

- ao se aumentar o recobrimento, a resistência última de aderência também aumenta;
- quando se aumenta a quantidade de estribos, percebe-se um aumento na resistência de ancoragem e a presença de estribos altera também o modo de ruptura, menos brusca quando comparada aos CPs sem estribos;
- aumentando-se a qualidade do concreto, obtém-se um acréscimo na resistência última de aderência.

LORRAIN e KHÉLAFI (1988) procuraram investigar a influência na aderência devido à idade do concreto, à dosagem de sílica, à relação água/aglomerante, á rugosidade do aço e ao concreto de alta resistência. Com os resultados obtidos foi possível chegar às seguintes conclusões:

- a resistência última de ligação por aderência esta diretamente correlacionada a resistência mecânica do concreto;
- a resistência à aparição e à propagação da ruína da ligação por aderência resulta não somente da resistência mecânica, mas também da microestrutura do concreto circundante;
- sobre este último ponto, os efeitos da dosagem de aglomerante, da relação água/cimento, do comprimento de ancoragem, da rugosidade da superfície da barra são sistematicamente benéficos, enquanto a influência da dosagem de sílica não deu lugar a interpretação nem a conclusão satisfatórias.

DUCATTI (1993) analisou o concreto de elevado desempenho, avaliando o comportamento da aderência com a armadura para este tipo de concreto. Foram realizados diversos ensaios comparando o concreto de elevado desempenho com o convencional. Examinou também as influências de diversos parâmetros na aderência. Alguns de seus resultados apresentaremos ao longo deste capítulo.

ROSA (1994) apresentou uma análise comparativa das várias curvas de aderência x deslizamento entre o aço e o concreto, proposta na literatura, quando

aplicadas ao método dos elementos finitos. Foi analisado o desempenho quanto ao tempo de processamento, número de interações necessárias, facilidade de utilização e precisão dos resultados obtidos quando comparados com os resultados de ensaio.

VIEIRA (1994) realizou um estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de sílica. O ensaio escolhido pela autora foi o tipo “pull-out-test”, sendo que o objetivo de seu trabalho não foi a quantificação exata dos valores de tensões de aderência, mas sim a obtenção de resultados de tensões de aderência que possam ser comparados entre si e analisados, possibilitando concluir sobre a influência da sílica na aderência aço-concreto. Com os resultados dos ensaios, a autora concluiu que a adição de sílica melhora em até 20% o comportamento de aderência de barras nervuradas. No caso das barras lisas, segundo a autora, o efeito da sílica depende do fator água/cimento. Para um fator água/cimento baixo o efeito da sílica é pequeno; mas para um fator a/c alto, a adição de sílica pode prejudicar a resistência à aderência.

YANKELEVSKY (1997) apresentou o desenvolvimento de elemento finito bidimensional, que representa o comportamento da interface entre o aço e o concreto, para estruturas submetidas a ensaio de tração. A rigidez dos elementos incorpora parâmetros do aço, do concreto e da relação entre a tensão de aderência x deslizamento.

Na mesma linha numérica, DESIR (1998) propôs um modelo para simular o comportamento do fenômeno da aderência entre o aço e o concreto, utilizando leis constitutivas baseadas nos conceitos da termodinâmica clássica, a qual considera a interface como sendo uma superfície de descontinuidade. Este modelo numérico foi incorporado na formulação de um elemento finito que representa tanto o aço quanto o concreto, onde cada material tem um comportamento próprio definido por uma lei constitutiva separada.

BARBOSA (1998) realizou um estudo experimental sobre estruturas de concreto de elevado desempenho armadas com aços de elevado limite elástico, visando quantificar a influência de alguns parâmetros sobre a relação tensão de aderência e deslizamentos, dentre eles a posição das barras tendo em vista o

lançamento do concreto. Dos resultados obtidos desse estudo a autora pôde concluir que:

- a resistência de aderência é menos sensível ao posicionamento da barra, que no caso do concreto convencional;
- existe uma baixa variação da tensão de aderência devida à posição da barra, podendo-se simplificar certos procedimentos regulamentares que justificam a segurança da ligação armadura – concreto;
- o uso de estribos pode influenciar na força de arrancamento da barra vertical.

SPACONE (2000) discutiu a importância da modelagem da aderência e do deslizamento no comportamento de estruturas de concreto armado sob carregamento estático e dinâmico, apresentando formulações para implementação em modelos de elementos finitos, considerando os fenômenos aderência e deslizamento na análise dessas estruturas.

NETO *et al* (2001) analisaram o deslizamento entre o aço e o concreto onde fizeram uma modelagem de vigas submetidas à flexão, realizando ensaios experimentais. Nas suas pesquisas, foram estudados aspectos da interação entre o aço e o concreto, para estruturas de concreto armado, com particular interesse no mecanismo de deslizamento que ocorre na interface entre esses dois materiais. Foi desenvolvida uma modelagem computacional (programa computacional), a qual considera o comportamento aderência-deslizamento entre a armadura de aço e o concreto, para a análise de viga simétrica submetida à flexão. O método do elemento finito é utilizado para prever o comportamento de estruturas de concreto armado baseado nas propriedades do concreto, da armadura de aço, e na relação da interface aço-concreto. A aderência é modelada com elemento de interface (*bond-zone element*) conectando os elementos de aço e de concreto. O elemento de interface apresentado por GROOT *et al* (1981) tem sua rigidez baseada nos estágios da relação entre a tensão de aderência local e o deslizamento relativo da barra, para um processo incremental de carregamento.

Os resultados apresentados pelos autores mostraram-se de grande confiabilidade e coerência com os resultados apresentados por NGO *et al* (1967), que utiliza elementos de ligação para a modelagem da interface entre o aço e o concreto.

Em outra pesquisa realizada por FERNANDES (2000) foi investigada experimentalmente a aderência aço-concreto sob ações repetidas. Para a autora, uma forma clássica de se analisar o efeito das ações cíclicas é através do estudo da fadiga. Entretanto, nos últimos anos, tem surgido uma nova abordagem para o problema, mediante o estudo da degradação da ligação aço-concreto. A autora utilizou o modelo do ensaio de arrancamento (*Pull-Out Test*) padronizado pela RILEM-FIP-CEB, onde foram analisadas as influências de alguns parâmetros na interface aço-concreto, como: diâmetro da armadura nervurada, tipo e amplitude de carregamento. Os resultados dos ensaios monotônicos foram comparados com as recomendações do CEB-FIP MC 1990, EUROCODE 2 e NB-1/78. A resistência da ligação dos modelos submetidos a ações repetidas foi comparada com os valores monotônicos de referência. A ruína experimental da ligação ocorreu no corte do concreto entre as nervuras. A resistência monotônica experimental da ligação ficou compreendida entre condições boas e ruins de aderência. Os resultados calculados de acordo com normas foram muito diferentes em relação aos valores experimentais e apresentaram uma dispersão muito grande. Em relação à força repetida, a degradação da aderência ocorreu pelo crescimento progressivo dos deslizamentos.

Todos os modelos ensaiados apresentaram o corte do concreto entre as nervuras, ocasionando a ruptura por arrancamento perfeito da armadura, típica de concreto confinado.

Em relação ao carregamento repetido, observou-se que a resistência por adesão foi ultrapassada logo no primeiro ciclo, por causa do valor muito maior da força máxima.

TAVARES (2000) estudaram os fatores que influenciam no mecanismo da aderência das natas de cimento. Embora se tenha conhecimento de vários ensaios realizados em cordoalhas com nata de cimento datados da década de 50 e 60 (REHM 1961, MARTIN 1967), poucos são os trabalhos realizados nas

últimas duas décadas (TROST et al, 1980, WEBER, 1982), tornando assim interessante o estudo realizado pelos autores.

Em uma primeira fase da pesquisa foram feitos ensaios de “pull-out” em cordoalhas aderentes de 12,7mm e 15,2mm de diâmetro injetadas com nata de cimento. O objetivo principal foi a determinação da curva de aderência x deslizamento, o valor da tensão média e máxima de aderência para diferentes posições da cordoalha dentro da bainha e para diferentes resistências de nata.

Os autores mostram a influência do diâmetro na resistência à aderência, tanto sobre blocos centrados (BC), quanto sobre os blocos excêntricos (BEX) ilustrados na Figura 9. Estes resultados vêm confirmar os resultados anteriores encontrados na literatura onde REHM (1966) afirma que o comportamento de aderência dos cabos com protensão posterior varia, se for alterado o diâmetro da barra, mesmo que todas as outras relações permaneçam constantes.

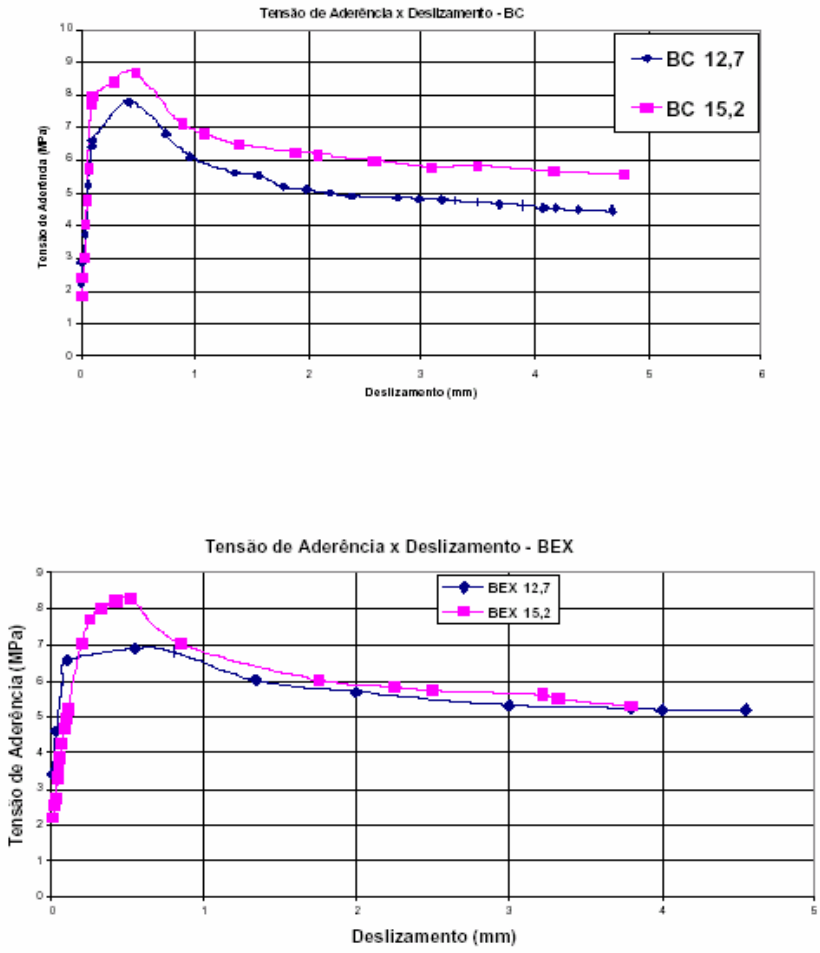


Figura 9 – Gráfico Deslizamento x Tensão de aderência

A posição da cordoalha de acordo com os autores parece ter influência na resistência a aderência para o diâmetro de 12,7. Este resultado, entretanto não foi mostrado na cordoalha de 15,2mm.

BARBOSA (2002) realizou uma avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência para barras de fabricação nacional de seção circular com sete diâmetros distintos (6,3, 8,0, 10,0, 12,5, 16,0, 20,0 e 25,0 mm) e barras de seção quadrada com três tamanhos de lado (6,3, 8,0 e 10,0 mm). Foram empregados, nesse estudo, concretos de cinco classes de resistência à compressão (20, 40, 60, 80 e 100 MPa). Realizaram-se dois tipos de ensaio de aderência: ensaio de tirantes (tração simétrica) e ensaio de arrancamento ("pull-out- test"), para cada dimensão de barra e para cada classe de resistência do concreto. Com a realização destes ensaios a autora chegou às seguintes conclusões:

- à medida que aumenta a resistência do concreto, a tensão de aderência também aumenta. Além disso, a presença de sílica no traço do concreto aumenta a resistência de aderência, visto que há uma redução da porosidade da zona de transição entre o concreto e a armadura;
- à medida que aumenta o diâmetro da barra, a tensão de aderência aumenta. Constatou-se que a aderência das barras de seção quadrada possuem um comportamento similar à de seção circular, apesar de possuírem uma tensão de aderência (média e máxima) ligeiramente inferior;
- o ensaio de arrancamento superestima os valores da tensão de aderência, quando comparado aos resultados obtidos no ensaio de tirantes;
- os modelos teóricos propostos ao estudo da aderência aço-concreto, de maneira geral, não são adequados aos materiais brasileiros. Observou-se que nenhum deles consegue, ao mesmo tempo e com exatidão, considerar todos os fatores que influenciam o comportamento da aderência, ocasionando uma deficiência nesses modelos.

Foi realizado pela autora um tratamento estatístico dos resultados obtidos, e algumas comparações que serão apresentadas no decorrer deste trabalho.

KAYALI *et al* (2003) estudaram a aderência aço-concreto utilizando aços galvanizados com nervuras. O propósito de se utilizarem aços com proteção galvanizada seria evitar ou diminuir o ataque que provoca a corrosão do aço. Os ensaios realizados aos 28 dias seguiram a ASTM A994. Os autores concluíram que a galvanização do aço implica uma redução em torno de 20% na tensão de aderência comparados ao aço sem tratamento (aço preto). Isso pode ter ocorrido, de acordo com os autores, pela perda da aderência química, possíveis da evolução do gás de hidrogênio, resultando da reação entre o zinco e o concreto fresco.

2.2 TIPOS DE ADERÊNCIA

A solidarização da armadura ao concreto é garantida pela existência de aderência entre os dois materiais. A aderência é composta por várias parcelas, as quais decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação do concreto com o aço.

De acordo com FUSCO (1995) existem três tipos possíveis de aderência.

a) Aderência por adesão

A aderência por adesão é estabelecida pela ligação físico-química que se estabelece na interface aço-concreto durante as reações de pega do cimento. A aderência depende da limpeza da superfície e da rugosidade das barras, o que não é suficiente para uma boa aderência, pois é destruída no caso de pequenos deslocamentos da barra. A Figura 10 ilustra as condições de rugosidade da barra lisa.

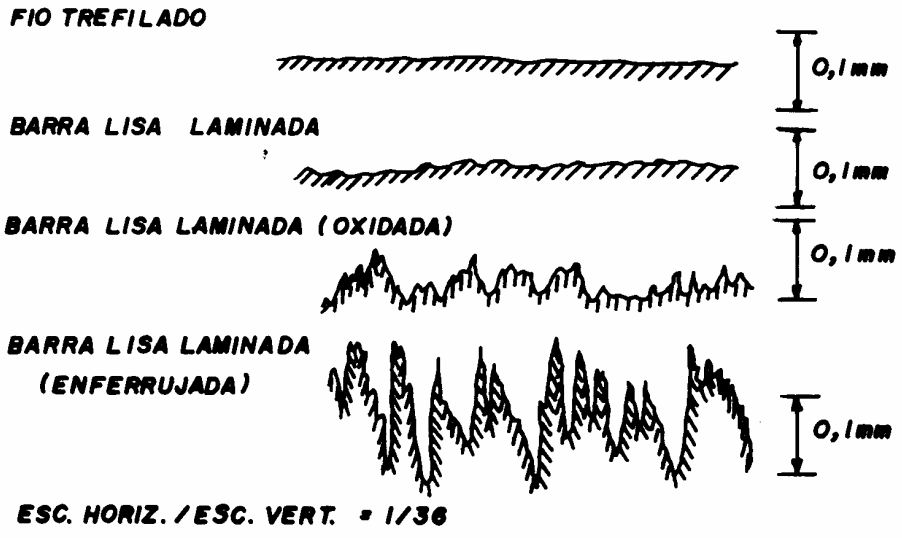


Figura 10 – Acabamento superficial de fios e barras lisas FUSCO (1995)

b) Aderência por atrito

É a aderência devida a forças de atrito existentes entre o concreto e o aço, desde que existam pressões transversais às armaduras. A aderência por atrito depende do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, o qual é função do estado superficial da barra.

c) Aderência mecânica

É a interação mecânica entre o aço e concreto, decorrente da presença de saliências na superfície da barra (nervuras laminadas, estrias). Este tipo de ligação depende da forma, altura, inclinação das nervuras e da distância entre elas. Através de intertravamento mecânico, do tipo de encaixe entre o concreto e as nervuras das barras de aço, formam-se "consoles de concreto" que são solicitados ao corte e à compressão antes que a barra possa deslizar no concreto, conforme ilustrado na Figura 11. A aderência mecânica é o tipo de ligação mais confiável, pois contribui de maneira fundamental para a solidarização dos dois materiais e possibilita melhor aproveitamento das resistências mais elevadas do aço.

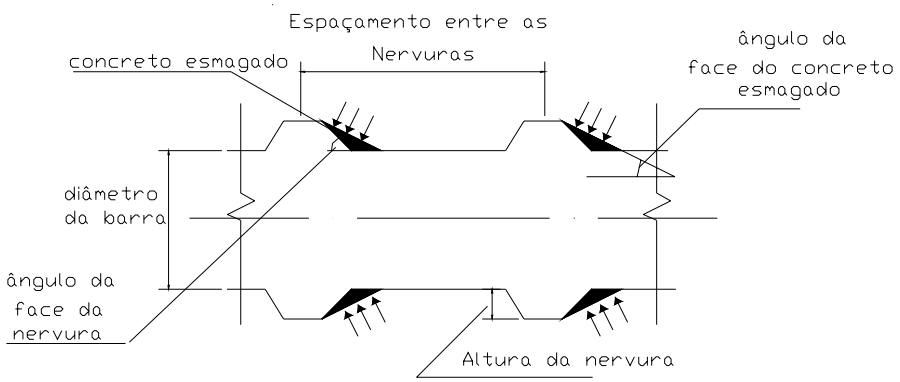


Figura 11 – Geometria de uma barra nervurada e a interação mecânica entre a barra e o concreto TEPFERS (1979)

Segundo FUSCO (1995), o efeito da aderência mecânica também está presente nas barras sem nervuras chamadas barras lisas, em virtude das irregularidades da superfície inerentes ao processo de laminação. Entretanto, nestas, a aderência mecânica e por atrito se confundem.

De acordo com o mesmo, não é possível determinar cada parcela de aderência isoladamente, e a separação da aderência em três parcelas é simplesmente esquemática. Além disso, a aderência do aço ao concreto é fortemente influenciada pela retração, pela deformação lenta e pela fissuração do concreto.

2.3 PARÂMETROS QUE INFLUEM NA ADERÊNCIA

A tensão de aderência pode ser definida como sendo a relação entre a força atuante na barra e a superfície da barra aderente ao concreto. Porém, existem vários fatores que podem intervir na sua quantificação e influenciar o comportamento da aderência. Seguem abaixo alguns fatores que devem ser levados em consideração no dimensionamento e análise, indicando com que magnitude eles agem sobre a aderência.

2.3.1 Composição do Concreto

São poucos os pesquisadores que apresentam estudos sobre a influência do traço do concreto na aderência. Como regra geral poderia ser estabelecido que qualquer alteração no traço que não altere a resistência à compressão nem a resistência à tração do concreto, também não alterará seu comportamento na aderência.

Em confronto com essa regra MAULINE e ASTROVA (1965), citado por RIBEIRO (1985), verificou que o melhor comportamento na aderência acontece quando se diminui a relação água cimento e a quantidade de agregado miúdo; portanto, quando se aumenta a quantidade de agregado graúdo.

Este fato foi verificado também por MARTIN e NOAKOWSKI (1981). Os autores notaram que com a utilização de agregados de diâmetro maior e pequena quantidade de água observa-se um definido acréscimo no comportamento de aderência. Uma explicação para estas observações seria que em misturas com agregados muito finos, as partículas finas e também a água acumulam-se nas circunvizinhanças da barra.

BRETTMANN, DARWIN e DONAHEY (1986) estudaram o efeito da presença de aditivos superplastificantes na resistência de aderência aço-concreto e concluíram que concretos com grande abatimento tiveram uma resistência de aderência mais baixa que os concretos com menor abatimento, com a mesma resistência à compressão, independentemente da presença do aditivo superplastificante.

2.3.2 Idade de Carga

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

CHAPMAN e SHAH (1987) citado por VIEIRA (1994) concluíram que nas barras nervuradas, a idade de carga influência de forma significativa as características de aderência; no entanto, o mesmo não ocorreu para as barras

lisas, pois com o aumento da resistência à compressão, a resistência de aderência permaneceu a mesma.

2.3.3 Resistência Mecânica do Concreto

A resistência mecânica do concreto é um dos fatores que influência de maneira mais significativa à resistência de aderência. De modo geral, quanto maior a resistência mecânica do concreto, maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface aço-concreto.

De acordo com MONTEIRO (1985), que realizou ensaios de aderência do tipo “Pull-Out-Test”, em corpos de prova com diferentes níveis de resistência, a resistência à compressão do concreto exerce um “papel principal” na resistência de aderência.

Os resultados de SOROUSHIAN *et al* (1991) indicam que a resistência de aderência é proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão. Outros autores, DUCATTI e AGOPYAN (1993), observaram comportamento similar e isso se deve ao fato de que a resistência de aderência, em muitos casos, é comandada pela resistência à tração, a qual é proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão, Figura 12.

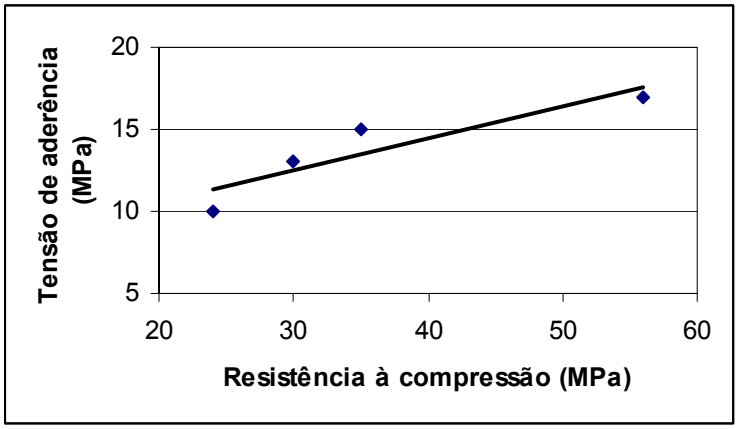


Figura 12 - Efeito da resistência à compressão do concreto na resistência da aderência, Ø=25mm SOROUSHIAN *et al* (1991)

VIEIRA (1994) afirma que a resistência à tração do concreto é o fator principal que condiciona a resistência de aderência quando a ruptura ocorre por

fendilhamento. No entanto, no caso em que ocorre ruptura por arrancamento, o fator determinante é a resistência de compressão do concreto.

BARBOSA (1998) evidencia o aumento da resistência da ligação de aderência com o aumento da resistência do concreto que envolve a armadura. De acordo com o autor, nota-se apenas diferença somente sobre as leis de variação da tensão tangencial média última em função de f_c ou de $f_c^{1/2}$.

De acordo com BARBOSA (2002), a presença de sílica aumenta a resistência à compressão e de aderência do concreto. Esse aumento na resistência da aderência é atribuído à densificação e à diminuição da espessura da zona de transição entre o concreto e a barra de aço.

A Figura 13 mostra a influência da resistência à compressão do concreto na tensão de aderência máxima ($\tau_{máx}$) obtida em ensaio da ASTM C-234. Segundo DUCATTI (1993), as curvas obtidas em seu estudo para tensão de aderência ($\tau_{máx}$) em função da resistência à compressão demonstram que a resistência última da aderência aumenta quase proporcionalmente com a raiz quadrada da resistência à compressão do concreto.

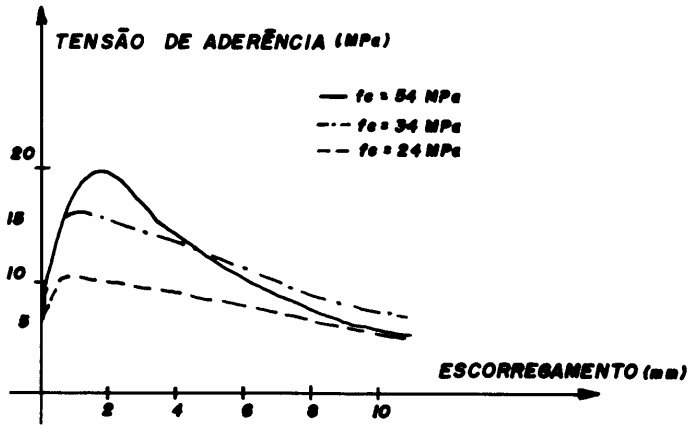


Figura 13 - Efeito da resistência à compressão na relação da tensão de aderênciaxescorregamento para barras nervuradas (SOROUSHIAN *et al*. (1991)).

2.3.4 Diâmetro da Barra

Diversas pesquisas experimentais foram realizadas para analisar a influência do diâmetro da barra no comportamento da aderência. De acordo com

RIBEIRO (1985) e ROBISON (1963), o diâmetro da barra não tem influência no comportamento da aderência.

O código com o ACI comittee 408 considera a tensão de aderência independente do diâmetro da barra, sendo esta uma variável de menor importância, desde que o recobrimento e o comprimento de ancoragem sejam proporcionais ao diâmetro da barra.

RIBEIRO (1985) realizou uma interpretação dos resultados dos testes tipo "Pull-Out-Test" e "Beam Test", realizados por SORETZ (1972) e BONY, CLAUDE e SORETZ (1973), e observou que não existem diferenças significativas entre os valores de tensão de aderência desenvolvidas por diferentes diâmetros de barra.

No entanto, DUCATTI (1993), ao estudar o efeito da aderência de barras nervuradas de diferentes diâmetros, constatou que a resistência de aderência diminui quando o diâmetro de barra aumenta. Segundo o autor, a justificativa para tal fato possivelmente está ligada à espessura da zona de transição, que é mais grossa nas barras de maior diâmetro. O aumento do diâmetro da seção transversal da barra de aço implica maiores alturas das nervuras. Com isso tem-se um maior acúmulo de água na região das nervuras, proporcionando uma zona de transição com espessura e relação água/cimento maiores. Este aumento enfraquece a ligação entre a pasta de cimento e a barra, tornando-a mais porosa, facilitando assim o esmagamento por compressão pelas nervuras.

BARBOSA (2002) a partir do estudo de outros autores sobre a aderência aço-concreto, segundo os quais há uma redução na tensão máxima da aderência com o incremento do diâmetro das barras, pesquisou sobre a influencia deste diâmetro no processo. Os ensaios realizados seguiram a CEB RC6 (1983), ensaio pull-out-test. Com os resultados obtidos a autora verificou que à medida que aumenta o diâmetro da barra a tensão de aderência aumenta. A afirmação contrária desse fato, constatada por diversos autores (DUCATTI (1993), SOROUSHIAN & CHOI (1989), REYNOLDS & BEDDY (1982)) se baseia na espessura da zona de transição, mais grossa nas barras de maior diâmetro, a qual aliada às maiores dimensões das nervuras (transversais e longitudinais) "seguram" mais água de amassamento na face inferior da barra provocando uma exsudação interna e enfraquecendo a ligação argamassa-armadura. Salienta-se

que esse comportamento, de acordo com a autora, parece estar diretamente relacionado ao adensamento do concreto e não à espessura da zona de transição.

2.3.5 Posição das Barras na Concretagem

RIBEIRO (1985), em suas pesquisas, observou que a posição da barra influi na resistência ao arrancamento. As barras concretadas na posição horizontal no topo da forma apresentam pior comportamento do que aquelas concretadas no fundo da forma. Isto se deve ao fato de que as barras inferiores situam-se numa zona em que o adensamento é mais acentuado e, portanto, a existência de argamassa porosa na metade inferior das barras é menor.

Na Figura 14, abaixo, pode-se verificar que a segregação do concreto fresco faz com que haja um acúmulo de água sob as barras; posteriormente, ao ser, a água, absorvida pelo concreto endurecido, deixa vazios ou inúmeros poros na sua face inferior, prejudicando sensivelmente a aderência, pois compromete a zona de transição existente entre o aço e o concreto.

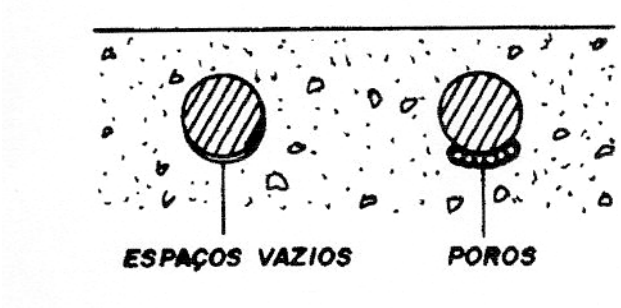


Figura 14 - Formação de espaços vazios ou poros sob as barras concretadas em posição horizontal devida à segregação e ao acúmulo de água LEONHARDT (1979).

DUCATTI (1993) realizou ensaios de arrancamento com concreto de alto desempenho que mostraram uma maior aderência das barras horizontais inferiores, comparados às barras horizontais superiores e às verticais. Segundo o autor, para as barras verticais, o desempenho da aderência é muito melhor quando a carga é aplicada em direção contrária àquela da sedimentação do concreto.Na situação inversa, isto é, carga aplicada na mesma direção do lançamento do concreto, a aderência pode registrar valores mais pobres ainda do

que em caso das barras horizontais no topo da forma. A explicação para a queda de aderência nas barras horizontais, bem como nas verticais, segundo o autor, está no acúmulo de argamassa porosa na metade inferior das primeiras e em baixo das nervuras das outras.

De acordo com o CEB 151, as barras concretadas na posição vertical e solicitadas em sentido oposto à concretagem apresentam maior resistência ao arrancamento que as barras concretadas na posição horizontal ou concretadas na posição vertical e solicitadas no mesmo sentido da concretagem. Este fato foi justificado igualmente por DUCATTI e RIBEIRO, devido ao acúmulo de argamassa porosa na metade inferior das barras (concretadas na posição horizontal) ou abaixo das nervuras (barras concretadas na posição vertical) e a sedimentação do concreto fresco, o que reduz a altura efetiva dos dentes (console) de concreto.

BARBOSA (1998), que estudou o comportamento da aderência em concreto de elevado desempenho, mostrou que a influência da posição da barra de armadura durante a concretagem sobre a aderência diminui quando a resistência do concreto aumenta. A autora verificou, nos ensaios realizados que as barras concretadas na posição vertical e carregadas no sentido contrário da direção de concretagem obtiveram uma melhor aderência que as barras concretadas na direção horizontal. A autora comprova o trabalho de DUCATTI (1993) ao concluir que a posição das barras em relação ao sentido do preenchimento dos moldes pelo concreto nos ensaios de arrancamento influiu de maneira menos acentuada sobre a aderência do concreto de elevado desempenho do que nos concretos comuns.

2.3.6 Adensamento

O adensamento pode ser critico para a aderência uma vez que as zonas de ancoragem são pontos onde normalmente se tem uma elevada percentagem de armadura, ocasionando maiores dificuldades de concretagem e, como conseqüência, maior a possibilidade de surgimento de vazios, tornando esta região mais fraca quando solicitada.

O CEB 151 (1982), diz que o adensamento influência na aderência da mesma forma com que influência a resistência à compressão.

2.3.7 Estado Superficial das Barras

Segundo VIEIRA (1994) o estado superficial das barras lisas, onde a resistência de aderência está ligada à adesão, tem influência significativa sobre a aderência que elas possam desenvolver. De acordo com o CEB 151 (1982), as barras lisas contaminadas com desmoldante praticamente não apresentam aderência. No entanto, conforme CEB 118 (1979) a oxidação na barra proporciona um aumento na resistência de aderência.

Para barras nervuradas, onde a adesão representa uma pequena parcela da resistência da aderência, o estado superficial da barra não influência nessa resistência.

KEMP, BRESNY e UNTERSPAN, citados por RIBEIRO (1985), realizaram ensaios com barras nervuradas com diferentes condições de superfície tais como: oxidadas ao ar, lubrificadas, com rugosidade obtida artificialmente, oxidadas na água salgada e compararam os resultados obtidos com os das barras normais. Os autores chegaram à conclusão de que o comportamento da aderência foi basicamente o mesmo, a não ser para as barras com rugosidade obtida artificialmente, as quais obtiveram uma melhor aderência.

2.4 ENSAIOS DE ADERÊNCIA

A normalização brasileira avalia a tensão de aderência através da determinação do coeficiente de conformação superficial que é obtido através do ensaio de tirantes de concreto de forma prismática onde se aplica um esforço de tração nos dois extremos da barra.

Existem vários ensaios que determinam os valores da tensão de aderência entre a armadura de aço e o concreto, alguns citados a seguir.

2.4.1 Ensaio de Arrancamento Direto: "PULL-OUT TEST (POT)"

È o mais tradicional dos ensaios de aderência e consiste em extrair uma barra de aço posicionada no centro de um corpo de prova de concreto, colocado sobre placas de apoio de uma máquina de ensaio. As duas extremidades da barra são projetadas para fora do corpo de prova, medindo-se a força de tração aplicada a um dos extremos e os escorregamentos no outro extremo.

As vantagens deste ensaio são que, além do baixo custo e simplicidade, ele dá uma idéia clara do conceito de ancoragem, isto é, o comprimento que está embebido no concreto é o que define o próprio comprimento de ancoragem.

Tem como desvantagem que os resultados obtidos servem apenas para pesquisas comparativas ou estudos qualitativos, pois a forma de solicitar o corpo de prova não reproduz as condições reais de solicitação das barras de aço quando projetadas as finalidades de uso.

Este ensaio de arrancamento direto é normalizado pela RILEM ,doc 7.II.128 (1973) e também está referido na ASTM C234 (1991), com todo detalhamento necessário a sua execução como ensaios de laboratório. Segue abaixo a Figura 15 – que mostra a disposição geral deste ensaio de arrancamento.

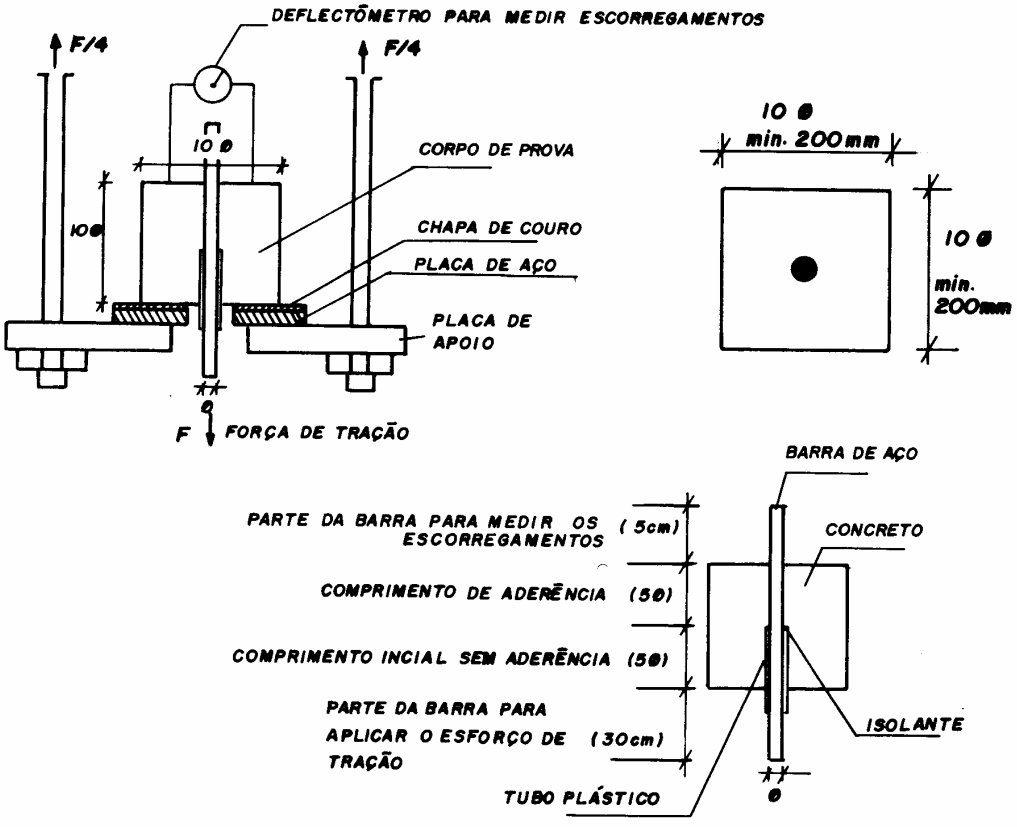


Figura 15 - Disposição geral do ensaio de arrancamento proposto pela RILEM (1973)

2.4.2 Ensaio de Arrancamento com Anel Circunferencial - "Ring Pull – Out Test"

Como no caso do "Pull-Out-Test", este ensaio consiste na extração de uma barra de aço concretada no interior de um corpo de prova que se apóia contra placas de uma máquina de ensaio, ilustrada na Figura 16. O que difere ambos é que no "Ring Pull-Out-Test" o corpo de prova é sempre cilíndrico e fica envolvido por anel metálico que abraça o comprimento mergulhado; este anel é instrumentado com "strain-gages" que possibilitam medir, além das deformações ocorridas no anel, a tração exercida em um dos extremos da barra e os escorregamentos.

Este ensaio permite a medição direta da componente de fendilhamento e das forças de aderência, sendo que as informações obtidas são mais completas do que no ensaio convencional.

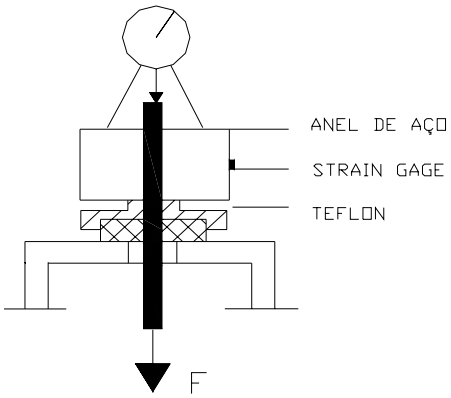


Figura 16 – Ensaio de arrancamento com anel circunferencial

2.4.3 Ensaios de Flexão – "Beam Test (Bt)"

O "Beam Test" consiste em um corpo de prova constituído de dois blocos paralelepipédicos, ligados em sua parte inferior pela barra de aço destinada ao estudo de aderência e em sua parte superior por uma rótula metálica, conforme ilustrado na Figura 17. A viga assim constituída é solicitada a flexão simples, sobre dois apoios, por duas forças concentradas de mesma magnitude que agem a distâncias iguais dos extremos. Nos extremos das barras colocam-se

deflectômetros, a fim de que possam ser medidos os deslocamentos relativos da barra em relação ao concreto. A ancoragem é limitada ao comprimento especificado, com a ajuda de tubos plásticos que eliminam a aderência nos trechos desejados.

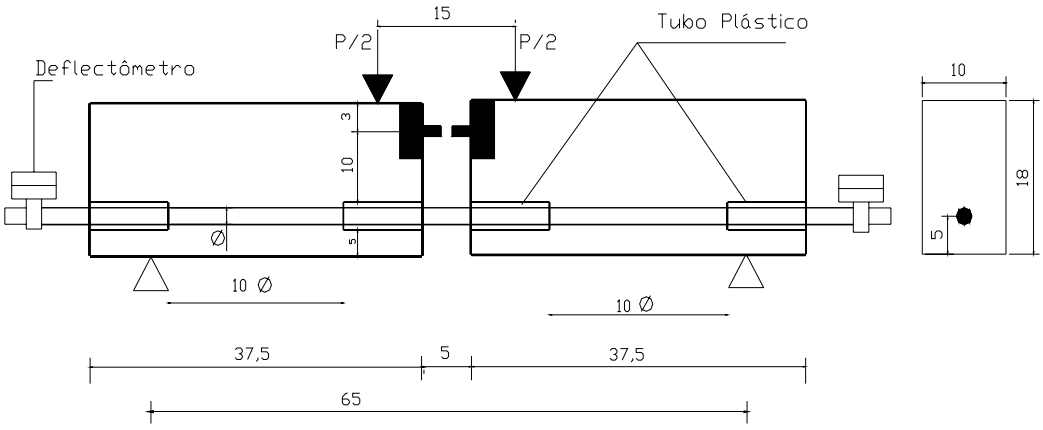


Figura 17 – Ensaio de flexão em vigas CEB RC5 (1993)

2.4.4 Ensaio de Aderência do Tipo "Push-Out Test"

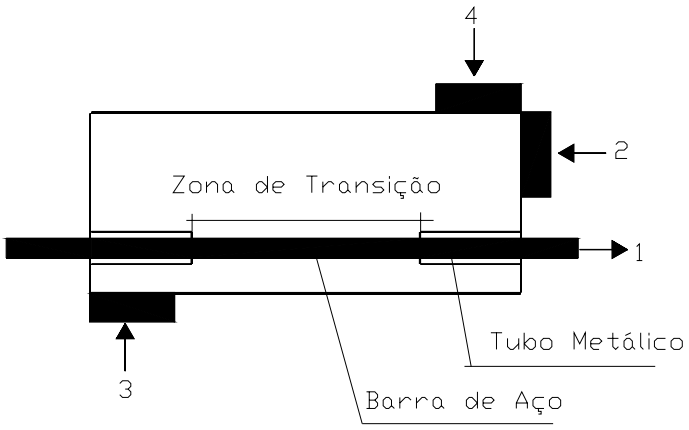
A principal característica deste ensaio é que a barra contida no corpo de prova de concreto sofre deslizamento por uma força de compressão e não de tração, como utilizada no ensaio P.O.T. convencional. Os resultados deste ensaio são superiores ao tradicional em virtude da dilatação lateral da barra no interior do concreto.

2.4.5 Ensaio de Extremo de Viga – "Beam End Test"

Este ensaio representa a situação de aderência que existe entre uma fissura de flexão-cisalhamento e o extremo de uma viga simplesmente apoiada. Representa um progresso sobre o tradicional "Pull-Out-Test", visto que estabelece um gradiente de deformações ao longo da altura do corpo de prova mais realista.

O ensaio consiste em uma barra situada na parte inferior do corpo de prova, que é tracionada e a reação, que simula a zona de compressão da viga, é aplicada na parte superior do corpo de prova, ilustrada na Figura 18. O momento criado é equilibrado por outro par de forças que atuam perpendicularmente à

barra e simulam a reação de apoio e o esforço de corte que seria transmitido através do concreto.



1- Força de tração na barra;

2- placa de reação que simula a zona de compressão de viga;

3- placa de reação de apoio;

4- placa de reação que simula o esforço cortante que seria transmitido através do concreto.

Figura 18 – Corpo-de-prova para o ensaio de extremo de viga

2.4.6 Ensaios das Quatro Barras

O ensaio de quatro barras, testado por DUCATTI (1993), consiste de uma emenda por transpasse, ligando três barras a uma central e envolvidas por um cilindro de concreto. O objetivo principal deste método é eliminar as interferências das tensões de compressão, impostas ao concreto no ensaio de arrancamento tradicional.

O ensaio das quatro barras é um ensaio de arrancamento no qual a barra central é tracionada e o cilindro de concreto é mantido imóvel pela força de reação exercida pelas outras três barras dispostas nos vértices de um triângulo, como mostra Figura 19:

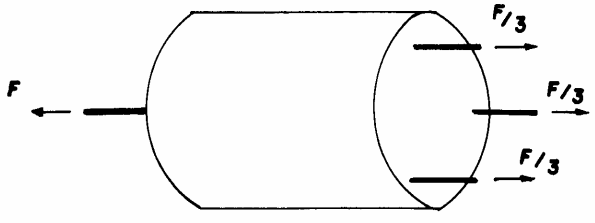


Figura 19 – Desenho esquemático do corpo de prova

A medida dos deslocamentos da barra central em relação ao concreto é feita por meio de transdutores indutivos de deslocamentos (ou por meio de extensômetros) fixados ao concreto por um adesivo. As deformações da barra central são medidas por extensômetros elétricos colocados ao longo do comprimento da barra central.

2.4.7 Ensaio de Conformação Superficial ou Ensaio de Tirante de Concreto.

Este ensaio, especificado pela NBR 7477, consiste em exercer um esforço de tração aos dois extremos de uma barra mergulhada no centro de um corpo de prova de concreto prismático, com o objetivo de avaliar a aderência entre o concreto e o aço. Em geral, estes ensaios se destinam ao estudo da fissuração e reproduzem muito bem as condições reais de solicitação das barras na região tracionada de vigas fletidas.

Através da avaliação do afastamento e abertura das fissuras verificadas, este ensaio permite a determinação do chamado coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados à armadura de concreto armado, de acordo com a NBR 7477 da ABNT (1982). Enquanto barras lisas apresentam fissuras de maior abertura e mais afastadas entre si, barras nervuradas apresentam fissuras mais próximas e com menor abertura. A figura 20 ilustra o ensaio específico.

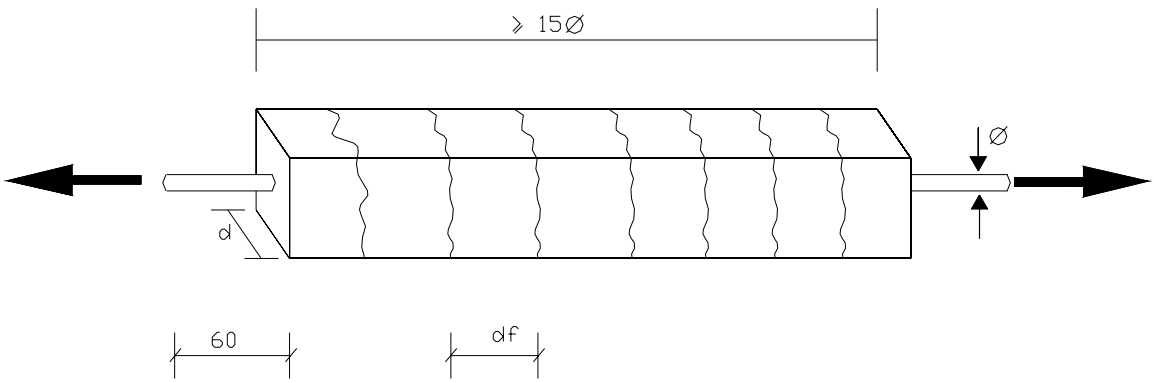


Figura 20 – Ensaio de Tirantes de Concreto

Segundo CASTRO (2000) a partir do cálculo do espaçamento médio entre as fissuras determina-se a tensão média de aderência das barras de aço em concretos de diferentes classes de resistência aplicando-se a equação (1):

$$\tau_m = 0{,}375 \frac{f_{ct}}{X_m} \cdot \frac{\varnothing}{\rho} \qquad \text{Equação(1)}$$

onde:

τ_m – tensão média de aderência;

f_{ct} - resistência à tração simples do concreto;

X_m – distância média entre fissuras;

$\varnothing$ - diâmetro da barra;

$\rho = A_s / A_c$

Alguns dos vários ensaios de aderência foram descritos no item 2.4, e seguindo a disponibilidade existente junto ao Laboratório CESP de Engenharia Civil e a veracidade apresentada na determinação do coeficiente de aderência, optou-se, nesta pesquisa por utilizar o ensaio de determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado, normalizado pela NBR 7477 (1982), e o ensaio de arrancamento "Pull-Out-Test", normalizado pela RILEM,doc 7.II.128 (1973) e também referido na ASTM C234 (1991).

Estes ensaios foram adotados pela sua simplicidade e pelo seu baixo custo, além da reduzida mão de obra na confecção dos moldes, para a realização dos mesmos**.** Além disso, o ensaio de tirantes reproduz muito bem as condições reais de solicitação das barras na região tracionada de vigas fletidas e o ensaio "pull-out-test" é o mais tradicional ensaio de aderência, criando-se, assim parâmetros para comparação da normalização brasileira.

III PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios para caracterização dos materiais, das propriedades mecânicas do concreto e os ensaios de aderência foram realizados no Laboratório CESP de Engenharia Civil, em Ilha Solteira-SP. Neste capítulo descrevem-se os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais que compõem os concretos em estudo e também as barras de aço utilizadas.

3.1 Materiais

Para a composição do concreto convencional e do com incorporação de resíduos foram usados os materiais a seguir.

3.1.1 Agregado Miúdo

Na fabricação dos dois concretos utilizados, concreto convencional e o com resíduo de borracha, utilizou-se areia natural extraída do rio Paraná, proveniente do porto de área Nossa Senhora Aparecida da cidade de Castilho-SP qual apresentou nos ensaios especificados pelas normas (NBR – 7217; NBR/NM – 52; NBR – 7810; NBR – 9776; NBR – 7218; NBR/NM – 49) os seguintes resultados (Figura-21).

3.1.2 Agregado Graúdo

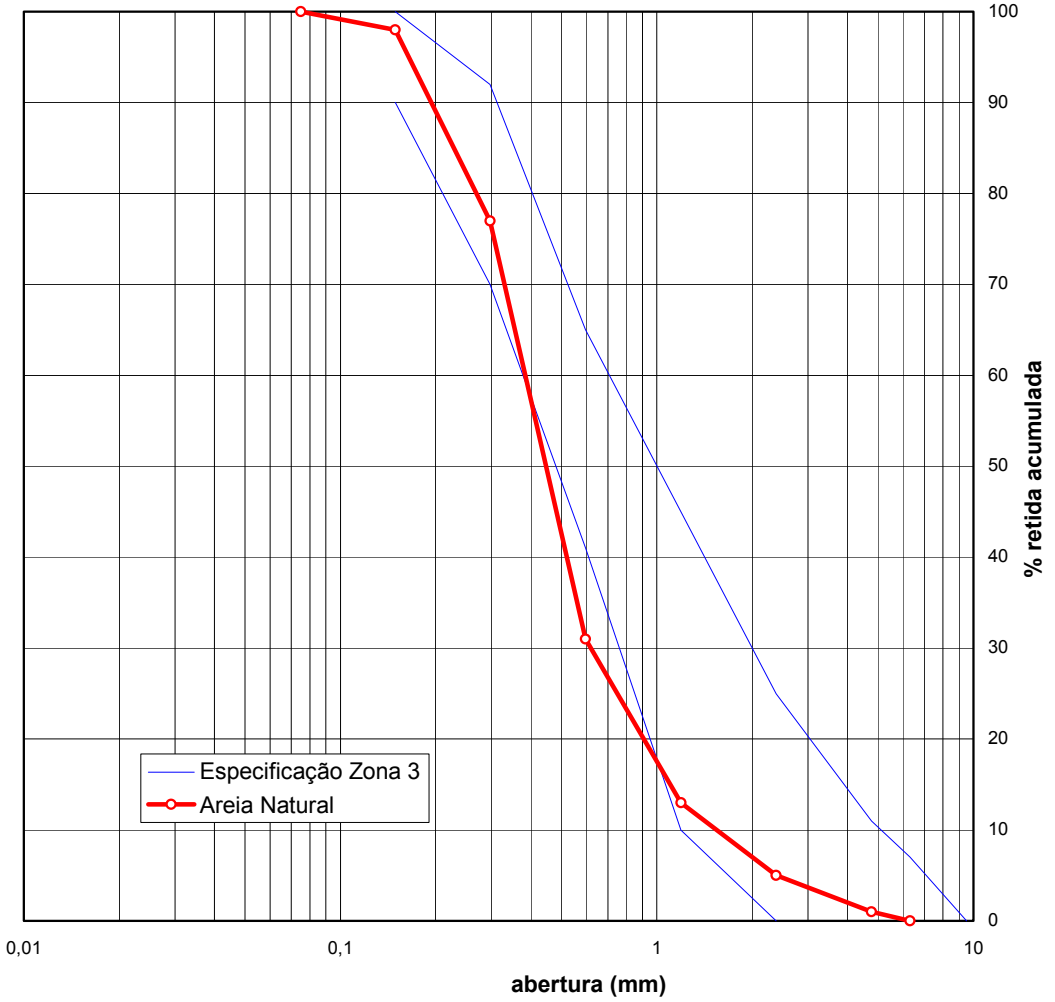
Como agregado graúdo, empregou-se a brita tipo 1 (um), basáltica disponível na região Noroeste do Estado de São Paulo, proveniente da cidade de Monções - Mineradora Grandes Lagos. A caracterização do agregado graúdo, conforme as normas (NBR-7217; NBR-7810; NBR-9937; NBR-7218; NBR/NM-49), está apresentada na Figura-22.

unesp

Caracterização da Areia Natural

Curva Granulométrica da Areia Natural

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0	25,4
Areia	100	98	77	31	13	5	1	0				



diâmetro	módulo	massa específica		absor-	pulve-	massa unitária		matéria
máximo	de	s.s.s.	seco	ção	rulento	aparente seca	aparente 4%	orgânica
(mm)	finura	(g/cm³)	(g/cm³)	(%)	(%)	(g/cm³)	(g/cm³)	
4,76	2,25	2,585	2,577	0,30	0,34	1,533	1,16	abaixo

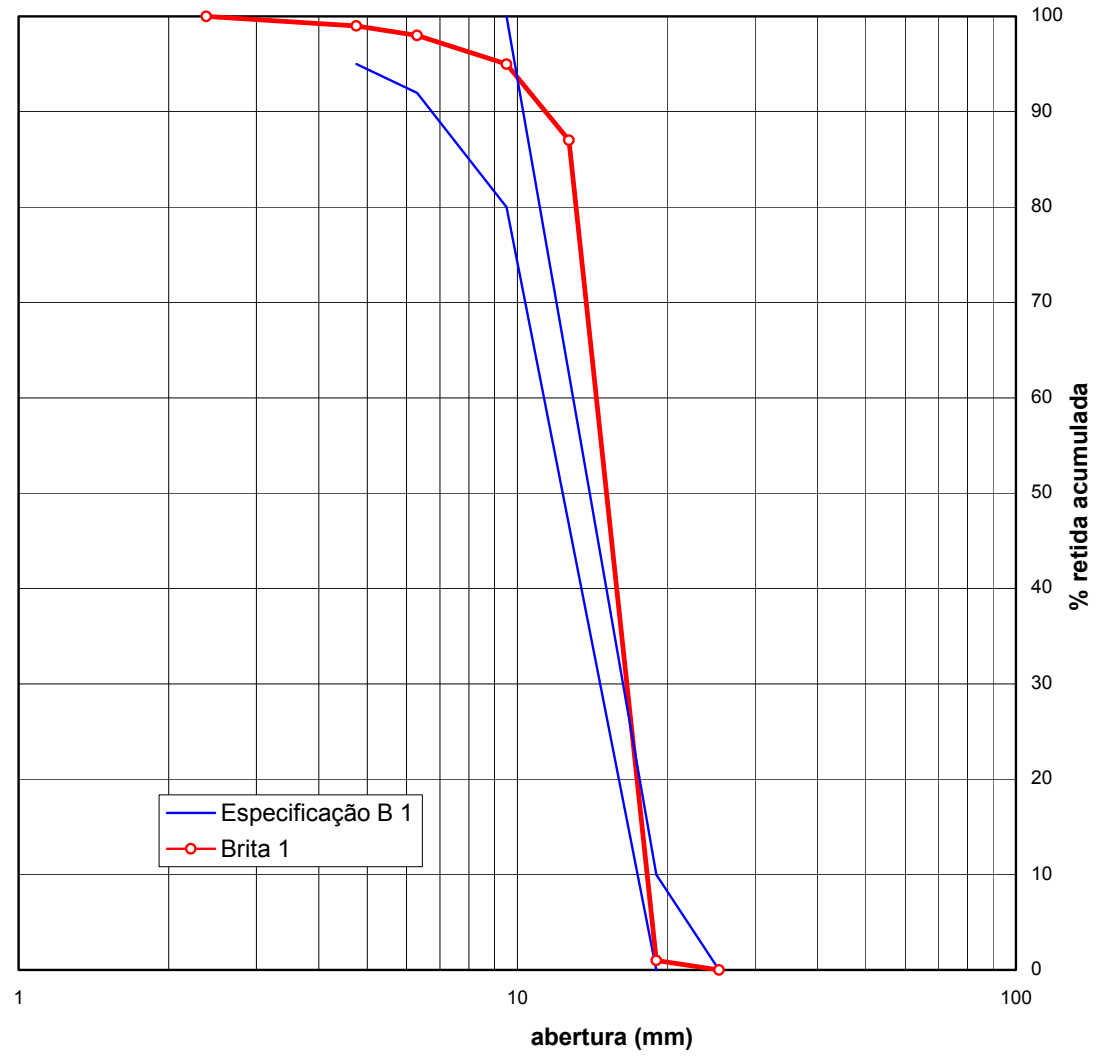
Figura 21 - Resultados da caracterização da areia

unesp

Caracterização da Brita 01

Curva Granulométrica da Areia Natural

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,15	0,30	0,60	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0	25,4	38,1
B 1	100	100	100	100	100	99	98	95	87	1	0	



agregado	diâmetro máximo (mm)	módulo de finura	peso específico s.s.s. (g/cm³)	peso específico seco (g/cm³)	massa unitária (g/cm³)	absor-ção (%)	pulve-rulento (%)
B 1	19,0	6,95	2,956	2,920	1,494	1,23	0,19

Figura 22 - Resultados da caracterização da brita 1.

3.1.3 Cimento

Utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), comercialmente disponível, cujas características são especificadas pela NBR-5733 (1991).

. As propriedades físicas e químicas do cimento, ensaiadas segundo as normas brasileiras (NBR-9202 (1985); NBRNM-76 (1998); NBR-7810 (1983); NBR/NM-23 (2000); NBR-7215 (1996)), permitiram obter a caracterização indicada na Tabela-2.

Tabela 2 - Resultados da Caracterização do Cimento

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

Referência			22718	Especificações NBR-5733	
Amostra			13		
Data da coleta /03			18.09.2003	min.	máx.
Finura Peneira 200 (% retida)			0,09	-	6,0
Finura Peneira 325 (% retida)			1,0	-	-
Superf. espec. Blaine (cm²/g)			4499	3000	-
Densidade aparente (g/cm³)			0,96	-	-
Densidade absoluta (g/cm³)			3,15	-	-
Água de consistência		gramas	145	-	-
da pasta		(%)	29,0	-	-
Início de pega (h:min)			02:02	01:00	-
Expansão em auto-clave (%)			0,013	-	-
Resistência à Compressão Axial	Consistência	gramas	150	-	-
	argamassa	a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		30.09	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	45,9	24,0	-
		07 dias	54,1	34,0	-
		28 dias	53,7	-	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		3,62	-	4,5
	Insolúveis		0,21	-	1,0
	SiO2		18,23	-	-
	Fe2O3		2,57	-	-
	Al2O3		5,99	-	-
	CaO		64,70	-	-
	MgO		0,81	-	6,5
	SO3		3,04	-	3,5
	Na2O		0,19	-	-
	K2O		0,72	-	-
	Equiv alcalino Na2O		0,66	-	-
	Cal livre em CaO		1,42	-	-

Análise físico-química de cimento Ciminas CP V-ARI PLUS

3.1.4 Água

A água utilizada para amassamento da mistura foi água potável da rede de abastecimento público da cidade de Ilha Solteira – SP.

3.1.5 Resíduos de Borracha

Os resíduos de borracha de pneus, provenientes do processo de recauchutagem, foram fornecidos pela empresa "Araçá Renovadora de Pneus Ltda", localizada no município de Araçatuba – SP.

Sua obtenção advém de um processo mecânico, por meio de raspagem das bandas de rodagem dos pneus. A Figura-23 ilustra o resíduo recebido em seu estado natural.

Figura 23 – Resíduos de borracha no estado natural

Baseando em pesquisas anteriores (FATTUHI *et al* 1996, AKASAKI *et al* 2001), constatou-se que o diâmetro do resíduo de borracha influi na resistência do concreto – "quanto maior o diâmetro do resíduo menor a resistência do concreto"-. Os resíduos de borracha utilizados nesta pesquisa foram peneirados, de maneira que somente aqueles que passaram pela peneira número 16 (abertura de malha 1,19 mm), Figura-24, foram utilizados na fabricação do concreto.

Figura 24 – Resíduos de borracha que passaram pela peneira número 16

Para caracterização dos resíduos de borracha foram realizados os ensaios de massa específica aparente NBR-7810 (1983); massa específica absoluta e análise granulométrica NBR-7217 (1987), estando a borracha em seu estado natural e no estado de utilização (após passagem na peneira nº 16).

As Figuras 25 e 26 ilustram os resultados dessas caracterizações, respectivamente.

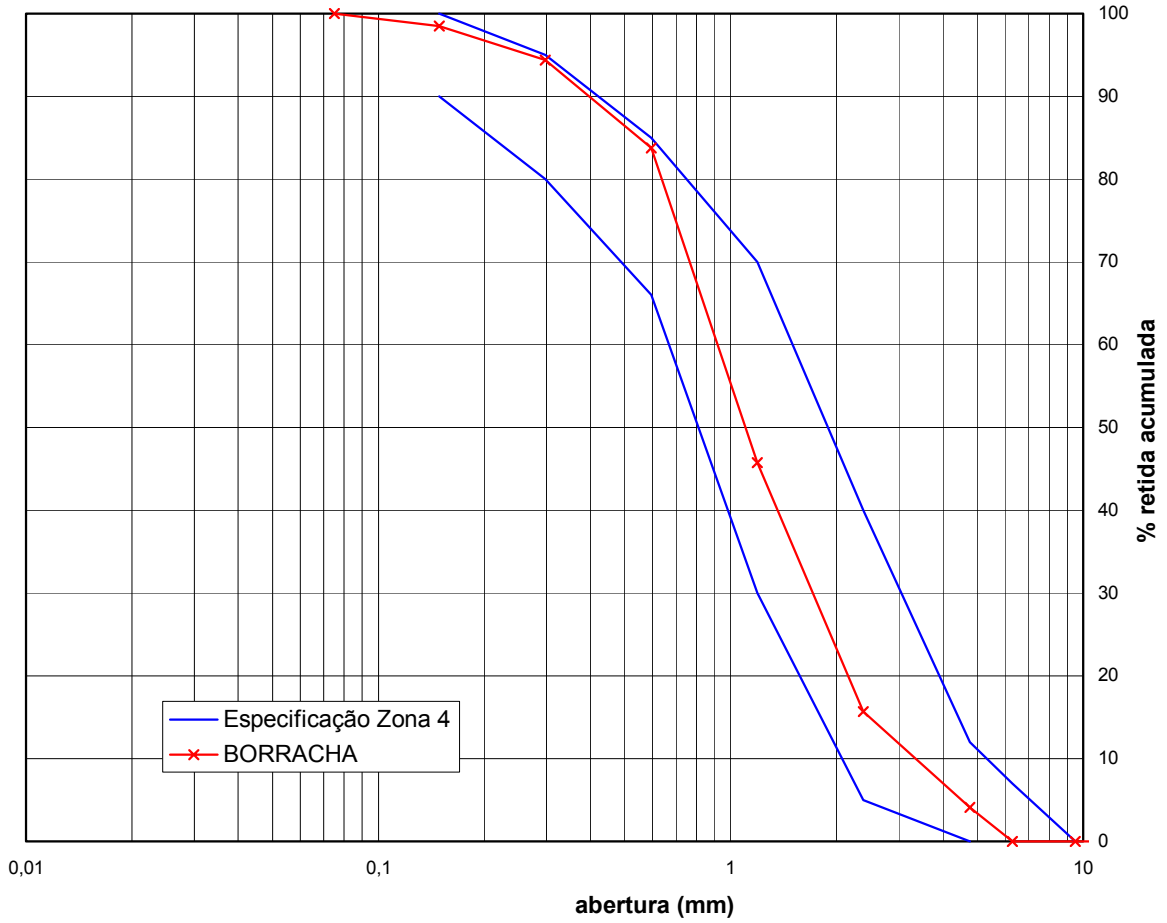
.

unesp

Caracterização da Borracha

Curva Gramulométrica do Resíduo de Borracha

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm)	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,5	12,7	19,0	25,4
Fibra	100,00	98,46	94,41	83,74	45,76	15,66	4,09	0,00	0,00	0		



diâmetro máximo (mm)	módulo de finura	massa específica		absor-ção (%)	pulve-rulento (%)	massa unitária		matéria orgânica
		absoluta (g/cm³)	aparente (g/cm³)			aparente seca (g/cm³)	aparente 4% (g/cm³)	
4,76	3,4	1,09	0,27	-	-	-	-	-

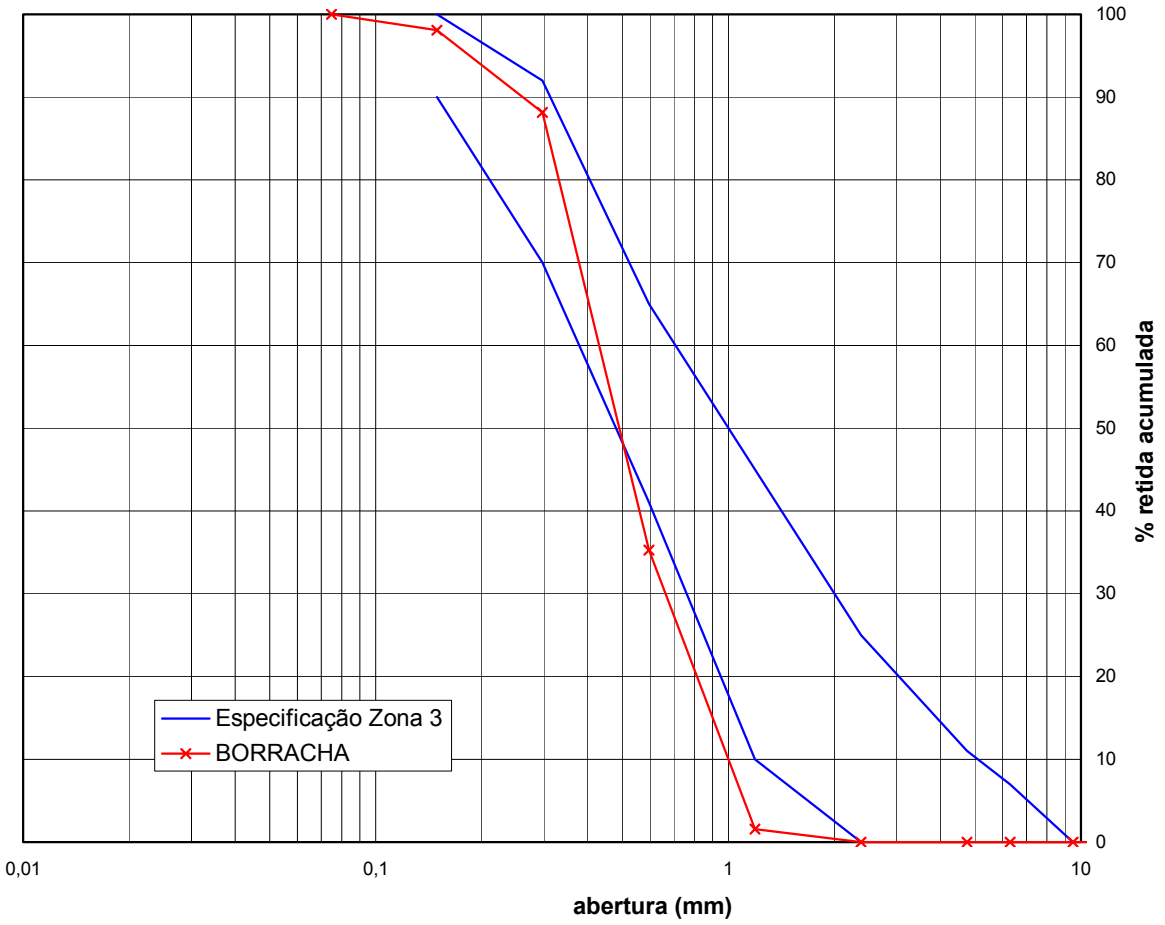
Figura 25 - Resultados da caracterização do resíduo de borracha no estado natural.

unesp

Caracterização da Borracha

Curva Gramulométrica do Resíduo de Borracha

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm)	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,5	12,7	19,0	25,4
Fibra	100,00	98,08	88,15	35,26	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0		



diâmetro máximo (mm)	módulo de finura	massa específica		absor-ção (%)	pulve-rulento (%)	massa unitária		matéria orgânica
		absoluta (g/cm³)	aparente (g/cm³)			aparente seca (g/cm³)	aparente 4% (g/cm³)	
1,19	2,2	1,09	0,27	-	-	-	-	-

Figura 26 - Resultados da caracterização do resíduo de borracha que será utilizada.

3.2 Composição do Concreto

Adotou-se a composição do concreto convencional, utilizada em pesquisas anteriores (AKASAKI *et al* 2001), cuja composição esta prescrita na Tabela-3.

Tabela- 3 – Composição do Concreto Convencional

Materiais	**Consumo kg/m^3**
Cimento	295,57
Água	195,03
Areia	931,53
Brita 01	1000,57

A fim de obter um concreto com composição similar foram fixadas a relação água-cimento em 0,66 e o abatimento (“slump test”) em 6,0 cm, com variação de ±1,0 cm. As Figuras-27 e 28 ilustram o “slump test”.

Figura-27 - Slump Test Concreto Convencional

Figura-28 - Slump Test Concreto Convencional

A composição do concreto com 10% de resíduo de borracha, apresentada na Tabela-4, foi realizada mantendo a relação a/c e “slump” igual a do concreto convencional. Os resíduos de borracha foram incorporadas ao concreto em substituição à areia em volume.

Tabela-4 – Composição do Concreto 10% de resíduo

materiais	**Consumo kg/m^3**
Cimento	325,80
Água	215,03
Areia	768,35
Brita 01	1.000,57
Resíduo de Borracha	36,06

3.2.1 Fabricação e Conservação dos Corpos-de-Prova

Os materiais utilizados para confecção do concreto convencional foram introduzidos na betoneira na seguinte ordem: com a betoneira desligada foram adicionados o agregado graúdo (brita 1), o agregado miúdo (areia) e metade da água; foram misturados os componentes durante o tempo de 1 minuto; em

seguida, adicionaram-se o cimento e o restante da água, misturando tudo por mais 3 minutos; após descanso de 3 minutos, fez-se a mistura por mais 2 minutos.

Esta ordem foi alterada para a fabricação do concreto com resíduos. A fim de se obter uma melhor mistura dos materiais foram adicionados à betoneira o agregado graúdo (brita1), o agregado miúdo (areia), e o resíduo de borracha e misturados por um minuto; em seguida foi adicionada metade da água de amassamento e os materiais foram misturados por mais um minuto. Mantiveram-se os demais procedimentos idênticos aos do concreto controle.

Após a fabricação do concreto foi realizado o teste de abatimento de cone (slump-test). Foram moldados corpos-de-prova com as dimensões de 10x20 cm, sendo o adensamento realizado através de mesa vibratória.

Após moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos com uma película plástica, Figura-29, para evitar a evaporação da água e perda de umidade durante um período de 24 horas, sendo posteriormente desformados e colocados em câmara úmida até as datas dos ensaios (7, 28 e 90 dias).

Figura – 29 - Película plástica nos corpos-de-prova

Foram determinados, para as idades acima mencionadas, a resistência à tração, resistência à compressão e módulo de deformação, seguindo os

procedimentos estabelecidos pelas normas NBR 5739, NBR 7222 e NBR 8522 respectivamente. Na Tabela- 5 podem-se avaliar os resultados obtidos nos ensaios realizados, nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Tabela- 5 – Valores obtidos nos ensaios das características mecânicas dos concretos.

	Idade(dias)	*Concreto Convencional*	*Concreto c/ resíduos*
Tensão de Compressão (MPa)	7	29,18	20,24
	28	32,97	22,64
	90	35,21	23,38
Tensão de Tração (MPa)	7	2,84	1,88
	28	3,57	2,34
	90	3,88	2,41
Módulo de Deformação(GPa) (tangencial)	7	25,09	15,21
	28	31,21	20,42
	90	32,32	22,10

As Figuras – 30, 31 e 32 ilustram a evolução da resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação, respectivamente para as idades de 7, 28 e 90 dias.

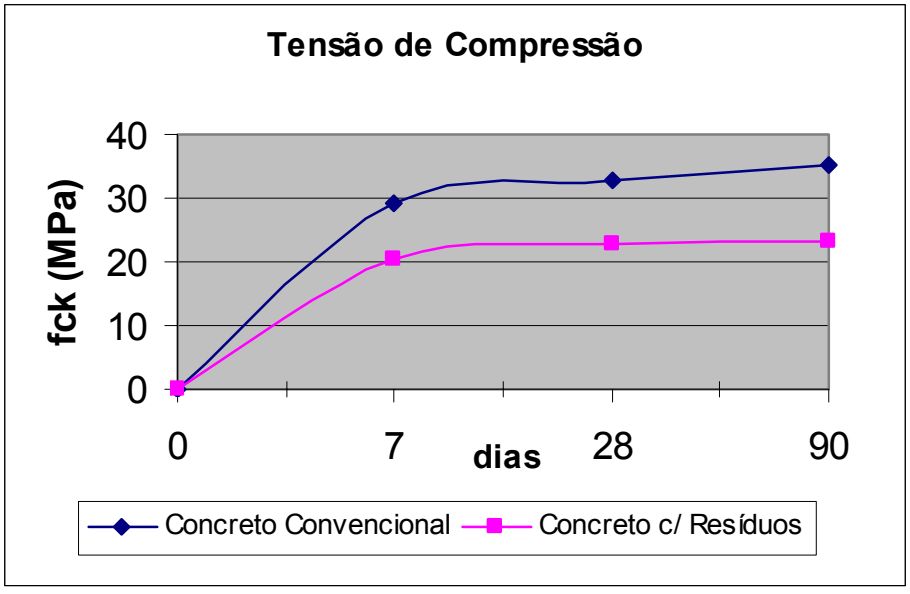


Figura-30 - Tensão de Compressão

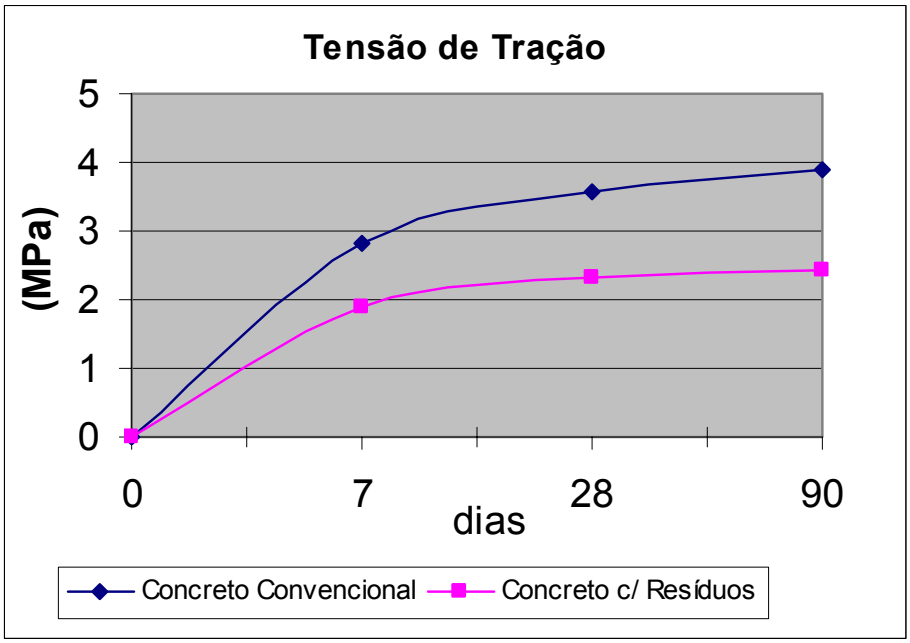


Figura-31 - Tensão de Tração

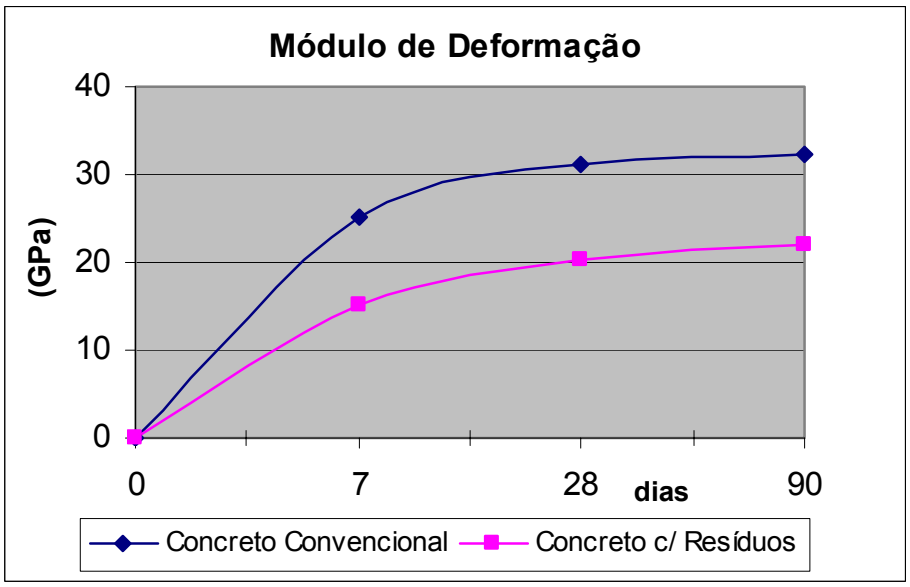


Figura-32 - Módulo de Deformação Tangencial

3.3 Armaduras

Utilizaram-se, nesta pesquisa, aços do tipo nervurados com seção circular, da classe CA 50-A, com resistência característica de escoamento (fy) de 500 (MPa), fabricado pela Companhia Siderúrgica de Aços Belgo Mineira, na Usina de Piracicaba – SP.

Optou-se por barras de aço de diâmetros de 10,0mm (3/8”), 12,5mm (1/2”) e 16mm (5/8”), pela facilidade apresentada no manuseio e fabricação dos moldes de tirante e “pull-out”, uma vez que o tamanho do molde varia de acordo com o diâmetro da barra, e também por serem os aços mais utilizados nas construções civis de pequeno e médio porte.

Os ensaios para a caracterização do aço obedeceram à norma NBR 7480/96, a qual fixa as condições exigíveis na encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Os resultados obtidos estão ilustrados na Tabela – 6.

Tabela 6 - Resultados da caracterização das barras de aço.

Diâmetro mm	inclinação Nervura (º)	Lim. Escoamento (MPa)	Lim. Resistência (MPa)	Alongamento (%)
10,0	51	619,0	778,3	14,00
12,5	46	609,7	776,3	14,67
16,0	47	630,7	795,0	16,07

Para as barras de aço de diâmetro nominal ou superior a 10.0 mm da categoria CA-50, a norma brasileira estabelece que o coeficiente de conformação superficial deve ser maior ou igual a 1,5.

A NBR 7480/1996 estabelece, em relação à conformação geométrica das barras, que:

- o espaçamento médio das nervuras transversais ou oblíquas, medido ao longo de uma mesma geratriz, deve estar entre 0.5 e 0.8 do diâmetro nominal;
- as nervuras devem abranger pelo menos 85% do perímetro nominal da seção transversal da barra;
- as barras devem ter pelo menos duas nervuras longitudinais contínuas e diametralmente opostas, exceto no caso em que as nervuras transversais estejam dispostas de forma a se oporem ao giro da barra dentro do concreto;
- para diâmetros nominais maiores ou iguais a 10.0 mm, a altura média das nervuras transversais ou oblíquas deve ser igual ou superior a 0.04 do

diâmetro nominal e para diâmetros nominais inferiores a 10.0 mm, igual ou superior a 0.02 do diâmetro nominal.

Para se obterem dados precisos a respeito do material foram realizados ensaios referentes à conformação geométrica das barras em estudo, especificados a seguir.

O ângulo de inclinação das nervuras foi determinado através de uma série de dez leituras de cada lado da barra e para cada diâmetro, obtendo o valor médio, a Figura – 33 ilustra o método.

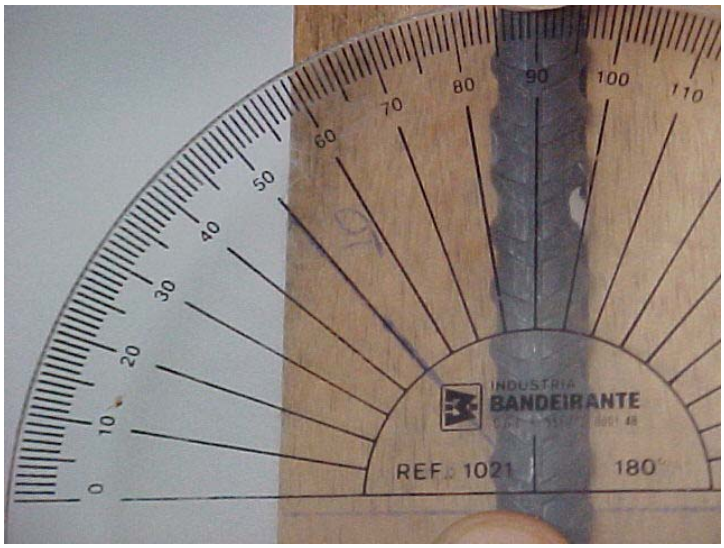


Figura 33 – Leitura do ângulo de inclinação das nervuras

Para obtenção da altura média das nervuras foram realizadas três séries, contendo, cada uma delas, dez leituras consecutivas para cada diâmetro de barra utilizado, sendo o valor final a média entre os valores obtidos. A altura da nervura foi aferida por meio de um relógio comparador digital modelo Digico 10 que apresenta os valores em milésimo de milímetro. O procedimento de leitura consistiu em medir a distância máxima entre o ponto mais alto da nervura e o centro da barra, no sentido perpendicular ao eixo da barra; este procedimento está ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Medição da altura das nervuras

A distância entre nervuras foi obtida pela distância entre pontos equivalentes das mesmas, em 10 espaços afastados e dividida pelo número de espaços. Utilizou-se para esse procedimento um paquímetro da marca Mitutoyo; a Figura- 35 ilustra a aferição.

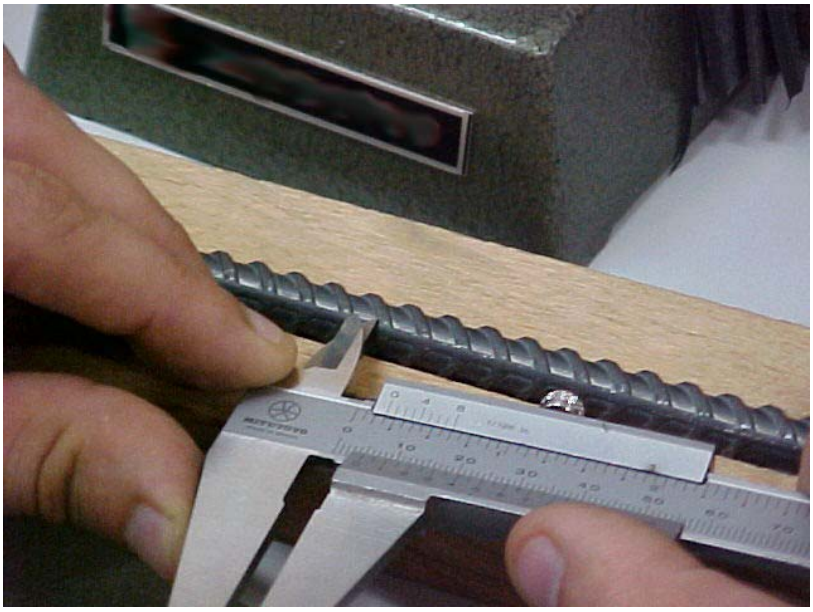


Figura 35 – Distância entre as nervuras

A Tabela 7 apresenta a relação entre os valores obtidos e os exigidos pela NBR 7480/1996. As barras de aço utilizadas nesta pesquisa enquadraram-se dentro dos requisitos da norma brasileira.

Tabela 7 – Conformação Geométrica dos Aços Estudados

DIÂMETRO (mm)	*REQUISITO DA NORMA*		RESULTADOS OBTIDOS	
	h médio (mm)	*distância (mm)*	*h médio (mm)*	*distância (mm)*
10.0	*0.40*	*5.0 – 8.0*	1.0	6.16
12.5	*0.50*	*6.25 – 10.0*	1.1	8.33
16.0	*0.64*	*8.0 -12.8*	1.5	9.15

Onde:

h médio = altura média das nervuras (mínima)

distância = espaçamento entre as nervuras

Calculou-se também a área relativa da nervura, através da expressão (Equação-2) definida segundo o CEB (1999) e o EUROCODE (1993).

$f_R = (\gamma . h_s)/ Sn$ Equação (2)

onde:

f_R = área relativa da nervura;

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

h_s = altura máxima da nervura transversal;

Sn = espaçamento entre as nervuras transversais, ou seja, distância centro a centro entre duas nervuras consecutivas.

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos, bem como o mínimo requerido pela norma para as barras de aço utilizadas, tendo sido todas elas consideradas de alta aderência.

Tabela 8 – Valores para área relativa da nervura (F_R)

Ø da barra (mm)	F_R Obtido	F_R Norma
10,0	0,081	*0,052*
12,5	0,066	*0,056*
16,0	0,082	*0,056*

3.4 Método Experimental

3.4.1 Ensaios de Tirantes

O ensaio de tirantes, normalizado pela NBR 7477 consiste em determinar o coeficiente de conformação superficial das barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado.

A fabricação dos moldes obedeceram a acima citada, que especifica os seguintes parâmetros:

$$d = (\pi \,.\, \varnothing((\varnothing/4) + 7))^{1/2} \qquad \text{Equação (3)}$$

d = lado do tirante;

Ø = diâmetro nominal da barra ou fio;

ℓ = comprimento do tirante ≥ 15 x d;

L = comprimento da barra = ℓ + 120.

A Figura-36 apresenta o detalhamento das formas utilizadas nos ensaios:

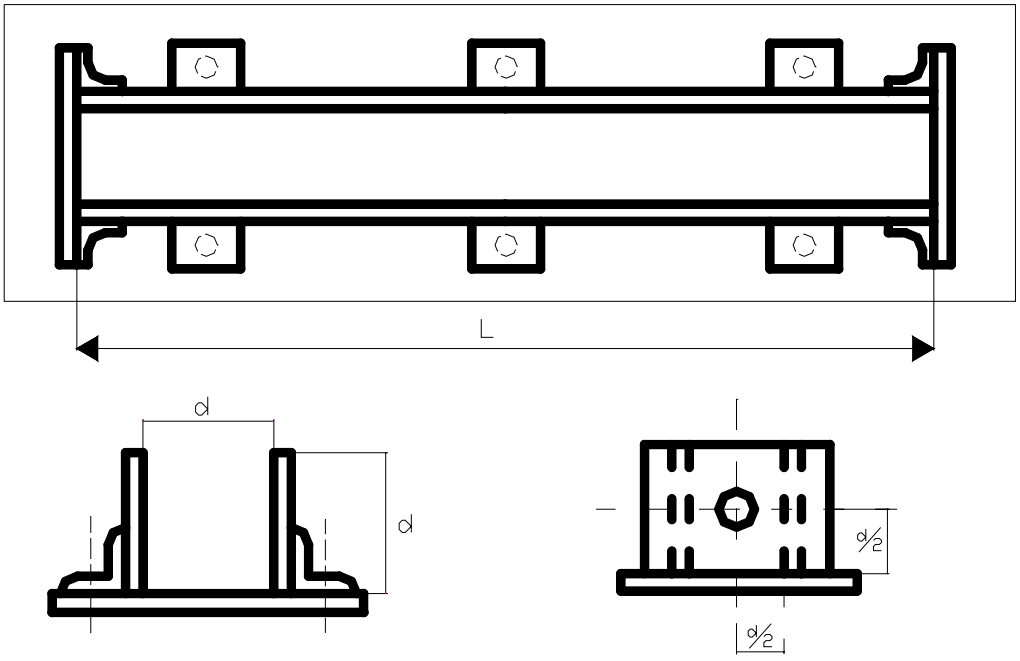


Figura-36 – Formas para confecção dos tirantes.

A equação 2 permite dimensionar o tamanho das formas que por sua vez variam de acordo com o diâmetro da barra de aço. Para os aços utilizados nesta pesquisa, as dimensões dos tirantes estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9- Dimensão dos tirantes ensaiados

Ø da barra (mm)	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)
10,0	4,77	4,77	75
12,5	5,35	5,35	85
16,0	6,09	6,09	95

A norma NBR 7477 determina que o mínimo de tirantes a serem ensaiados seja em número de nove (9). Atendendo a esta orientação foi executado um número de formas que permitissem a moldagem dos tirantes suficientes para serem ensaiados aos 28 e 90 dias. O objetivo de moldar todos os corpos-de-prova de uma só vez, em uma única betonada, era de poder eliminar possíveis interferências que poderiam ocorrer de uma betonada para outra. Cabe ressaltar que os corpos-de-prova para caracterização do concreto foram retirados desta mesma amostra.

As formas dos tirantes foram executadas em madeira de boa qualidade, com sistema de encaixe, utilizando-se parafusos para facilitar a desforma e a limpeza da mesma, conforme ilustra a Figura - 37.

Figura –37 Montagem das formas dos tirantes

3.4.2 Fabricação dos Tirantes

O procedimento adotado na confecção dos tirantes consiste em primeiramente engraxar as formas, colocando em seguida as barras de aço cuidadosamente, para que não sofram contaminação do óleo lubrificante.

Após fixação das barras de aço, os orifícios externos foram tampados com massa de calafetar, para não permitir que a barra se movimentasse durante o processo de adensamento. A Figura-38 ilustra a forma sobre a mesa vibratória pronta para concretagem.

Figura-38 – Formas untadas e posição das barras de aço.

Com a forma preparada, lança-se o concreto em duas camadas. Para melhor adensamento o concreto é espalhado manualmente, utilizando-se mesa vibratória para adensamento. A Figura 39 ilustra o adensamento.

Após concretagem, os tirantes passam por um processo de nivelamento, quando são removidas as asperezas por meio de uma desempenadeira. As formas foram cobertas na face exposta com sacos de aniagem úmidos, por um período de 3 dias; foi efetuada em seguida a desmoldagem, tomando-se cuidado para, além de não danificá-los, não exercer nenhum esforço sobre as barras. A Figura-40 ilustra as formas cobertas por sacos de aniagem úmidos.

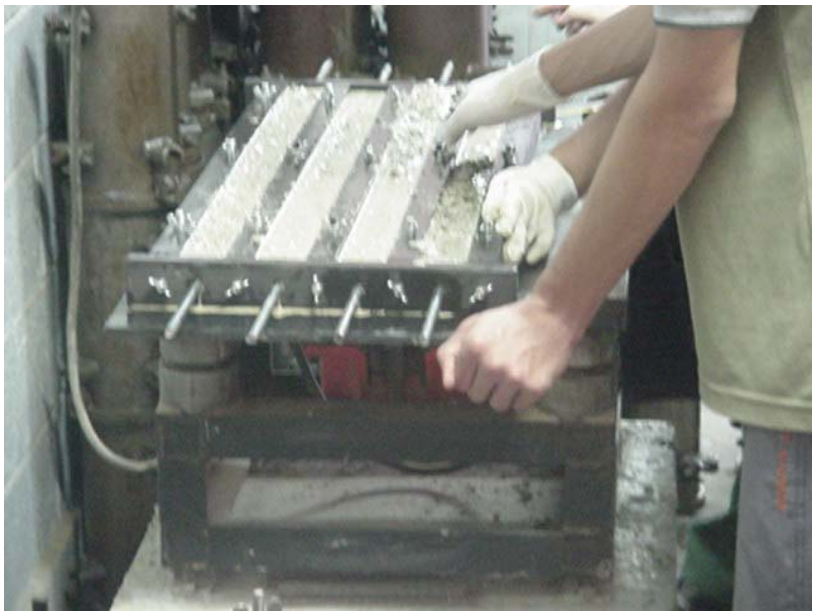


Figura- 39 – Adensamento dos tirantes utilizando mesa vibratória.

Figura – 40 –Formas cobertas com sacos de aniagem úmidos.

Após o período de três dias, os tirantes foram armazenados em câmara úmida. O objetivo de todo esse procedimento foi o de evitar a fissuração prematura do concreto.

Vale ressaltar que este procedimento foi realizado para todas as moldagens efetuadas, tanto para o concreto convencional quanto para o concreto com resíduos.

Os tirantes foram retirados da câmara úmida, três dias antes da realização do ensaio, ficando expostos para secagem até o dia do ensaio.

No segundo dia, estando os tirantes com aparência seca, é feita uma visualização minuciosa para detectar a presença de fissuras; após isto, o tirante recebe uma camada de tinta à base de cal, na cor branca, para melhor visualização do surgimento das fissuras.

3.4.3 Sistema de Carregamento

Após secagem da pintura, os tirantes são fixados cuidadosamente ao sistema de carregamento através de garras aplicadas às extremidades livres da barra como ilustra Figura-41. O equipamento utilizado para realizar os ensaios foi da marca Wolpert-Werke GMBH, com capacidade para 100 toneladas, localizado no Laboratório CESP de Engenharia Civil em Ilha Solteira-SP.

Figura- 41 – Sistema de Carregamento

O carregamento processou-se até atingir 80% da carga correspondente à tensão de escoamento da barra de aço, seguindo a determinação da norma NBR

7477. Para melhor observação do surgimento das fissuras, efetuaram-se cinco intervalos de carga. À medida que estas foram surgindo, elas foram marcadas para melhor identificação (Figura-42).

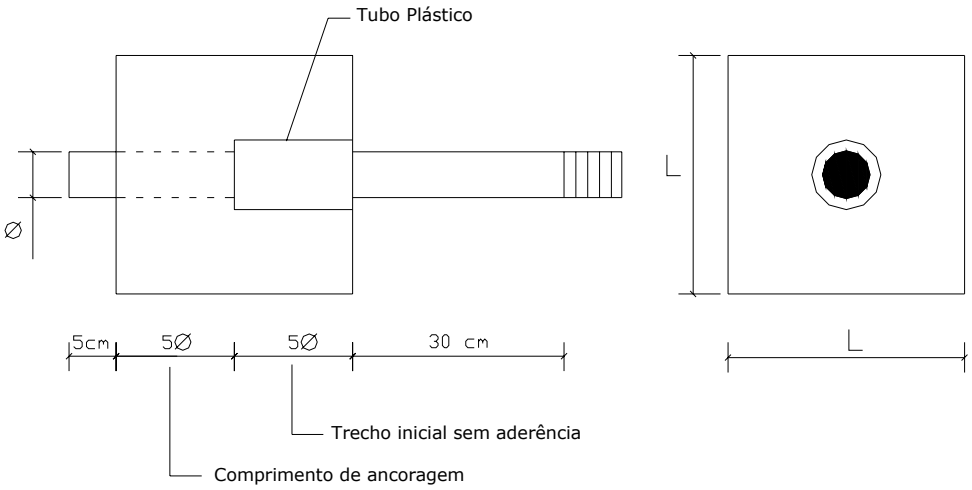
Figura-42 – Marcação das fissuras

3.4.4 Sistema de Leitura

Ao término da aplicação do carregamento máximo, as distâncias entre as fissuras são medidas, no eixo longitudinal, nas quatro faces do tirante e anotadas a fim de se realizar o cálculo do coeficiente de conformação superficial. Ressalta-se que só foram consideradas as fissuras que surgiram nas quatro faces do tirante.

3.5 Ensaio “Pull-Out-Test”

A confecção das formas obedeceram as recomendações da RILEM/CEB RC 6 (1983), ilustrada pela Figura 43. Salienta-se que, segundo a norma, a seção transversal dos moldes é de 200 mm, para barras de aço com diâmetro nominal igual ou inferior a 20.0 mm e de 10xØ, para as barras com diâmetro superior a 20,0 mm.



OBS.: L = 200 mm para Ø ≤ 20,0mm
L = 10 Ø para Ø > 20,0mm

Figura – 43 – Dimensão dos corpos-de-prova utilizados no ensaio “pull-out”

Para a confecção das formas utilizou-se madeira (cedrilho), seguindo rigorosamente as dimensões fornecidas pela norma. A Figura 44 ilustra a montagem das formas.

Figura – 44 – Confecção das formas para ensaios “Pull-Out”

Após a montagem, a forma recebeu pintura emborrachada, tornando-a impermeável e mais durável.

Para garantir o comprimento de ancoragem efetivo, que é de 5xØ segundo o RILEM/CEB RC 6 (1983), foi utilizado tubo plástico de PVC com espessura de 2 mm que envolveu a barra; as extremidades do tubo foi selada para o concreto não penetrar no seu interior.

Com as formas lubrificadas e as barras devidamente posicionadas, iniciou-se a concretagem em duas camadas, obedecendo à direção ilustrada na Figura 45. Para adensar o concreto, utilizou-se uma mesa vibratória.

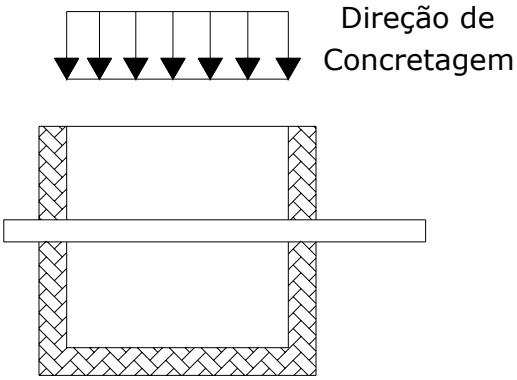


Figura – 45 –Direção da concretagem realizada

Após concretagem, os corpos-de-prova receberam acabamento e ficaram em uma sala, com a face exposta coberta por sacos de aniagem úmidos durante um período de 3 dias (Figura 46). A seguir efetuou-se a desmoldagem com todo cuidado para não exercer qualquer esforço sobre as barras.

Os corpos-de-prova foram armazenados em camera úmida, e retirados dois dias antes do ensaio, para que secassem a temperatura ambiente.

Figura – 46 –Moldes cobertos com sacos de aniagem úmidos

3.5.1 Sistema de Carregamento e Leitura

Antes da execução dos ensaios, todos os corpos-de-prova foram examinados com lente de aumento para verificar a presença de abertura de fissuras.

O sistema de carregamento, ilustrado na Figura 47, foi montado sobre cavalete de aço devidamente nivelado, com os apoios de madeira lubrificados, evitando o atrito com o aço, promovendo ao êmbolo do macaco, deslocamentos sem atrito.

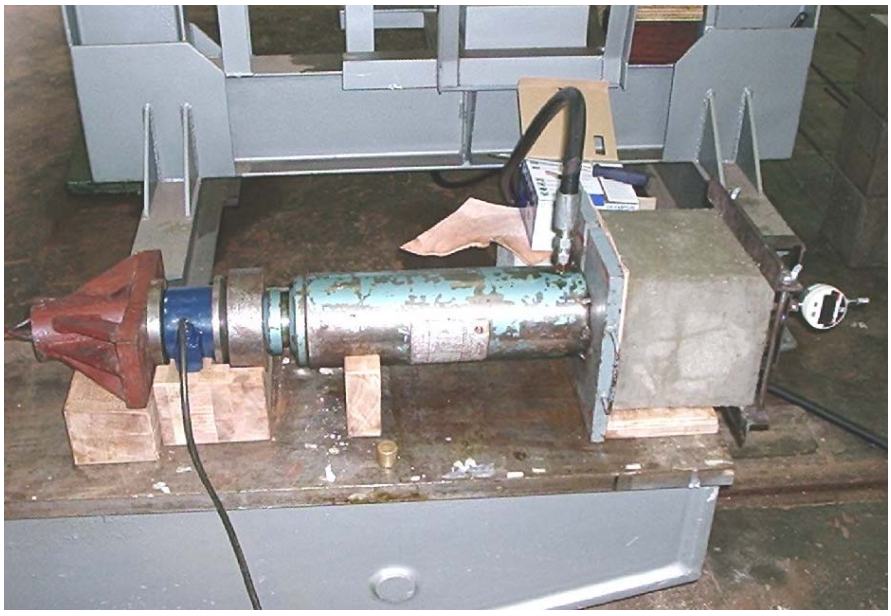


Figura 47 – Sistema montado para “pull-out-test”

Para aplicação da carga foi utilizado um macaco hidráulico de pistão vazado com capacidade de 1000 KN, conectado a uma bomba manual de pressão, ambos fabricados por Equipamentos Industriais Pontec LTDA.

As leituras das deformações ocorridas na célula de carga foram realizadas pelo indicador de deformação modelo T -832 da Transdutec, e os escorregamentos foram medidos por meio de um relógio comparador digital da marca Digico, com precisão de 0,001 mm e curso de 5,0 mm. O sistema utilizado está ilustrado na Figura 48.

Figura –48 – Sistema de Carregamento e Leitura.

Foi aplicada uma força de tração em um dos extremos da barra, pelo macaco hidráulico, que reagiu contra o corpo-de-prova. Os escorregamentos foram medidos pelo deflectômetro apoiado na extremidade oposta da barra. Uma placa de aço de 10 mm foi introduzida entre o macaco e o corpo-de-prova, para que a compressão fosse distribuída em toda a face. Como forma de capeamento, a face que recebeu a carga foi revestida com chapa em couro de 3 mm, com a função de eliminar qualquer concentração de tensão. A Figura 49 apresenta detalhe da placa de aço e chapa de couro.

Figura – 49 – Detalhe da placa de aço e chapa em couro utilizado.

Para realização do ensaio de arrancamento foram necessárias a utilização de três pessoas: uma para aplicar a carga e observar o deflectômetro avisando quando o escorregamento atinge valores pré-determinados de 0,01; 0,1; 0,2; 0;4.....; outra para ler a carga no Transdutec, e a terceira para anotar os resultados. O ensaio terminou quando a barra não suportou mais acréscimo de carga.

Os resultados obtidos com a execução dos ensaios aqui apresentados estão no capítulo 4, a seguir.

IV ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio de ensaios de arrancamento e de tirante, realizados para os dois tipos de concreto estudados (convencional e com incorporação de resíduos). Os ensaios foram realizados nas idades de 28 e 90 dias.

4.1 Ensaio de Tirante

Após a execução do ensaio, foram medidos os espaçamentos entre as fissuras com o intuito de se obter o coeficiente de conformação superficial. As Figuras – 50 a 52 ilustram os corpos de prova após realização dos ensaios.

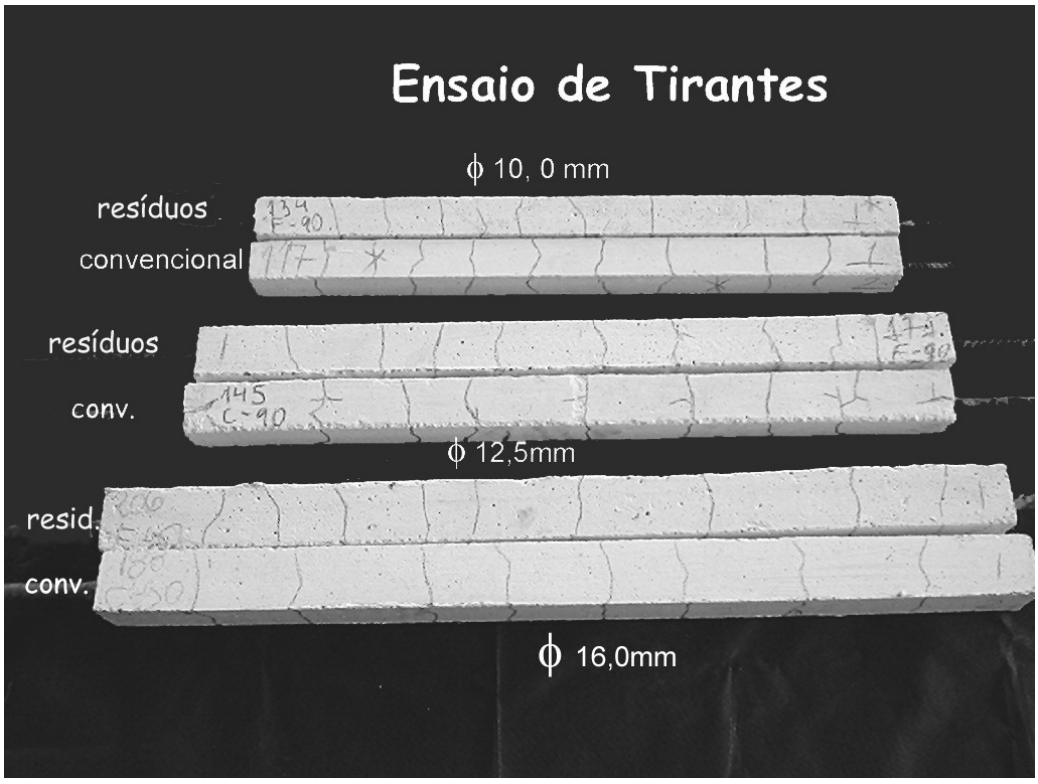


Figura – 50 – Comparação entre os corpos-de-prova fabricados com concreto convencional e com incorporação de resíduos de borracha, na idade de 90 dias.

Figura – 51 – Corpos-de-prova ensaiados – Concreto com resíduo 28 dias

Figura – 52 – Corpos-de-prova ensaiados – Concreto convencional 28 dias

Os valores obtidos dos espaçamentos médios entre as fissuras obtido para as idades de 28 e 90 dias estão apresentados na Tabela-10, na qual se encontram, também, os coeficientes de variação das amostras (CV). O CV é uma análise preliminar dos dados obtidos em um experimento que mede a variabilidade das observações. Geralmente, se os dados de uma amostra têm um CV igual ou maior a 25% a sua qualidade é considerada duvidosa.

Tabela – 10 – Espaçamento médio entre fissuras (cm) e CV (%)

Espaçamento médio entre fissuras – 28 dias												desvio padrão	CV
ϕ	Concreto	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	XM		
10,0	com resíduo	7,73	7,14	4,05	7,50	9,02	7,00	7,18	7,12	7,16	***7,43***	1,302	*17,53*
	convencional	8,13	6,88	7,82	9,87	7,72	7,00	9,00	7,31	7,76	***7,94***	0,961	*12,10*
12,5	com resíduo	8,65	8,13	8,23	8,27	8,73	8,60	7,51	8,62	8,35	***8,34***	0,378	*4,53*
	convencional	6,98	7,61	8,65	8,45	8,79	7,24	7,69	7,13	7,00	***7,73***	0,725	*9,37*
16,0	com resíduo	7,43	7,82	9,65	8,10	7,85	9,39	9,35	8,65	9,07	***8,59***	0,814	*9,48*
	convencional	7,98	7,68	7,51	9,38	7,87	7,93	7,28	8,23	7,81	***7,96***	0,598	*7,52*
Espaçamento médio entre fissuras – 90 dias													
10,0	com resíduo	6,75	7,59	7,16	6,95	6,72	6,78	5,86	7,54	7,72	***7,01***	0,578	*8,25*
	convencional	8,19	8,29	7,68	7,64	7,14	8,13	8,34	7,38	7,74	***7,84***	0,424	*5,41*
12,5	com resíduo	8,21	8,13	8,23	8,27	8,29	8,60	7,51	8,62	8,35	***8,25***	0,323	*3,92*
	convencional	7,48	7,71	7,72	7,93	7,95	7,18	7,26	7,46	7,75	***7,60***	0,275	*3,62*
16,0	com resíduo	8,85	8,09	7,94	8,39	8,26	8,46	8,18	8,51	8,78	***8,38***	0,303	*3,62*
	convencional	7,46	7,86	7,81	7,93	7,66	7,55	7,76	7,50	7,93	***7,72***	0,182	*2,36*

em que : ϕ diâmetro da barra;
X1, X2, X3...X9 são o numero de tirantes ensaiados;
XM média dos nove tirantes;
CV coeficiente de variação da amostra.

Por sua vez, a Tabela-11 apresenta um resumo dos valores mostrados na Tabela 10.

Tabela-11 - Resumo dos valores obtidos de XM e CV.

ENSAIOS REALIZADOS AOS 28 DIAS				
diâmetro da barra (mm)	concreto convencional		concreto com 10 % de resíduo	
	XM	C.V.	XM	C.V.
10.0	7,94	12,1	7,43	17,53
12.5	7,73	9,37	8,34	4,53
16.0	7,96	7,52	8,59	9,48

ENSAIOS REALIZADOS AOS 90 DIAS				
diâmetro da barra (mm)	concreto convencional		concreto com 10 % de resíduo	
	XM	C.V.	XM	C.V.
10.0	7,84	5,41	7,01	8,25
12.5	7,60	3,62	8,25	3,92
16.0	7,72	2,36	8,38	3,62

em que XM = média das distâncias dos nove CPs em cm
CV = coeficiente de variação em %

Analisando a Tabela 11 verifica-se que todas as amostras apresentaram um coeficiente de variação inferior a 25%, o que conduz a concluir que os resultados obtidos apresentaram uma boa qualidade.

Observa-se que os coeficientes de variação obtidos para o concreto convencional foram menores do que os obtidos para o concreto com adição de resíduo, com exceção para a barra de 12,5 mm aos 28 dias.

À medida que o diâmetro das barras cresce há uma diminuição do valor do coeficiente de variação. Além disso, observa-se que o CV obtido para as amostras ensaiadas na idade de 90 dias foram maiores que aquelas ensaiadas aos 28 dias.

Concluída a análise preliminar dos resultados, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de conformação superficial, também chamado por diversos autores de coeficiente de aderência, de acordo com a norma NBR 7477, utilizando-se a equação (4). A Tabela 12 mostra os resultados obtidos.

$$\eta = \frac{2{,}25 \times d}{\Delta\ell \text{ médio}} \qquad \text{Equação (4)}$$

onde:

η = coeficiente de conformação superficial (coeficiente de aderência);

d = lado da seção do tirante;

$\Delta\ell$ = distância media entre fissuras, considerando as quatro faces

Tabela – 12 – Coeficiente de conformação superficial das barras estudadas

Diâmetro da Barra (mm)	Concreto Convencional		Concreto com Resíduos	
	dias		dias	
	28	90	28	90
10,0mm	1,36	1,38	1,45	1,54
12,5mm	1,57	1,60	1,46	1,53
16,0mm	1,72	1,78	1,60	1,64

Para melhor avaliar o comportamento da aderência foram elaborados gráficos da evolução do coeficiente de conformação superficial para as barras de aço de 10,0 mm; 12,5 mm e 16,0 mm que estão ilustrados nas Figuras – 53 ,54 e 55, respectivamente.

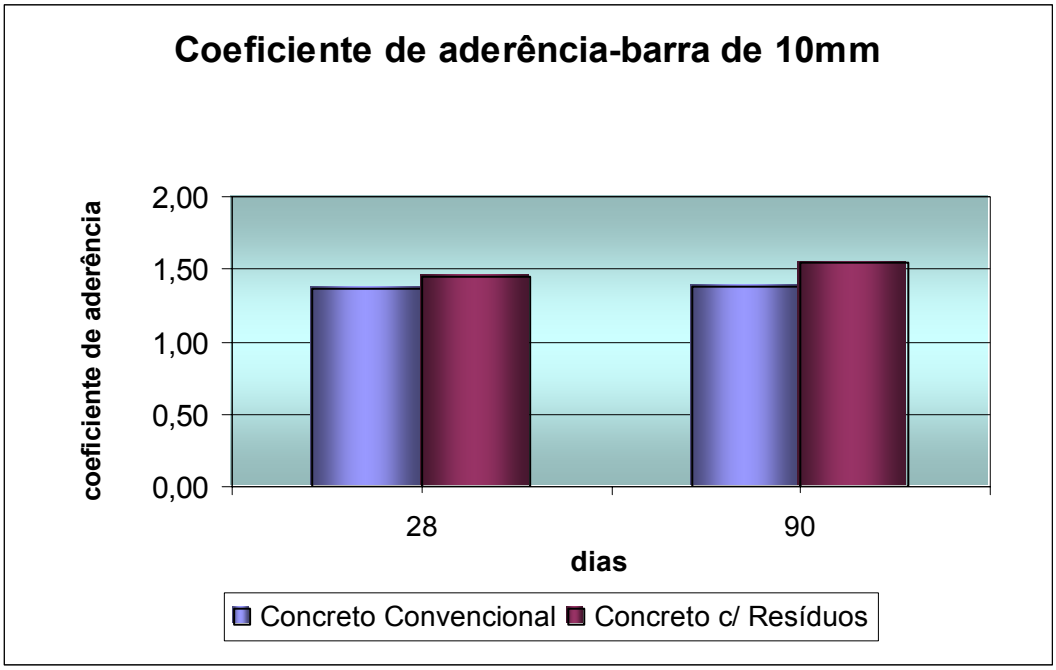


Figura – 53 – Coeficiente de aderência da barra de aço Ø 10,0 mm

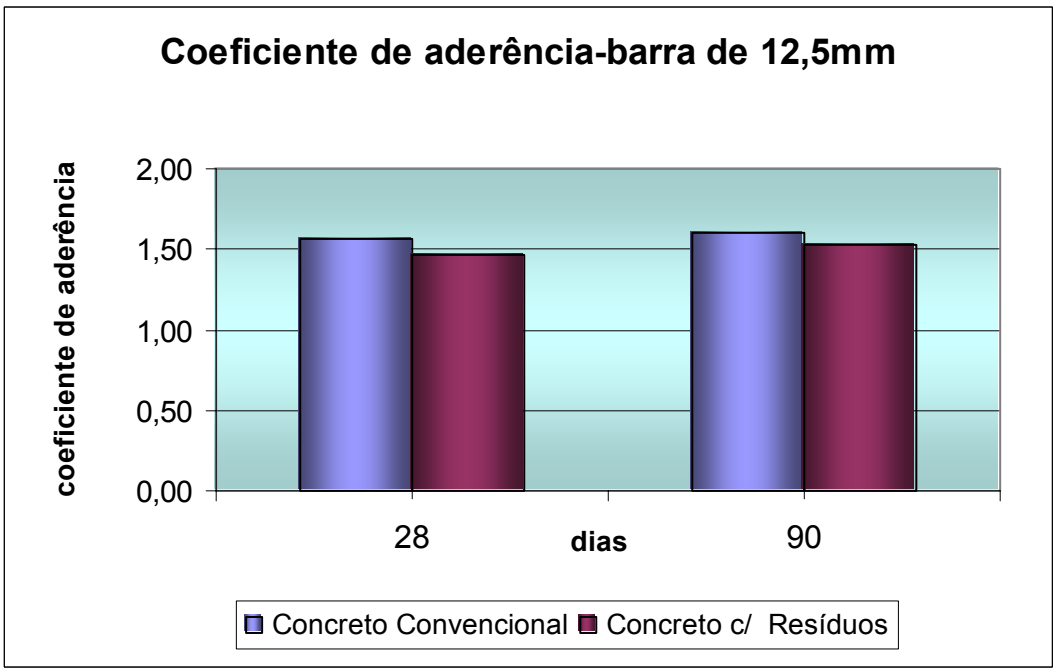


Figura – 54 – Coeficiente de aderência da barra de aço Ø 12,5 mm

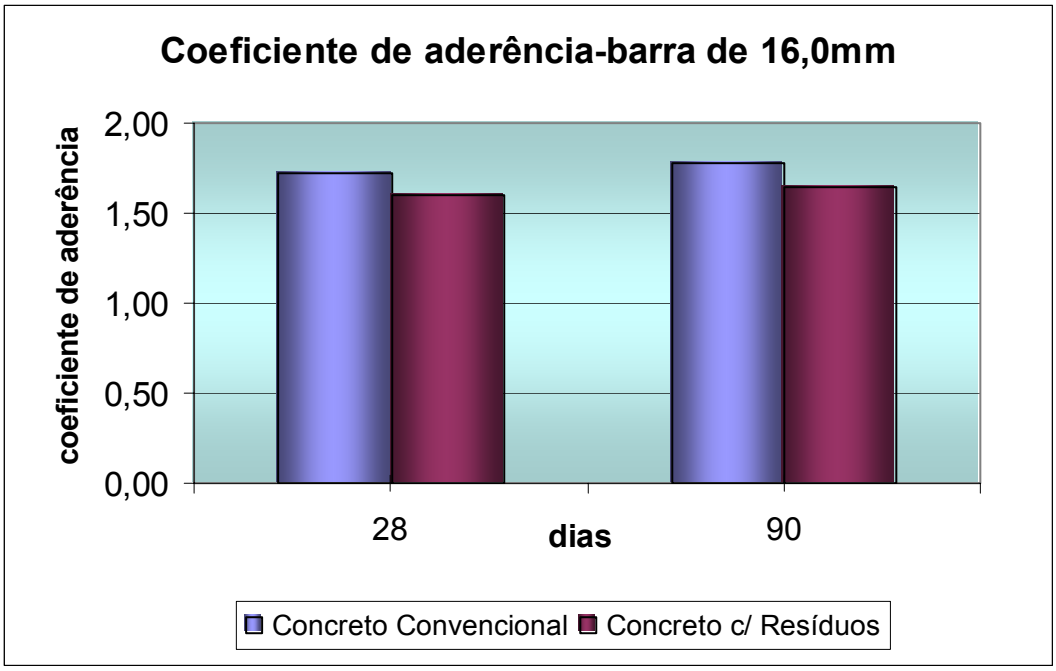


Figura – 55 – Coeficiente de aderência da barra de aço Ø 16,0 mm de

Podemos observar que à medida que se aumenta o diâmetro da barra há um incremento no coeficiente de conformação (η), ilustrado na Tabela 13. Este fato também foi observado por BARBOSA (2001) que estudou o comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência.

Tabela- 13 - Aumento em porcentagem do (η) em relação ao aumento do diâmetro da barra

Φ (mm)	Concreto Convencional		Concreto com Resíduos	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
~~10,0~~ 12,5	+ 15,44%	+ 15,94%	+ 0,69%	-0,65%
12,5 → 16,0	+ 9,55%	+ 11,25%	+ 9,59%	+ 7,19%

Observando a Tabela - 13 conclui-se que o aumento do diâmetro da barra gera um acréscimo mais expressivo no coeficiente de aderência no concreto convencional que ao concreto com incorporação de resíduos.

Observou-se também que o aumento da idade de cura aumenta o coeficiente de conformação superficial (**η**), num valor médio de 2%. O concreto convencional apresentou valores de **η** maiores que os do concreto com incorporação de resíduos, por volta de 7%.

A NBR 7480/1996 determina que o valor mínimo para o coeficiente de conformação superficial seja igual a 1,5 para as barras de aço de diâmetro nominal igual ou superior a 10,0 mm. Frente a isto constatou-se que para as barras de aço com diâmetro de 10 mm, utilizando o concreto convencional (28 e 90 dias), os valores obtidos do coeficiente de conformação superficial não atendem a normalização brasileira; já, para o concreto com adição de resíduo, só na idade de 90 dias atendeu o valor solicitado pela norma.

Para as barras de 12,5 mm utilizando concreto convencional, este valor foi atendido nas duas idades (28 e 90 dias), mas para o concreto com resíduo de borracha aos 28 dias o valor obtido foi ligeiramente inferior ao solicitado pela norma, sendo que o resultado obtido aos 90 dias superou o exigido.

Para as barras de 16,0mm, tanto para o concreto convencional como para o concreto com resíduos o valor exigido pela norma foi superado.

Com os valores da resistência à tração e as distâncias das fissuras podemos calcular conforme equação (1), anteriormente citada, a tensão média de aderência segundo CASTRO (2000). A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos com os ensaios realizados para o concreto convencional e o concreto com resíduos nas idades de 28 e 90 dias.

Tabela – 14 – Tensão de aderência segundo Castro (2000)

Tensão de aderência (MPa) segundo Castro (2000)				
ϕ (mm)	Concreto convencional		Concreto c/ resíduos	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
10,0	4,78	5,26	3,34	3,65
12,5	4,93	5,44	2,99	3,12
16,0	4,71	5,28	2,86	3,02

Segundo a normalização brasileira, obtém-se a tensão de aderência com a expressão: Equação (5)

$f_{cb} = \eta 1 \,.\, \eta 2 \,.\, \eta 3 \,.\, f_{ctd}$ Equação (5)

em que:

f_{cb} – tensão de aderência;

$\eta 1$ - 1,0 para barras lisas; 1,2 para barras dentadas e 2,25 para barras nervuradas

$\eta 2$ - 1,0 para situação de boa aderência; 0,7 caso contrário;

$\eta 3$ - (132- Ø)/100 para Ø >32mm ; 1,0 para Ø ≤ 32,0 mm

f_{ctd} - valor característico da resistência à tração do concreto

Por meio desta equação foi possível obter o valor da tensão de aderência, que é mostrado na Tabela-15:

Tabela – 15 – Tensão de aderência segundo a ABNT

Tensão de aderência (MPa), segundo ABNT				
	Concreto Convencional		Concreto c/ Resíduos	
	idade		idade	
Ø (mm)	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
Ø ≤ 32	8,03	8,73	5,26	5,43

Analisando as Tabelas 14 e 15 pode-se concluir com os resultados obtidos, que a tensão de aderência aumenta em torno de 8% com o aumento da idade de 28 para 90 dias para o concreto convencional e em torno de 4% pra o concreto com incorporação de resíduos. Observa-se também que a tensão média do concreto convencional é 53% em média, maior que a o concreto com incorporação de resíduos.

Comparando os valores obtidos através da utilização da equação de CASTRO(2000), observa-se que a NB1 superestima os valores de tensão de aderência obtidos no ensaio de conformação superficial. Este comportamento também foi observado por BARBOSA (2002), que estudou a tensão média de aderência obtida no ensaio de conformação superficial em concretos com diferentes classes de resistências à compressão.

Analisando a tensão de aderência segundo Castro (2000) observa-se para o concreto com resíduos uma diminuição da mesma quando aumentamos o

diâmetro da barra nas duas idades: 28 e 90 dias. Observando o concreto convencional nota-se um acréscimo no valor da tensão do aço de 10,0 mm para o 12,5mm e um decréscimo de 12,5 mm para o de 16,0mm para as duas idades estudadas, o que pode ser justificado pelas características geométricas do aço.

4.2 "Pull-Out-Test"

Com a realização do ensaio de pull-out foi possível obter o valor da carga para os valores determinados dos deslocamentos (0,01;....0,1;...1,0...). Com estas cargas, utilizando a equação (6) obtém-se a tensão de aderência.

$$\tau = \frac{P}{\pi \,.\, \varnothing \,.\, La} \qquad \text{Equação (6)}$$

em que:

τ - tensão de aderência (MPa);

$\varnothing$ - diâmetro da barra (cm);

P – carga aplicada (kN);

La – comprimento de ancoragem (5$\varnothing$)(cm).

Para o cálculo da tensão média de aderência, o CEB RC5 (1983) recomenda o emprego da média dos valores correspondentes aos deslizamentos 0,01 (pequeno), 0,1 (serviço) e 1,0 (ruptura). As Tabelas 16 a 19 apresentam os valores da tensão de aderência para os dois tipos de concreto utilizando o aço de 10,0 mm nas idades de 28 e 90 dias.

Tabela – 16 – Tensão de aderência (MPa) Concreto convencional 10,0mm-28dias

CONCRETO ***CONVENCIONAL*** -BARRAS DE ***10,0 MM*** - 28 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
500	0,93	1,86	2,74	3,33									3,33
501	0,95	1,59	2,17	2,52									2,52
502	1,12	1,94	2,43										2,43
503	1,01	2,50	3,23	3,90	4,17	4,32	4,35						4,35
504	1,08	1,91	2,81	3,77	4,01	4,11	4,12	4,17	4,18				4,18
505	1,10	1,28	1,57	2,38	2,89	3,25	3,46	3,69					3,69
506	0,84	1,56	2,62	3,80									3,80
507	1,26	2,10	2,80	3,49	3,89								3,89
508	1,04	1,92	2,76	3,72	4,24	4,40							4,40
509	1,26	2,57	3,09										3,09
510	1,04	2,21	3,08	3,38	3,49	3,52	3,53						3,53
511	1,10	2,23	2,59	2,86									2,86
512	1,08	2,61	3,38										3,38
513	1,28	2,34	3,26										3,26
514	1,04	2,32	2,70	2,88									2,88
Média	***1,08***	***2,06***	***2,75***	***3,27***	***3,78***	***3,92***	***3,87***	***3,93***	***4,18***				***3,44***

Tabela – 17 – Tensão de aderência (MPa) Concreto com resíduo- 10,0mm-28dias

CONCRETO ***COM RESÍDUO*** -BARRAS DE ***10,0 MM*** - 28 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
530	0,68	1,09	1,29	1,71	2,05	2,40	2,52	2,66	2,71	2,66			2,71
531	0,50	0,85	0,94	1,55	1,93	2,15	2,24						2,24
532	0,55	0,98	1,40	1,90	2,20	2,33	2,43						2,43
533	0,51	0,64	0,83	1,39	1,81	2,03	2,21	2,24					2,24
534	0,48	0,98	1,34	1,77	2,03	2,19	2,24						2,24
535	0,50	0,88	0,67	1,03	1,36	1,64	1,80	1,79					1,80
536	0,51	0,72	1,08	1,46	1,68	1,76							1,76
537	0,54	0,96	1,43	2,09	2,45	2,61	2,61						2,61
538	0,42	0,61	1,02	1,77	2,07	2,31	2,32						2,32
539	0,44	0,49	0,61	0,99	1,16	1,32	2,34	1,47					2,34
540	0,62	0,86	2,19	3,01	3,33	3,51	3,21	3,56					3,56
541	0,19	0,68	1,03	1,69	1,94	2,23	2,37	2,41					2,41
542	0,54	0,85	2,03	2,93	3,44	3,63							3,63
543	0,56	1,08	1,62	2,61	2,92	3,00	2,38						3,00
544	0,48	0,77	1,19	1,89	2,28	2,48	2,52						2,52
Média	***0,50***	***0,83***	***1,24***	***1,85***	***2,18***	***2,37***	***2,40***	***2,36***	***2,71***	***2,66***			***2,52***

Tabela – 18 – Tensão de aderência, (MPa) Concreto convencional- 10,0mm-90dias

CONCRETO ***CONVENCIONAL*** -BARRAS DE ***10,0 MM*** - 90 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
515	1,33	2,50	2,85	3,62	3,97	4,11	4,21	4,21	4,24				4,24
516	2,20	3,69	4,42	4,85	4,99	5,02	5,03						5,03
517	1,65	2,80											2,80
518	1,80	3,49	4,16	4,58	4,73	4,80	4,84	4,84					4,84
519	1,42	2,54	3,13	4,33									4,33
520	2,20	3,44	4,19										4,19
521	1,64	2,13	2,84	3,44	3,82	3,99	4,03	4,05	3,98				4,05
522	1,30	2,54	3,44	4,19									4,19
523	1,64	2,70	2,39	3,60	3,76	3,71							3,76
524	1,32	2,29	3,12	3,70	3,98								3,98
525	1,76	3,60											3,60
526	1,71	2,73	3,78	4,38	4,54								4,54
527	1,58	2,83	3,70										3,70
528	1,55	2,73	3,66	4,09									4,09
529	1,65	2,06	2,77	3,98	4,46	4,73	4,85						4,85
Média	***1,65***	***2,80***	***3,42***	***4,07***	***4,28***	***4,39***	***4,59***	***4,37***	***4,11***				***4,15***

Tabela – 19 – Tensão de aderência(MPa) Concreto com resíduo- 10,0mm-90dias

CONCRETO ***COM RESÍDUO*** -BARRAS DE ***10,0 MM*** - 90 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
545	0,94	1,13	1,52	2,46	2,99	3,25							3,25
546	0,86	1,09	1,34	2,07	2,61	3,05	2,76	3,32	3,34				3,34
547	0,85	1,08	0,88	1,26	1,32	1,39	2,70						2,70
548	0,82	1,01	1,35	1,72	1,93	2,08	2,64	2,31					2,64
549	0,91	1,15	1,07	1,56	1,96	2,17	2,26	2,35					2,35
550	0,93	1,16	0,77	1,49	2,14	2,40							2,40
551	0,84	1,21	1,35	1,56	1,75	1,82							1,82
552	0,95	1,22	2,32	2,74	2,97	3,04	3,11						3,11
553	0,92	1,17	1,62	2,27	2,57	2,81	2,83	2,88					2,88
554	0,81	1,18	2,07	2,62	2,85	2,62	2,73	2,98	3,01				3,01
555	0,87	1,23	1,43	1,82	2,14	2,34							2,34
556	0,89	1,43	1,76	2,50	2,95	3,25	2,76						3,25
557	0,89	1,54	2,24	2,59	2,78	2,91	2,90						2,91
558	0,93	1,21	1,28	2,25	2,59	2,62	2,74	2,79					2,79
559	0,91	1,09	1,82	2,70	3,02	3,15							3,15
Média	***0,89***	***1,19***	***1,52***	***2,11***	***2,44***	***2,59***	***2,74***	***2,77***	***3,17***				***2,80***

A evolução da tensão de aderência dos concretos em estudo podem ser visualizada através dos gráficos da Figura-56.

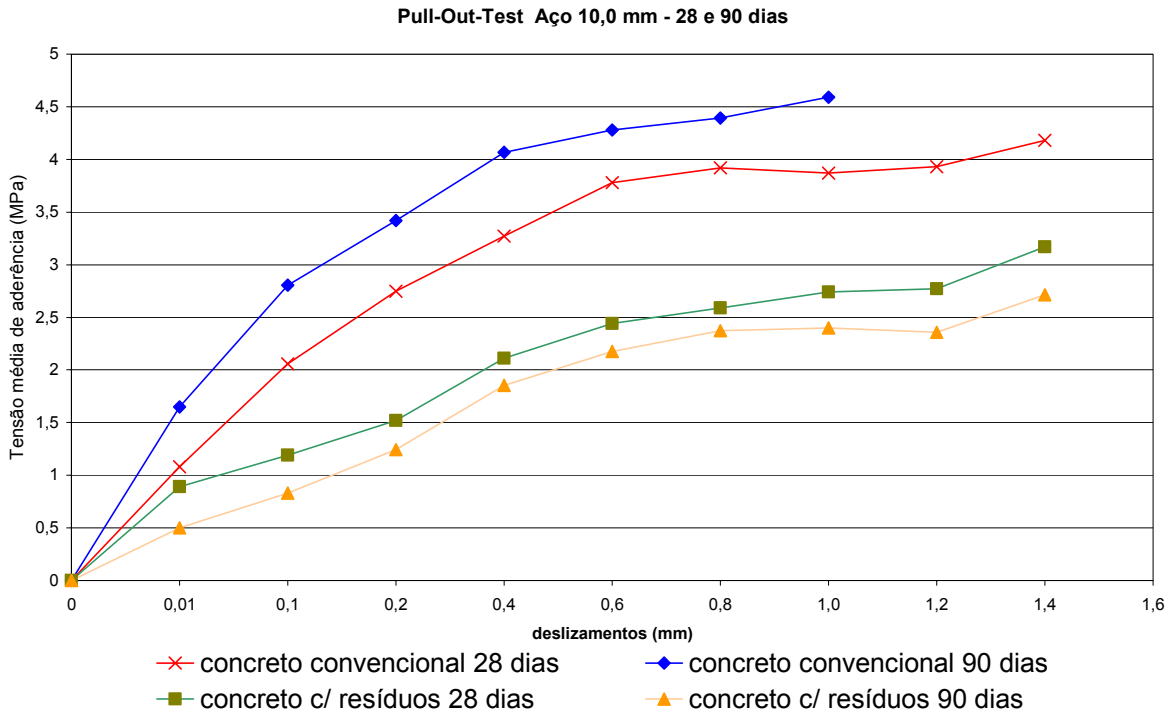


Figura 56 – Tensão de aderência x deslizamentos –aço 10,0 mm

Podemos observar que o concreto com incorporação de resíduos apresentou um decréscimo de tensão de aderência comparado ao concreto convencional, mas a curva de tensão x deslizamento tem o comportamento bem parecido com o convencional. Os dois tipos de concreto tiveram acréscimos nas tensões de aderência de 28 para 90 dias.

As Tabelas de 20 a 23 apresentam os valores da tensão de aderência obtidos dos ensaios realizado com o aço de diâmetro 12,5 mm, para os dois tipos de concreto: o convencional e concreto com incorporação de resíduo de borracha, nas idades de 28 e 90 dias.

Tabela – 20 – Tensão de aderência (MPa) - Concreto convencional – 12,5 mm - 28 dias

CONCRETO ***CONVENCIONAL*** -BARRAS DE ***12,5 MM*** - 28 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
590	1,48	3,01	5,07										5,07
591	1,42	2,25	2,88	4,00	5,09								5,09
592	1,45	2,52	2,16	4,87	6,25	6,80	7,01	6,99					7,01
593	1,41	1,96	2,55	5,84	7,21	7,69	8,12	8,25	8,31				8,31
594	1,51	2,51	1,31	1,92	2,65	3,40	3,89	4,32	4,44	4,46			4,46
595	1,48	2,77	3,72	5,27	6,29	6,63	6,97	7,14	7,21				7,21
596	1,52	2,84	3,71	5,36	6,36	6,71	6,88	6,98	6,99	6,97			6,99
597	1,48	3,01	4,24	5,58	6,28	6,60	6,68	6,67	6,73				6,73
598	1,62	3,32	4,36	5,39									5,39
599	1,56	2,60	4,37	5,03	5,47	5,70	5,82	5,82					5,82
600	1,23	2,07	2,65	3,97	5,11	6,02	6,28	6,33	6,37				6,37
601	1,56	2,63	3,56	4,91	5,86	6,14	6,13	6,12					6,14
602	1,27	2,40	3,74	5,12	5,97	6,36	6,41	6,48					6,48
603	1,48	2,52	5,19	6,34	6,81	7,05	7,13	7,13					7,13
604	1,49	2,05	2,54	3,61	4,35	4,93	5,38	5,77	5,86				5,86
Média	***1,46***	***2,56***	***3,47***	***4,80***	***5,67***	***6,17***	***6,39***	***6,50***	***6,56***	***5,71***			***6,27***

Tabela – 21 – Tensão de aderência (MPa) – Concreto c/ resíduo – 12,5 mm - 28 dias

CONCRETO ***COM RESÍDUO*** BARRAS DE ***12,5 MM*** - 28 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
620	0,74	0,93	1,68	2,35	2,68	2,82	2,91						2,91
621	0,79	0,85	0,87	1,37	1,65	2,25	2,60	2,85	2,91				2,91
622	0,70	0,87	1,23	1,91	2,41	2,68	2,87	2,94	3,04	3,15			3,15
623	0,75	0,93	1,26	1,86	2,17	2,39	2,51	2,55					2,55
624	0,69	0,93	0,76	1,56	2,14	2,43	2,57	2,72	2,74				2,74
625	0,76	0,92	0,94	1,54	1,97	2,24	2,45	2,65	2,74				2,74
626	0,68	0,92	1,26	1,83	2,21	2,31	2,37	2,40					2,40
627	0,72	1,02	2,02	2,68	2,99	3,05	3,31	3,33					3,33
628	0,73	0,94	0,91	1,68	2,28	2,63	2,88	2,94					2,94
629	0,73	1,05	2,42	3,28	3,70	3,93	3,93						3,93
630	0,72	1,05	1,23	1,64	2,10	2,53	2,75	2,94	3,05				3,05
631	0,69	0,94	0,91	1,42	1,81	2,00	2,10	2,15	2,23	2,29			2,29
632	0,76	1,13	1,32	1,93	2,54	2,73	2,86	3,08	3,18				3,18
633	0,59	0,85	0,79	1,20	1,74	2,17	2,46	2,53	2,63				2,63
634	0,60	0,80	1,34	2,13	2,45	2,76	2,83	2,89	2,99				2,99
Média	***0,71***	***0,94***	***1,26***	***1,89***	***2,32***	***2,59***	***2,76***	***2,77***	***2,83***	***2,72***			***2,92***

Tabela – 22 – Tensão de aderência (MPa) - Concreto convencional – 12,5 mm - 90 dias

CONCRETO **CONVENCIONAL** - BARRAS DE 12,5 MM - 90 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
605	1,82	3,71	4,60	5,47	5,84	6,06	6,30	6,30					6,30
606	2,03	3,59	4,38	5,43	6,05	6,36	6,66	6,69					6,69
607	1,54	3,02	5,58	6,56	6,84								6,84
608	1,71	3,11	3,84	4,86	5,15	5,30	5,35	5,47					5,47
609	1,58	3,45	4,60	5,67	6,24	6,48	6,60	6,72	6,81				6,81
610	1,45	2,94	2,44	3,25	3,95	6,20	7,45	7,52					7,52
611	1,68	1,88	2,97	4,51	5,17	5,35	5,45	5,59					5,59
612	2,35	3,06	4,00	5,05	5,79	6,12	6,27	6,47	6,48				6,48
613	1,19	3,09	4,01	4,78	5,09	5,16	5,19	5,16					5,19
614	1,80	2,82	3,69	5,61	7,45	7,48	8,41	8,42					8,42
615	1,64	2,54	3,66	5,36	5,88								5,88
616	1,64	3,50	4,99	6,23	7,14	7,50	7,76	7,87					7,87
617	1,65	2,98	2,51	3,50	4,35	5,24	5,27	5,59	5,60				5,60
618	1,37	2,57	3,23	4,03	4,48	7,35	7,49	7,52					7,52
619	1,45	2,82	3,77	4,85	5,58	5,82	6,01	6,16	6,04				6,16
Média	***1,66***	***3,01***	***3,88***	***5,01***	***5,67***	***6,19***	***6,48***	***6,58***	***6,23***				***6,56***

Tabela – 23 – Tensão de aderência (MPa) – Concreto c/ resíduo - 12,5 mm - 90 dias

CONCRETO **COM RESÍDUO** - BARRAS DE 12,5 MM - 90 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
635	1,30	1,39	1,65	2,25	2,69	3,00	3,18	3,41	3,43	3,52	3,38		3,52
636	0,88	0,97	1,17	1,62	2,11	2,41	3,12	2,74	2,78	2,86			3,12
637	0,87	1,28	0,97	1,37	1,73	2,11	2,32	2,48	2,52	2,61	2,63		2,63
638	0,99	1,30	1,68	2,18	2,53	2,68	2,81	2,85	2,86	2,85			2,86
639	1,04	1,64	2,03	2,58	3,03	3,29	3,20	3,47	3,36				3,47
640	1,30	1,56	1,96	2,68	3,20	3,44	3,40	3,70	3,69				3,70
641	1,50	1,63	2,15	3,03	3,54	3,79	3,11	4,05					4,05
642	1,25	1,36	1,59	2,21	2,62	2,86	3,07	3,21	3,31				3,31
643	1,19	1,28	1,68	2,37	2,89	3,23	3,42	3,53	3,52				3,53
644	0,96	0,80	1,03	1,79	2,45	2,79	3,11	3,03	3,01				3,11
645	0,96	1,48	2,03	2,86	3,43	3,68	3,90	4,01	4,01				4,01
646	0,97	1,33	1,16	1,88	2,49	2,78	3,00	3,14	3,20	3,29	3,35		3,35
647	0,76	1,16	1,58	2,16	2,56	2,81	2,89	2,95	2,82				2,95
648	0,89	0,83	0,98	1,40	1,86	2,23	3,12	2,58	2,66	2,66			3,12
649	0,91	1,08	1,48	2,16	2,58	2,77	2,95	3,08	3,02				3,08
Média	***1,05***	***1,27***	***1,54***	***2,17***	***2,65***	***2,92***	***3,11***	***3,21***	***3,16***	***2,96***	***3,12***		***3,32***

O comportamento dos concretos em estudo estão ilustrados pela Figura-57 que apresenta o gráfico de tensão de aderência x deslizamentos.

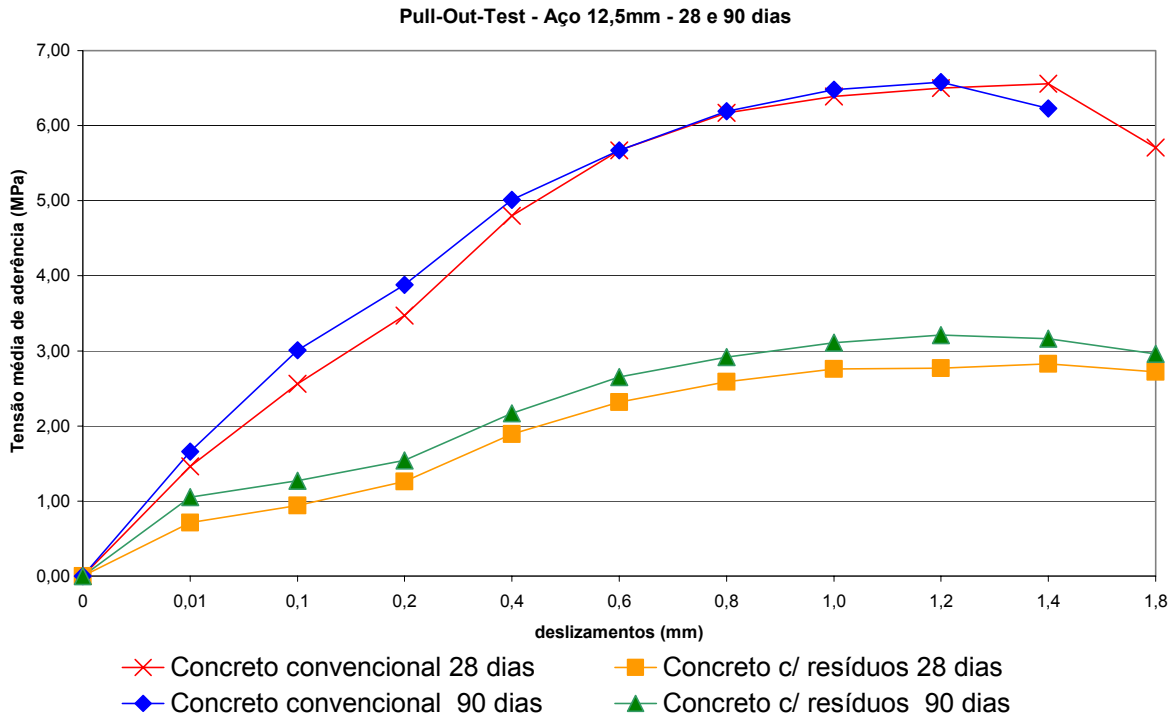


Figura 57 – Tensão de aderência x deslizamentos – aço 12,5 mm

Observando a evolução da tensão de aderência para as barras de aço de diâmetro de 12,5 mm, notamos um decréscimo no concreto com utilização de resíduos comparado com o concreto convencional, comportamento similar às barras de aço de diâmetro de 10,0mm. Vale ressaltar que houve acréscimo na tensão de aderência das idades de 28 para 90 dias. O concreto com resíduos apresentou acréscimo constante da idade de 28 para 90 dias.

As Tabelas de 24 a 27 apresentam os valores da tensão de aderência obtidos dos ensaios realizado com o aço de 16,0 mm, para os dois tipos de concreto o convencional e com utilização de resíduo de borracha nas idades de 28 e 90 dias.

Tabela – 24 – Tensão de aderência (MPa) - Concreto convencional – 16,0 mm - 28 dias

CONCRETO ***CONVENCIONAL*** -BARRAS DE ***16,0 MM*** - 28 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
650	1,50	4,19	6,79	10,27	12,03	12,85	13,58	14,03	14,48				14,48
651	1,42	3,41	3,03	5,25	6,60	7,47	11,61	8,54	8,96	9,06			11,61
652	1,36	3,43	4,01	5,88	7,22	7,97	8,52	9,02	9,37	9,91	9,97		9,97
653	1,60	3,29	6,25	9,68	11,29	12,55	13,25	13,40					13,40
654	1,32	3,90	3,11	5,98	7,70	9,06	9,71	10,35	11,08	11,40			11,40
655	1,81	4,62	7,43	10,62	12,37	13,13	13,56	13,61	13,50				13,61
656	1,42	4,60	6,93	9,78	11,74	13,04							13,04
657	1,46	4,18	6,56	9,97	11,98								11,98
658	1,74	3,38	5,10	6,99	8,54	9,74	10,49	11,26	11,50	11,95	11,55		11,95
659	1,94	4,20	6,14	8,37	10,02	11,29	11,97	12,56	12,94				12,94
660	1,77	3,42	4,73	6,77	8,24	9,15	10,07	10,58	11,08	11,27	11,41		11,41
661	1,91	3,95	8,50	11,00	12,68	13,76	14,42	15,01					15,01
662	1,79	3,89	5,27	8,35	10,37	11,35	12,03	12,66	13,16				13,16
663	1,92	4,63	8,42										8,42
664	1,39	3,93	7,26	10,38	12,35	14,37	11,75	15,61	15,96	15,34			15,96
Média	**1,63**	**3,93**	**5,97**	**8,52**	**10,22**	**11,21**	**11,75**	**12,22**	**12,20**	**11,49**	**10,98**		**12,56**

Tabela – 25 – Tensão de aderência (MPa) – Concreto c/ resíduo – 16,0 mm - 28 dias

CONCRETO ***COM RESÍDUO*** BARRAS DE ***16,0 MM*** - 28 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
680	1,36	1,64	2,28	3,42	4,09	4,32	4,69	4,83	5,04	5,17	5,09		5,17
681	0,80	1,46	2,10	3,08	3,84	4,50	5,07	5,50	5,78	6,00	5,32		6,00
682	1,22	1,48	1,28	2,04	2,59	2,93	4,18	3,44	3,58	3,75	3,82	3,21	4,18
683	1,12	1,99	3,00	4,45	5,34	6,34	6,63	6,78	6,98	7,09	6,98		7,09
684	0,96	1,59	1,99	2,75	3,43	3,84	4,39	4,54	4,65	4,90	4,79		4,90
685	1,14	1,06	1,51	2,14	2,70	3,18	4,62	3,84	4,07	4,23	4,44	3,84	4,62
686	1,01	1,50	2,06	3,15	3,97	4,39	4,78	5,00	5,10	5,34	5,29		5,34
687	1,18	1,57	1,69	2,59	3,28	3,84	4,24	4,57	4,75	4,95	4,89	3,59	4,95
688	1,19	1,80	2,56	3,64	4,24	4,82	4,85	5,42	5,60	5,58	5,52		5,60
689	1,38	1,63	1,69	2,38	2,93	3,31	3,67	4,12	4,39	4,72	4,64		4,72
690	1,16	1,92	2,43	3,18	3,73	4,12	4,32	4,54	4,80	4,88	4,73		4,88
691	1,20	1,36	1,63	2,54	3,48	4,19	4,68	5,14	5,32	5,45	5,42	4,10	5,45
692	1,25	1,60	3,00	4,14	4,89	5,49	4,63	6,02	6,08	6,26	6,17		6,26
693	1,19	1,59	2,65	3,92	4,73	5,28	4,72	5,65	5,92	5,79			5,92
694	1,59	1,65	2,05	2,76	3,33	3,73	4,23	4,24	4,28	4,34	4,30	2,69	4,34
Média	***1,18***	***1,59***	***2,13***	***3,08***	***3,77***	***4,29***	***4,65***	***4,91***	***5,09***	***5,23***	***5,10***	***3,49***	***5,30***

Tabela – 26 – Tensão de aderência (MPa) - Concreto convencional – 16,0 mm - 90 dias

CONCRETO ***CONVENCIONAL*** -BARRAS DE ***16,0 MM*** - 90 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
665	1,83	4,02	6,05	8,58	10,06								10,06
666	1,56	4,21	6,02	8,66	10,08	11,50	12,29	12,65	12,84	13,03			13,03
667	3,02	4,39	6,45	9,14	10,81	12,14	12,68	13,09	13,24	13,11			13,24
668	2,52	5,24	7,88	10,37	12,33	13,69	14,70	15,44	15,90				15,90
669	2,82	4,99	5,92	7,62	9,37	10,48	11,31	11,81	11,77				11,81
670	2,50	4,99	6,18	7,67	9,37	10,34	11,42	11,81	12,17	12,34	12,28		12,34
671	2,58	4,94	6,40	8,72	10,66	12,03	12,33	13,10	12,99				13,10
672	1,95	4,06	6,06	8,56	9,78	10,48	10,98	10,96	10,71				10,98
673	1,75	4,50	4,57	6,71	8,44	9,67	10,64	10,84					10,84
674	3,02	5,71	8,18	10,49	11,68	12,32	12,69	12,93	13,15				13,15
675	2,83	5,20	8,11										8,11
676	2,94	5,12	6,99	10,35	12,04	13,04	13,51	13,85					13,85
677	3,03	5,39	7,71	10,53	12,35	13,47	13,91	14,30	14,55	14,33			14,55
678	2,46	2,69	3,82	6,04	7,66	8,74	9,74	10,32	10,69	11,20	11,34		11,34
679	2,41	4,62	5,88	8,93	10,52	11,71	12,40	12,77	12,72				12,77
Média	**2,48**	**4,67**	**6,42**	**8,74**	**10,37**	**11,51**	**12,20**	**12,61**	**12,79**	**12,80**	**11,81**		**12,64**

Tabela – 27 – Tensão de aderência (MPa) – Concreto c/ resíduo – 16,0 mm - 90 dias

CONCRETO ***COM RESÍDUO*** BARRAS DE ***16,0 MM*** - 90 DIAS													
Nº CP	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,20	1,40	1,80	2,00	2,20	τu
695	2,11	2,81	3,84	4,95	5,60	5,92	6,28	6,42					6,42
696	1,86	2,40	4,05	5,99	6,98	7,67	6,32	8,01	8,02	7,97			8,02
697	1,40	2,21	2,39	3,33	4,20	4,60	5,12	5,17	5,22	5,48	5,22		5,48
698	2,36	2,48	2,81	3,68	4,40	5,00	5,43	5,79	6,13	6,27	6,23		6,27
699	1,93	2,73	3,45	4,38	4,98	5,39	5,54	5,97	6,12	5,95			6,12
700	1,94	2,31	3,20	4,40	4,93	5,23	5,27	5,39	5,43	5,62	5,53		5,62
701	2,18	2,68	3,15	4,33	4,93	5,22	5,44	5,63	5,68	5,70	5,73		5,73
702	1,65	2,45	4,02	5,42	6,29	6,86	6,96	6,21	7,02				7,02
703	1,55	2,60	3,30	4,32	5,44	5,58	5,94	6,08					6,08
704	2,20	2,68	3,10	3,93	4,55	4,99	5,34	5,62	6,09	5,89	6,05		6,09
705	1,30	2,10	2,20	2,41	2,71	3,01	4,25	4,32	4,33	3,38			4,33
706	1,71	2,05	2,45	3,14	3,95	4,52	5,02	5,19	5,30	5,42	5,57	3,72	5,57
707	1,76	2,08	2,50	3,18	3,62	4,00	4,51	4,53	4,70	5,00			5,00
708	1,90	2,74	3,28	4,32	5,37	6,34	6,69	7,09	7,21	7,58			7,58
709	1,54	2,01	2,09	3,18	3,90	4,30	4,81	4,92	4,97	5,17	5,09		5,17
Média	**1,83**	**2,42**	**3,06**	**4,06**	**4,79**	**5,24**	**5,53**	**5,76**	**5,86**	**5,79**	**5,63**	**3,72**	**6,03**

Segue abaixo Figura – 58 que ilustra os valores da tensão de aderência x deslizamentos para os aços de 16,0 mm.

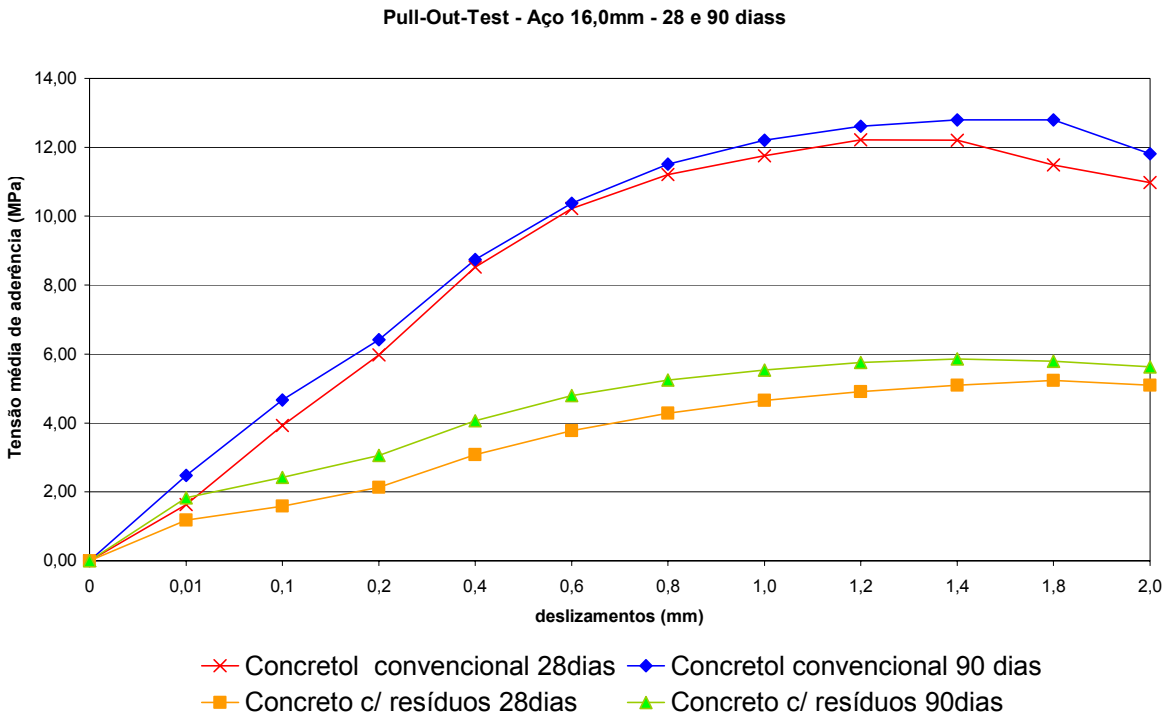


Figura 58 – Tensão de aderência x deslizamentos – aço 16,0 mm

O mesmo comportamento observado nos aços de diâmetro 10,0 e 12,5 mm foi observado para o aço de 16,0 mm, um decréscimo na tensão de aderência quando é incorporado o resíduo de borracha ao concreto. Observa-se também que há um incremento na tensão de aderência conforme se aumenta o diâmetro da barra, este comportamento foi observado também por diversos pesquisadores.

Como citado anteriormente, o CEB RC5 (1983) recomenda o emprego da média dos valores correspondentes aos deslizamentos 0,01 (pequeno), 0,1 (serviço) e 1,0 (ruptura) para se calcular o valor da tensão média ($\tau_{média}$). Na Tabela-28 estão ilustrados os valores obtidos no ensaio de 28 dias e na Tabela-29 os ensaios realizados aos 90 dias.

Tabela 28 – Tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem para idade de 28 dias

Tipo de Concreto	Ø (mm)	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{1,0}$ (MPa)	τ média (MPa)
Concreto Convencional	*10,0*	1,08	2,06	3,87	2,34
	12,5	1,46	2,56	6,39	3,47
	16,0	1,63	3,93	11,75	5,77
Concreto c/ Resíduos	*10,0*	0,50	0,83	2,40	1,24
	12,5	0,71	0,94	2,76	1,47
	16,0	1,18	1,59	4,65	2,47

Tabela 29 – Tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem para idade de 90 dias

Tipo de Concreto	Ø (mm)	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{1,0}$ (MPa)	τ média (MPa)
Concreto Convencional	*10,0*	1,65	2,80	4,59	3,02
	12,5	1,66	3,01	6,48	3,71
	16,0	2,48	4,67	12,20	6,45
Concreto c/ Resíduos	*10,0*	0,89	1,19	2,74	1,61
	12,5	1,05	3,01	3,11	2,39
	16,0	1,83	2,42	5,53	3,26

A forma de ruptura predominante dos corpos-de-prova está demonstrada na Tabela - 30.

Tabela 30 – Forma de ruptura da aderência

ϕ (mm)	Concreto Convencional		Concreto com Resíduos	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
10,0	ruptura aço	ruptura aço	deslizamento	deslizamento
12,5	deslizamento	deslizamento	deslizamento	deslizamento
16,0	deslizamento	deslizamento	deslizamento	deslizamento

Vale ressaltar que, durante o ensaio alguns corpos-de-prova confeccionados com concreto convencional e barras de aço de diâmetro de 16,0

mm apresentaram ruptura por fendilhamento, conforme ilustrado nas Figuras 59 e 60. De acordo com BARBOSA (2002) a ruptura por fendilhamento é uma característica dos corpos-de-prova que não possuem dimensões adequadas para suportar as tensões geradas durante o ensaio ou pela fragilidade do material (concreto CAR).

Figura – 59 Corpo-de-prova fendilhado

Figura – 60 Corpo-de-prova fendilhado

As Figuras - 61 e 62 ilustram os outros tipos de ruptura: deslizamento e ruptura do aço e respectivamente.

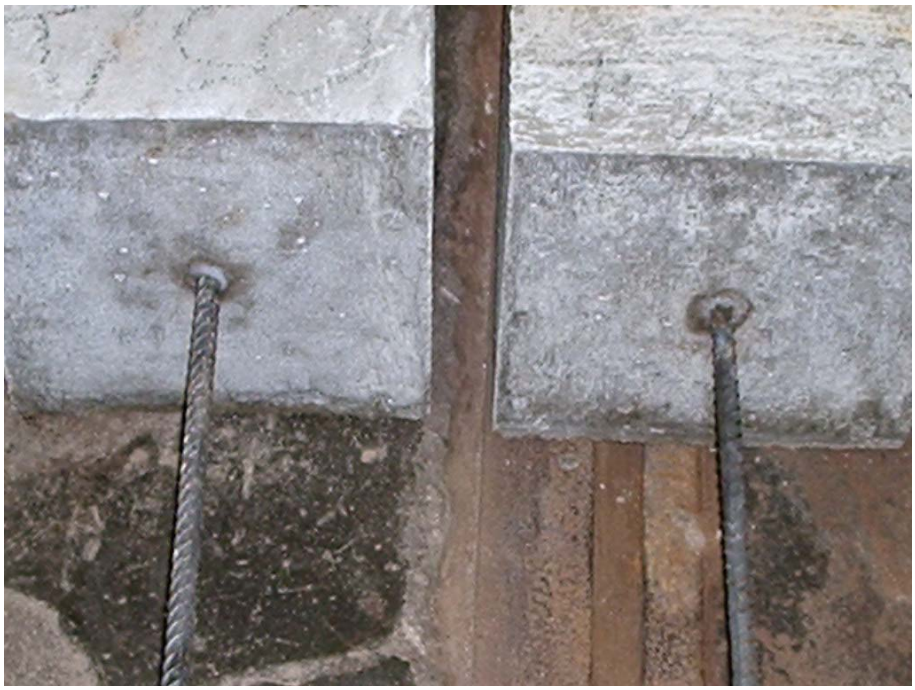


Figura – 61 Deslizamento do aço.

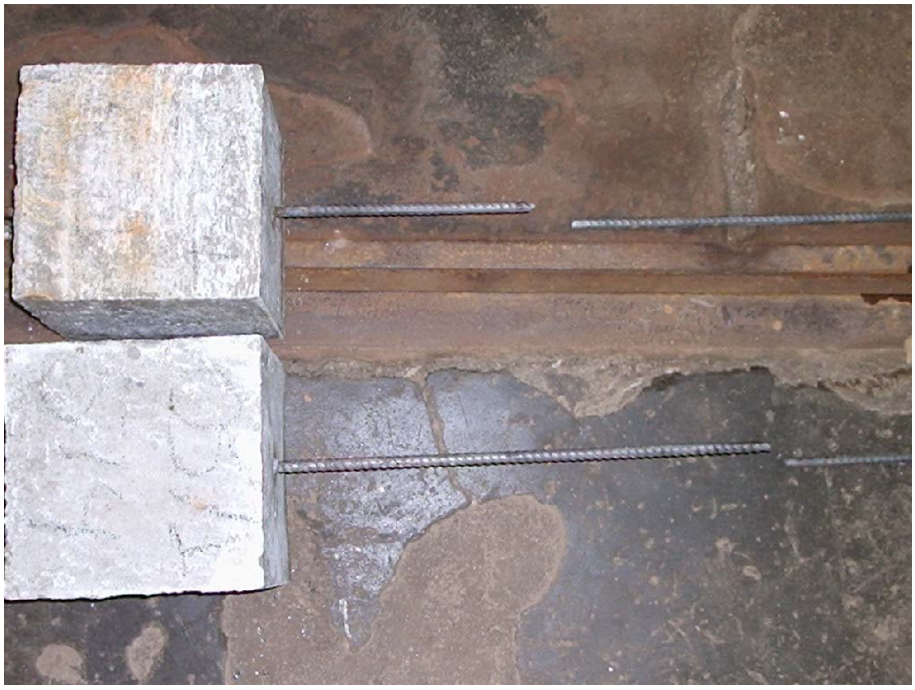


Figura – 62 Ruptura do aço.

Com os ensaios realizados neste capítulo pode-se avaliar o comportamento da aderência aço-concreto para os concretos com incorporação de resíduos e convencional, onde observa-se que as curvas possuem o mesmo aspecto. Com isso pode-se concluir que a incorporação do resíduo de borracha causa um decréscimo na tensão de aderência, mas o comportamento da evolução da mesma é muito semelhante ao concreto convencional.

A fim de observar a qualidade e a variância dos valores obtidos realizou-se uma analise estatística destes valores, que estão apresentados no próximo capitulo.

V ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste capítulo será apresentada uma análise estatística dos resultados obtidos por meio de ensaios de arrancamento e de tirante, realizados para os dois tipos de concreto estudados (convencional e com incorporação de resíduos). Realizaram-se dois tipos de análise uma sobre o coeficiente de variação e a outra sobre variância dos resultados obtidos.

5.1 Coeficiente de variação da amostra

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

Para se calcular o coeficiente de variação é necessário obter o desvio padrão e a média da amostra a ser analisada. Para o cálculo do coeficiente de variação utilizou-se a equação – 7.

$$CV = \frac{\text{desvio padrão}}{\text{média}} \cdot 100 \qquad \text{Equação (7)}$$

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

Foram confeccionados nove tirantes para cada idade (28 e 90 dias) e para cada tipo de concreto (convencional e com incorporação de resíduo), com isso

obtivemos a distância média entre as fissuras de cada tirante que estão ilustradas nas Figuras 63 a 65. A linha em vermelho simboliza um comportamento linear dos resultados com 0% de variação e a em azul os resultados obtidos.

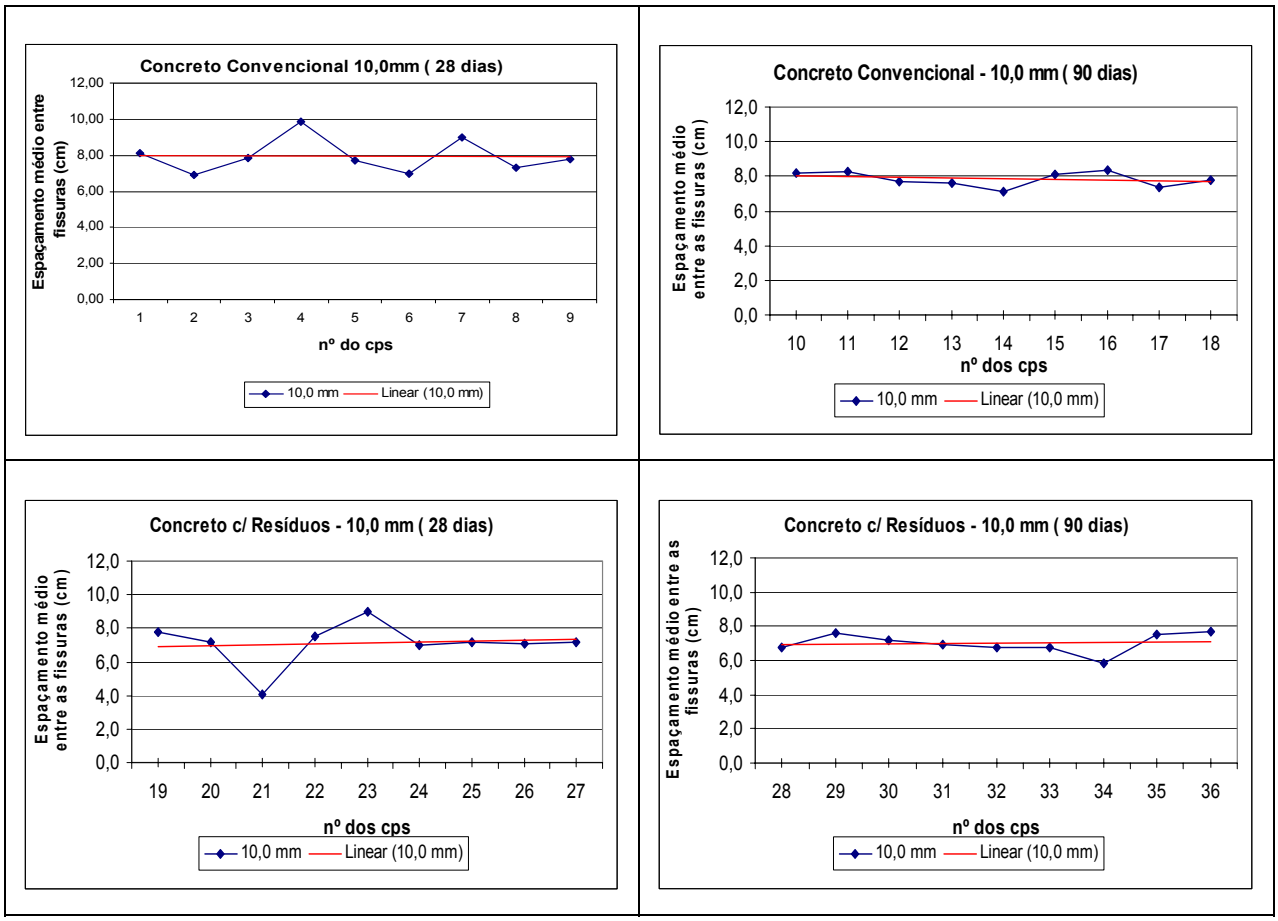
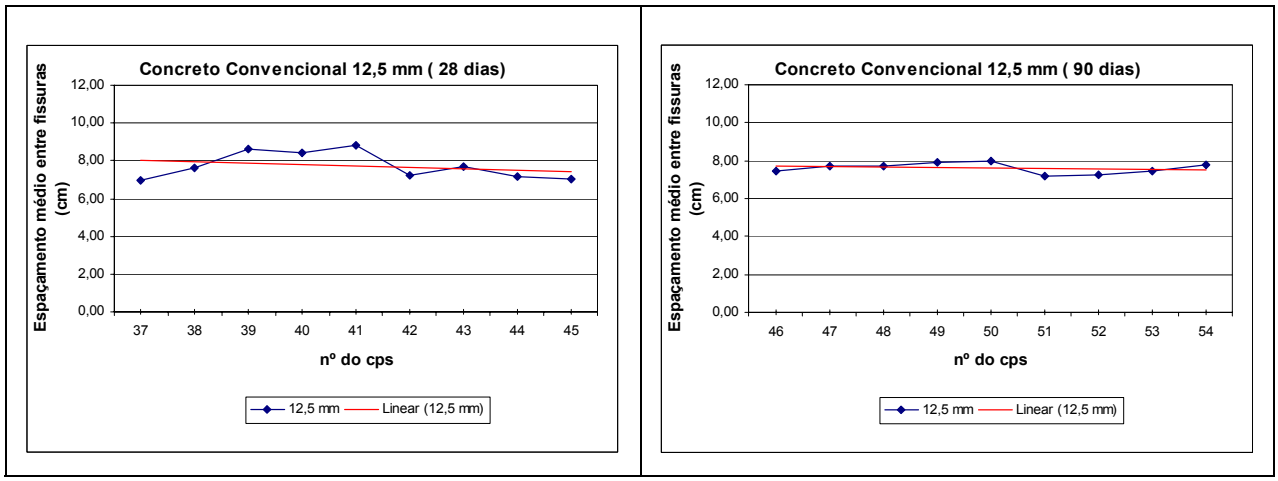


Figura- 63 Espaçamento médio entre fissuras aço de 10,0 mm (28 e 90 dias)



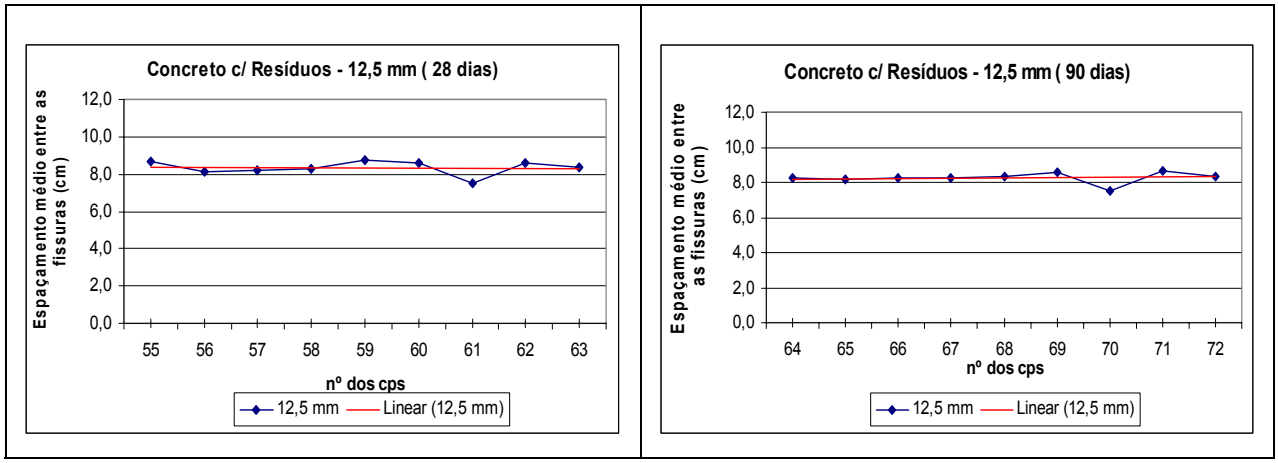


Figura- 64 Espaçamento médio entre fissuras aço de 12,5 mm (28 e 90 dias)

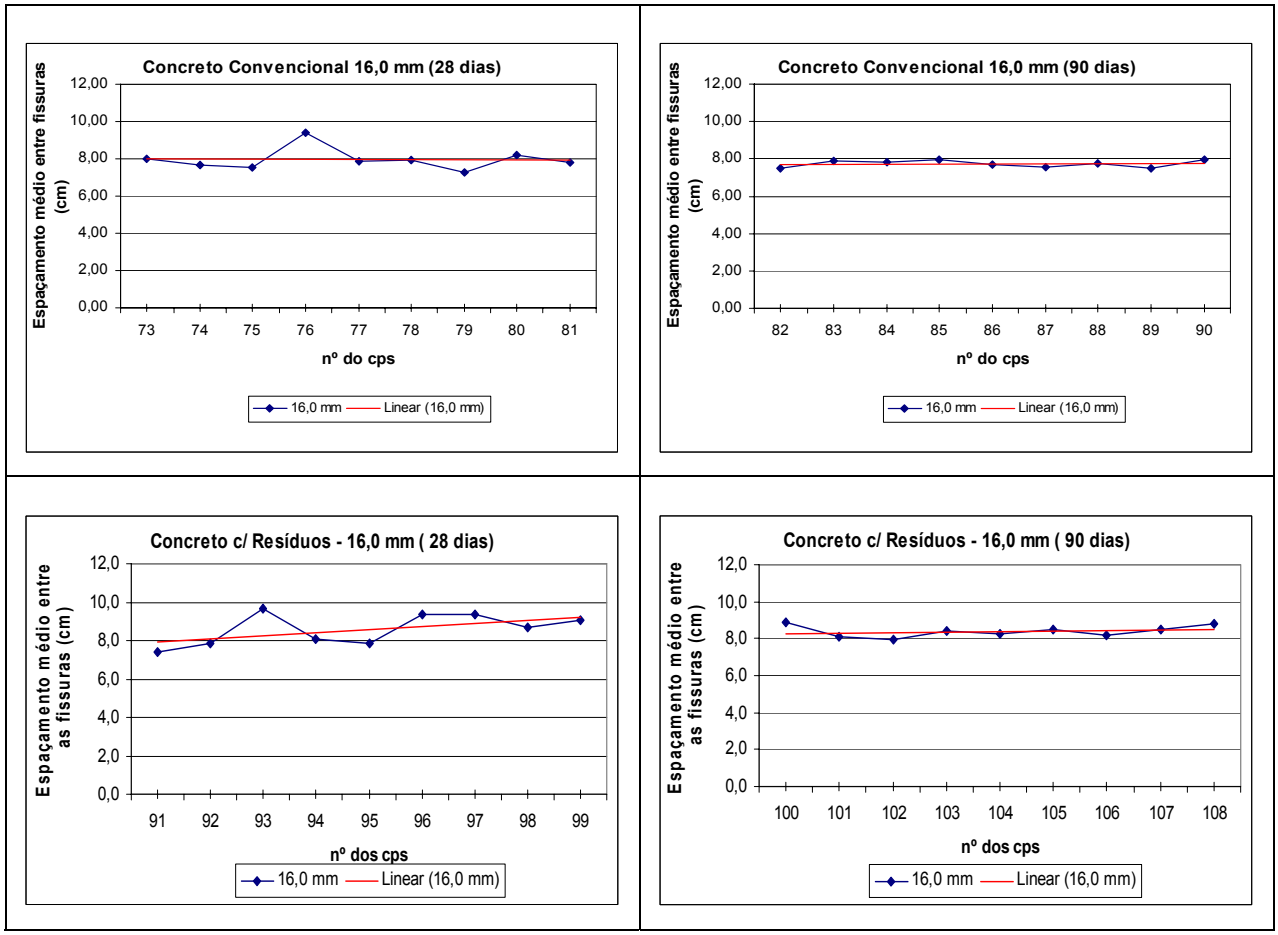


Figura- 65 Espaçamento médio entre fissuras aço de 16,0 mm (28 e 90 dias)

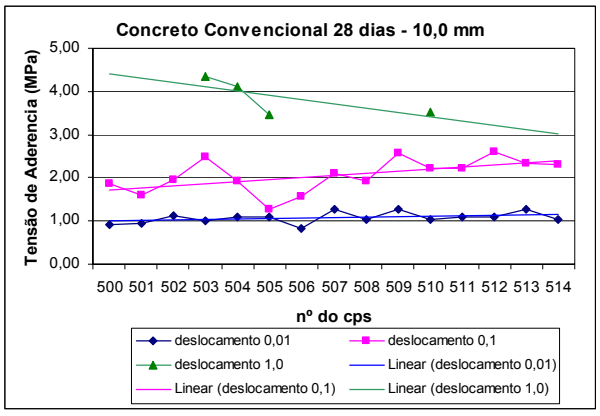
Com esses valores efetuou-se a análise preliminar (CV) no valor médio obtido para o espaçamento entre as fissuras (Xm). A Tabela –31 ilustra os resultados obtidos.

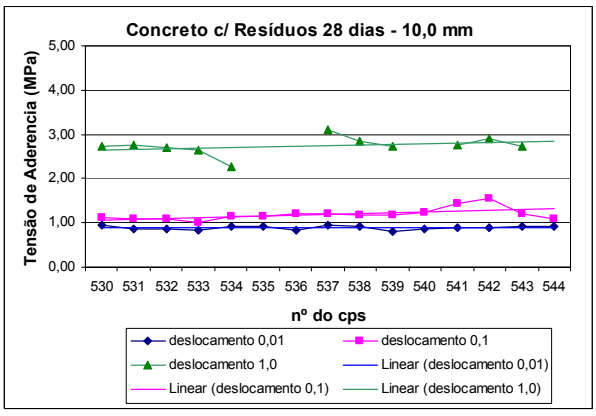
Tabela – 31 - Coeficiente de variação do espaçamento médio entre fissuras (Xm)

Ensaio de Tirante			
Tipo de Concreto	ϕ da barra (mm)	Coeficiente de Variação (%)	
		28 dias	90 dias
Concreto Convencional	10,0	12,10	5,41
	12,5	9,37	3,62
	16,0	7,52	2,36
Concreto com Resíduos	10,0	17,53	8,25
	12,5	4,53	3,92
	16,0	9,48	3,62

Analisando os valores do CV apresentados na Tabela-31, observa-se que todos os resultados obtidos tiveram valores menores que 25%, o que acarreta em sua aceitação.

Para o ensaio de pull-out-test foram confeccionados 15 corpos-de-prova para cada idade e para cada tipo de concreto, obtendo para cada um a tensão nos determinados deslizamentos (0,01, 0,1.....1,0). Com estes valores foram encontradas as tensões médias. As Figuras - 66 a 68 ilustram os resultados obtidos bem como o comportamento linear, ou seja com 0% de CV .





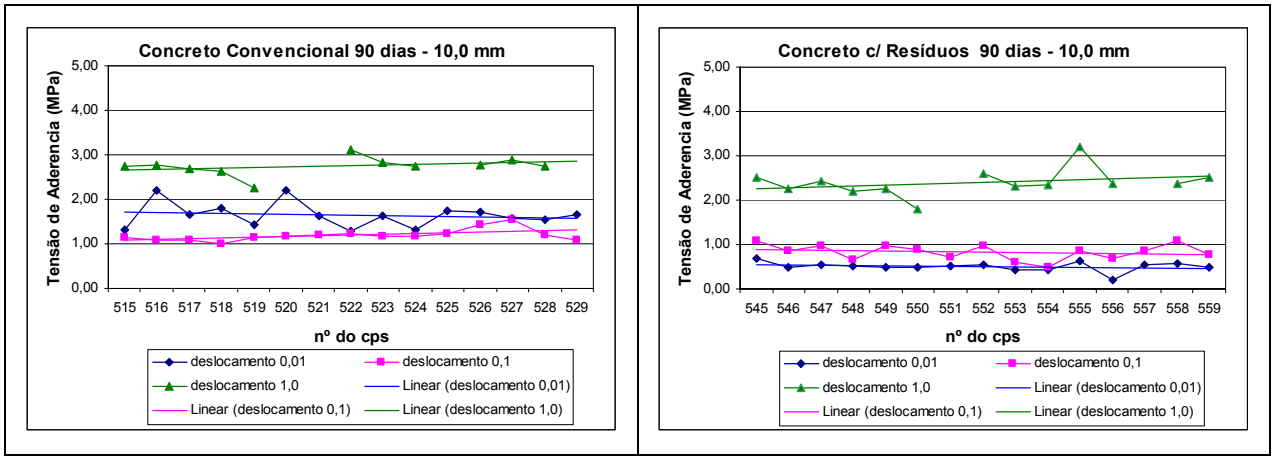


Figura – 66 – Tensão de Aderência para os aços de 10,0 mm (28 e 90 dias)

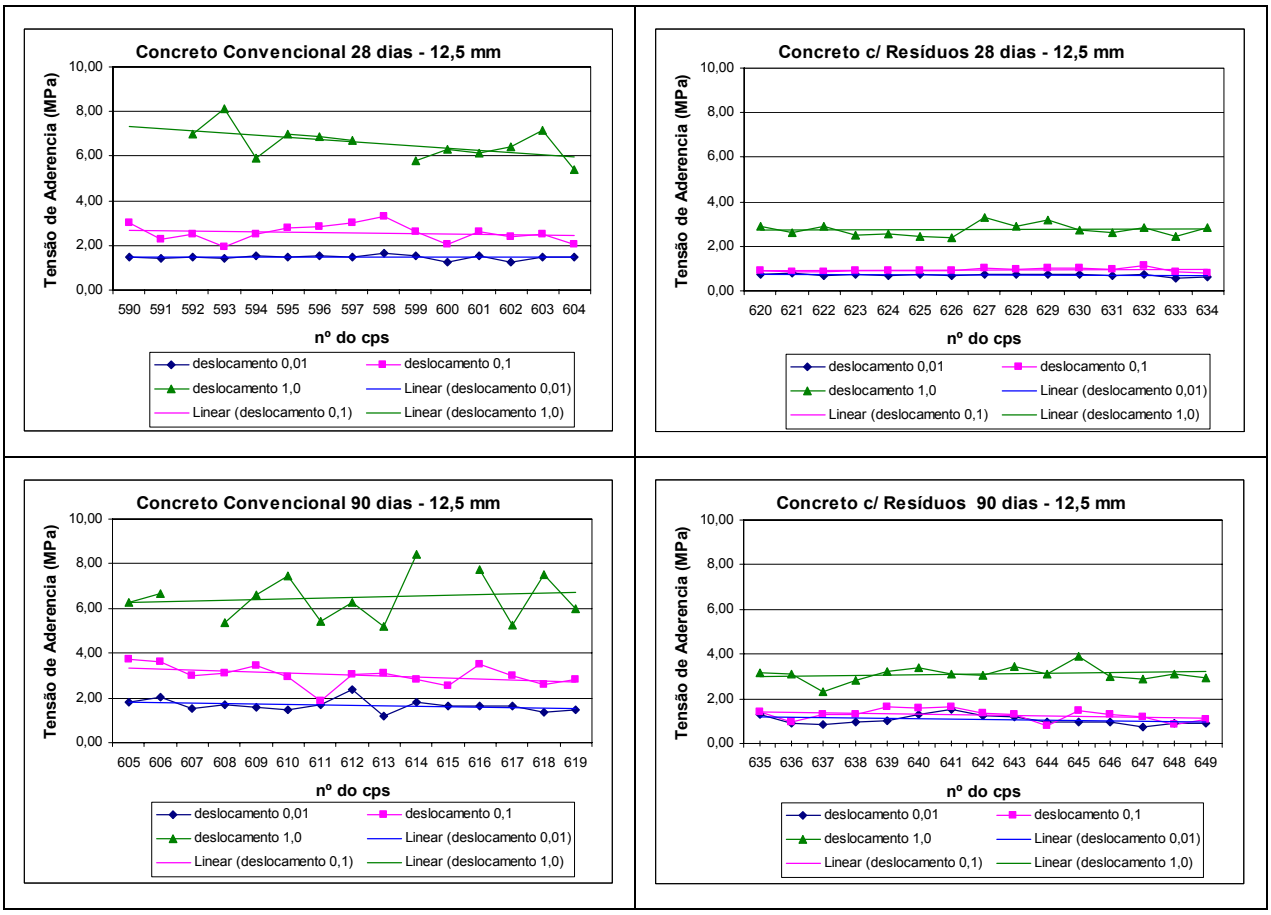


Figura – 67 – Tensão de Aderência para os aços de 12,5 mm (28 e 90 dias)

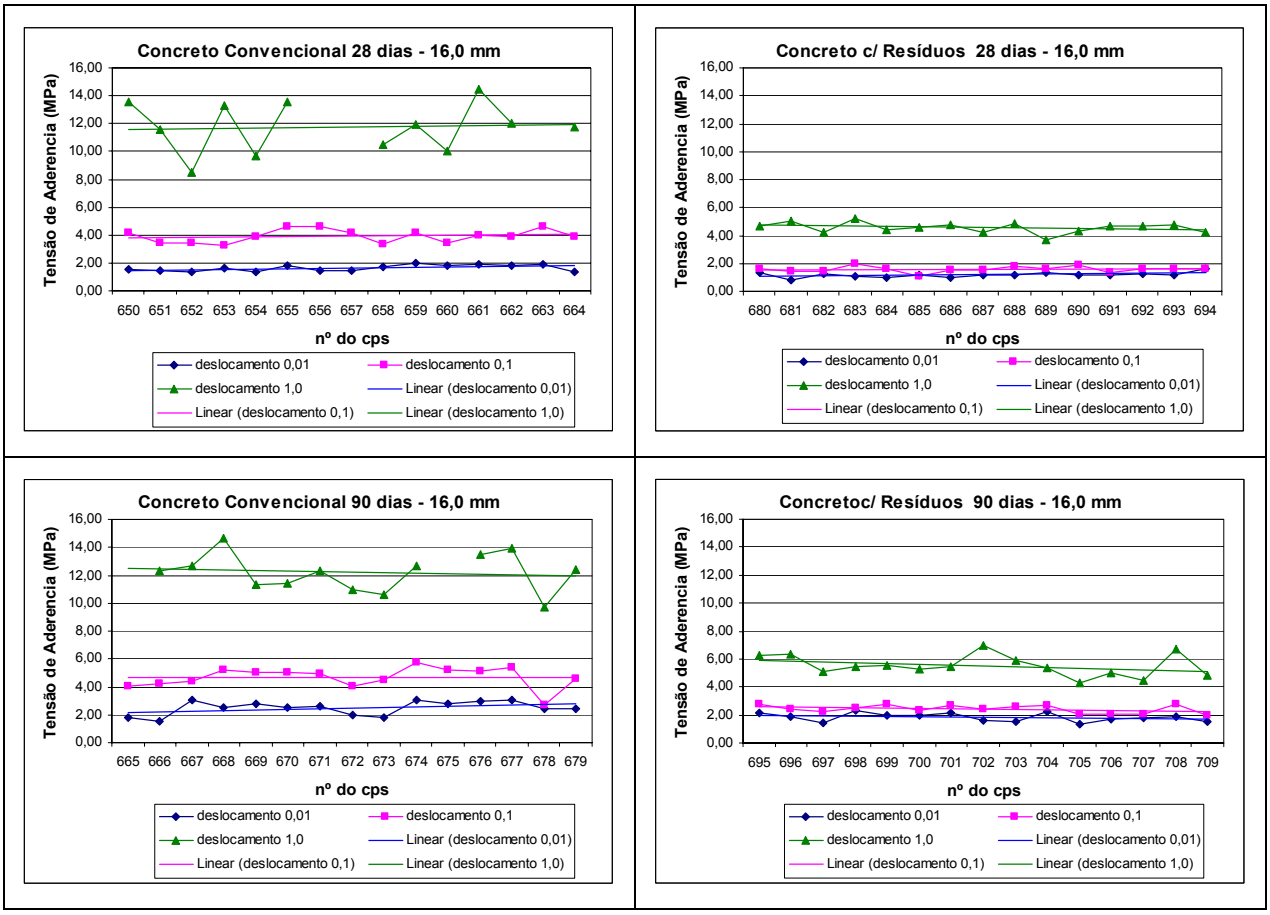


Figura – 68 – Tensão de Aderência para os aços de 16,0 mm (28 e 90 dias)

Com os resultados da tensão de aderência foram determinados os valores para o coeficiente de variação (CV) que estão ilustrados na Tabela - 32.

Tabela-32- Coeficiente de variação para média da tensão de aderência

Tipo de Concreto	Ø (mm)	CV para $\tau_{0,01}$ (%)		CV para $\tau_{0,1}$ (%)		CV para $\tau_{1,0}$ (%)	
		28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
Concreto Convencional	*10,0*	11,4	16,5	18,9	18,6	11,3	9,6
	12,5	7,0	16,8	15,1	15,5	16,5	16,1
	16,0	13,8	19,8	12,0	15,9	15,2	11,3
Concreto c/ Resíduos	*10,0*	5,0	21,6	11,4	21,2	7,4	13,1
	12,5	7,8	19,7	9,3	15,5	15,7	10,9
	16,0	15,5	16,8	13,9	11,5	13,9	14,0

Salienta-se que o coeficiente de variação (CV) é uma análise estatística preliminar onde avalia-se a variação dos resultados de um experimento. Esse procedimento é empregado quando se deseja comparar a variabilidade de várias amostras com o seu valor médio. Observando a Tabela - 32 não foi encontrado nenhum valor do coeficiente de variação superior a 25 % sendo, desta forma, todos os valores aceitos.

Realizou-se uma comparação entre os dois ensaios a fim se verificar qual deles apresenta maior coeficiente de variação. A Figura - 69 ilustra os resultados obtidos.

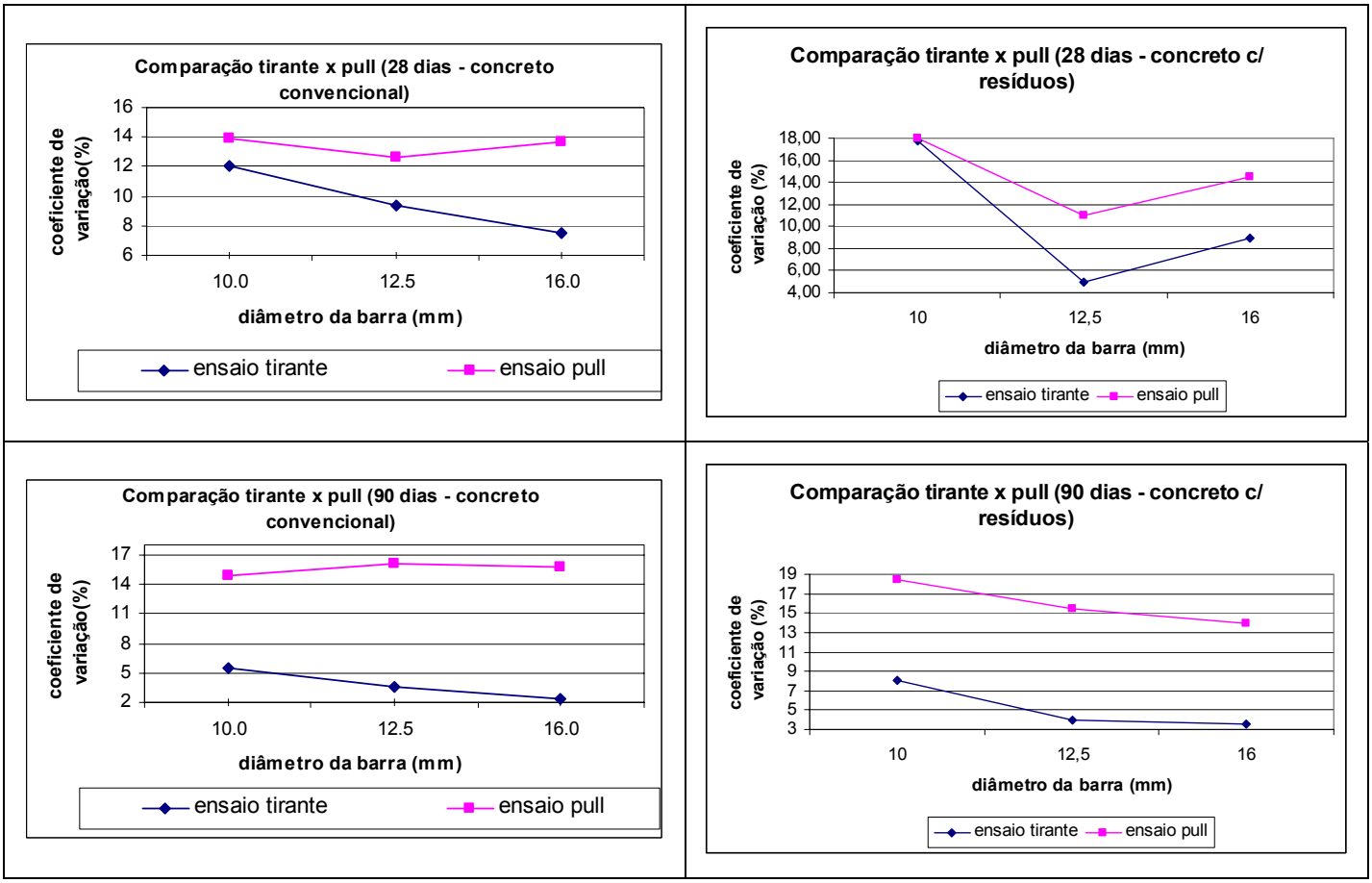


Figura – 69 – Comparação do coeficiente de variação para os ensaios de “pull-out-test” e tirantes

Analisando a Figura - 69 pode-se observar que os ensaios de “pull-out-test” apresentam uma maior variabilidade dos resultados comparados aos ensaios de

tirantes, ou seja, os resultados deste ensaio apresentam uma melhor homogeneidade.

5.2 Análise de variância

O objetivo da análise de variância é verificar se as amostras foram retiradas de populações com o mesmo valor de média. Com estes valores é possível verificar estatisticamente o efeito da influência de determinada variável no resultado final.

Neste trabalho efetuou-se uma análise estatística através do programa "ANOVA" (análise de variância) utilizando a ferramenta "EXCEL" de acordo com o livro "Estatística Utilizando Excel" de LAPPONI (2000). Salienta-se que o emprego da análise de variância na comparação de K grupos está baseada na relação da variabilidade das médias entre os grupos e da variabilidade das observações dentro dos grupos.

A tabela ANOVA apresenta os seguintes resultados: valores das somas dos quadrados, desvio padrão, graus de liberdade, médias quadradas e o valor de F calculado e tabelado.

Podemos denominar um efeito significativo, nos resultados obtidos experimentalmente, se o valor de F tabelado for menor que o F calculado. Neste trabalho utilizou-se em todos os casos o nível de significância α = 0,05, isto significa um índice de segurança de 95%.

As Tabelas 33 e 34 ilustram a execução de uma análise com o objetivo de se verificar estatisticamente o efeito da resistência à compressão (f_c) (concreto convencional e concreto com resíduos) e do diâmetro da barra (ϕ) nos resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de tirantes aos 28 e 90 dias respectivamente.

Tabela- 33 – Resultados obtidos na análise estatística das observações para as barras de seção circular e os dois tipos de concreto 28 dias.

F (fator)	Resistência á compressão (f_c)	Diâmetro (ϕ)
Calculado	19,31	19,27
Tabelado	1,32	1,28

Tabela- 34 – Resultados obtidos na análise estatística das observações para as barras de seção circular e os dois tipos de concreto 90 dias.

F (fator)	Resistência á compressão (f_c)	Diâmetro (ϕ)
Calculado	20,31	20,48
Tabelado	2,29	2,84

Analisando as Tabela-33 e 34 verifica-se que os efeitos dos fatores resistência à compressão e diâmetro da barra são significativos, visto que o valor de F calculado é maior que o tabelado. Pode-se concluir que a resistência do concreto e o diâmetro da barra possuem efeito significativo sobre o espaçamento entre as fissuras.

O mesmo procedimento foi adotado para os ensaios “pull-out-test”. As Tabelas 35 a 40 ilustram os resultados obtidos para as tensões nos deslizamentos 0,01mm, 0,1 e 1,0mm, nos ensaios realizados aos 28 e 90 dias.

Tabela- 35 – Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 0,01mm – 28 dias

F (fator)	Resistência á compressão (f_c)	Diâmetro (ϕ)
Calculado	148,36	297,31
Tabelado	1,32	1,22

Tabela- 36 – Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 0,1mm – 28 dias

F (fator)	Resistência á compressão (f_c)	Diâmetro (ϕ)
Calculado	201,32	389,74
Tabelado	1,32	1,22

Tabela- 37 – Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 1,0 mm – 28 dias

F (fator)	Resistência á compressão (f_c)	Diâmetro (ϕ)
Calculado	102,56	402,31
Tabelado	1,32	1,22

Tabela- 38 – Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 0,01mm – 90 dias

F (fator)	Resistência á compressão (f_c)	Diâmetro (ϕ)
Calculado	197,35	324,51
Tabelado	3,87	2,35

Tabela- 39 – Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 0,1mm – 90 dias

F (fator)	Resistência á compressão (f_c)	Diâmetro (ϕ)
Calculado	237,98	423,71
Tabelado	3,87	2,35

Tabela- 40 – Resultados obtidos na análise estatística da tensão de aderência obtida no deslizamento de 1,0 mm – 90 dias

F (fator)	Resistência á compressão (f_c)	Diâmetro (ϕ)
Calculado	112,35	506,42
Tabelado	3,87	2,35

Analisando as Tabela-35 a 40 verifica-se que os efeitos dos fatores resistência à compressão e diâmetro da barra são significativos, visto que o valor de F calculado é maior que o tabelado.

A análise estatística realizada neste trabalho teve como objetivo verificar a qualidade dos resultados obtidos, bem como analisar a influência da incorporação do resíduo de borracha no concreto e também o diâmetro do aço no fenômeno aderência.

VI CONCLUSÕES

Este trabalho relata um estudo do comportamento da aderência de barras de aço nervuradas, inseridas em concretos convencionais e com incorporação de resíduos (fibra) de borracha. Após a revisão bibliográfica e em função da análise dos dados obtidos no programa experimental, as seguintes conclusões e sugestões podem ser feitas:

- com a incorporação dos resíduos de borracha no concreto observou-se uma redução nas características mecânicas, analogamente ao obtido por outros autores que pesquisaram sobre o assunto. Isso era esperado, pois substituiu-se 10% da areia, em volume, por resíduo de borracha que é um material inerte;
- comparando-se os resultados obtidos com os disponíveis na literatura verificou-se que o concreto com incorporação de resíduo de borracha em substituição à areia, apesar da redução de suas propriedades mecânicas, pode ser utilizado em estruturas de concreto armado. Apesar de apresentar decréscimo na resistência à compressão, em relação ao concreto convencional, este concreto apresenta características e desempenho estruturalmente aceitáveis, faz-se necessário, porém, uma melhoria na matriz do concreto com resíduos de borracha, de maneira que resulte em acréscimos nos índices mecânicos e, conseqüentemente, na aderência aço-concreto possibilitando sua utilização em estruturas com solicitações significativas;
- o concreto com incorporação de resíduos de borracha possui um módulo de elasticidade menor em relação ao concreto convencional, permitindo ao mesmo trabalhar mais a sua deformação sob carga. Num concreto convencional, o agregado é um dos principais elementos que impedem sua deformação. A inclusão de resíduos de

borracha atenua essa restrição, dando ao concreto uma maior mobilidade;

- nos ensaios de compressão axial observou-se que as amostras com incorporação de resíduos de borracha apresentaram uma ruptura menos brusca quando comparadas ao concreto convencional;
- o decréscimo obtido no índice de conformação superficial, quando comparado com o concreto convencional, se deve a uma menor resistência observada no concreto com resíduos de borracha. Entretanto, salienta-se que com incorporação do resíduo de borracha no concreto há uma redução na fissuração;
- observou-se também que a medida que se aumenta o diâmetro da barra há um incremento no coeficiente de conformação (η), fato também observado por BARBOSA (2001) que estudou o comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência;
- a normalização brasileira superestima os valores de tensão de aderência para os aços com diâmetro menor ou igual que 32,0 mm;
- baseado nos resultados encontrados na análise estatística podemos concluir que os resultado obtidos nesta pesquisa são de boa qualidade, pois os CVs ficaram abaixo dos 25% e a resistência a compressão bem como o diâmetro do aço tem efeito significativo na tensão de aderência;
- através da realização dos ensaios de arrancamento foram obtidas as curvas tensão de aderência x deslizamentos para os concretos convencionais e com incorporação de resíduos de borracha, nas quais observa-se desenvolvimentos similares. Apesar de um decréscimo na tensão de aderência, o concreto com incorporação de resíduos de borracha apresentou um comportamento muito semelhante ao concreto convencional;
- observou-se que os valores da tensão de aderência para os aços de diâmetro 12,5 mm foram ligeiramente superiores em relação aos

aços de 10,0 mm. Acredita-se que este fato ocorreu devido a diferença existente (0,1mm) da altura das nervuras entre o aço de diâmetro de 10,0 mm para o 12,5 mm;

- a utilização de resíduos de borracha no concreto é uma tentativa para atenuar o impacto que os pneus provocam ao meio ambiente e também para classificá-los como novo tipo de material alternativo para construção civil, poupando as jazidas naturais de areia e agregados. Isso justifica a necessidade de avanços nesta linha de pesquisa.

Como proposta de continuidade desta pesquisa, objetivando aprofundar a viabilidade da utilização de concretos com incorporação de resíduos de borracha em estruturas de construção civil, outros estudos devem ser realizados, para melhor avaliar suas propriedades mecânicas e seu comportamento estrutural:

- analisar o comportamento deste tipo de concreto em relação ao impacto sofrido pela exposição ao fogo;
- avaliar o comportamento do material através de ensaios de porosidade, durabilidade, trabalhabilidade, fluência, deformação, ensaios químicos, etc;
- buscar melhorar a matriz do concreto, com o intuito de aumentar sua capacidade de resistência a compressão e reavaliar seu comportamento estrutural através de outros tipos de ensaios de aderência aço-concreto;
- estudar o comportamento do material quando submetido a outros tipos de ensaios estruturais tais como fissuração, ensaios de flexão de vigas, ensaios de placas, etc;
- avaliar seu comportamento estrutural através de ensaios de deformação lenta tais como fluência, módulo e retração;
- analisar o comportamento do material em estruturas submetidas a ações dinâmicas.

VII BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCETTI, K. M., PINHEIRO, L. M. **Tipos de Fibras e Propriedades do Concreto com Fibras**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42º, 2000, CD-ROM.

ACI COMMITTEE 408. Abstract of: **State-of-the-art-report: bond under cyclic loads**. *ACI Materials Journal*, v.88, n.6, p.669-73, Nov./Dec1991.

AKASAKI, J. L., NIRSCHL, G.C. **Influência da granulometria das fibras de borracha vulcanizada em dosagens de Concreto**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44º, 2002, CD-ROM.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **"Standard Specification for Cellulosic Fiber Insulating Board".** C 208, Philadelphia, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004:* **Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733:* **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738:* **Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto**. Rio de Janeiro, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215:* **Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7217:* **Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7218:* **Agregados – Determinação do Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7477:* **Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras e Fios de Aço Destinados a Armadura de Concreto Armado**. São Paulo, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7480:* **Barras e fios de Aço Destinados a Armaduras para Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 1996.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS*. NBR 9202:* **Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Finura por Meio da Peneira 0,044 mm (Número 325).** Rio de Janeiro, 1985.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM *67:* **Concreto – Determinação da Consistência Pelo Abatimento do Tronco de Cone**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM *76:* **Cimento Portland – Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM 23: **Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Massa Específica .** Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM *49:* **Agregado Miúdo – Determinação de Impurezas Orgânicas** . Rio de Janeiro, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM *65:* **Cimento Portland – Determinação do Tempo de Pega.** Rio de Janeiro, 1996.

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

BARBOSA, M.T.G. **Avaliação do Comportamento da Aderência em Concretos de Diferentes Classes de Resistência**. Rio de Janeiro 2002, 203pps Tese (Doutorado) - COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro,

BAUER, L. A. **Utilização de Borracha de Pneu em Concreto** Materiais de Construção. v.1, 447pps. Rio de Janeiro, 2001.

BENAZZOUK A., MEZREB K., G. Doyen, A. Goullieux, M. Qu_**eneudec Efect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement–rubber composites-in.uence of the alveolar texture of rubber aggregates** Cement & Concrete Composites Elsevier. Accepted 26 July 2004

BONNET Sandra, **Effet de l.incorporation des granulats caoutchouc sur la résistance à la fissuration des mortiers** XXIEMES Rencontres Universitaires de Genie Civil 2003 .

BONY, J.C. ; CLAUDE, G.; SORETZ, S. **Comparaison dês essais d'adhérence par flexion (beam test) et par traction (pull-ou-test**). Matériaux et Constructions, 6 (35) : 395-401 Sept/Out. 1973.

BRESLER, B.; BERTERO, V.. **Behavior of reinforced concrete under repeated load.** ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 94, No. ST6, June, pps. 1567-1590, 1968.

BRETTMAN. B.B.; DARWIN, D.; DONAHEY, R.C. **Bond of reinforcement to superplasticized concrete.** Journal of the American concrete Institute, Detroit, v.83, n.1, pps. 98-107, Jan./Feb. 1986

BURGE, T. A. **Densified cemente matrix improves bond with reinforced steel**. In: Bartos, P.(Ed). Bond in Concrete. London, Applied Science Publishers, pps.273-81. 1982

CASTRO, P. F. **Notas sobre estudo da aderência aço-concreto**, Universidade Federal Fluminence, Niterói, Rio de Janeiro 2000.

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

CINCOTTO, M. A. **Utilização de Subprodutos e Resíduos na Indústria da Construção Civil***.* Editora Pini Ltda Tecnologia das Edificações p.23-26. São Paulo, 1988,.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, **Reinforcement, Bond and Ancorage,** Paris, Bulletin d'information, 118, 1979

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, **Bond action and bond behaviour of reinforcement**, Paris, Bulletin d'information, 151, 1982.

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

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

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

DESIR, J. M.. **Interface aço-concreto: reformulando os modelos constitutivos e numéricos**; Rio de Janeiro 1998. 206pps. Tese (Doutorado) - UFRJ,– Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DUCATTI, V.A.; AGOPYAN, V. **Concreto de Elevado Desempenho: Estudo da Aderência com a Armadura**. São Paulo. Departamento de engenharia de construção civil, EPUSP,.23pps1993. (Boletim Técnico, BT/PCC/113).

DUCATTI, V.A. **Concreto de Elevado Desempenho: Estudo da Aderência com a Armadura**. São Paulo 1993. 259pps. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ELDIN N.N E SENOUCI A.B.. " **Use of Scrap Tires in Road Construction** ", Journal of Construction Engineering and Management, ,118(3), pp561-576, 1992.

ELDIN N.N. E. SENOUCI A .B.(a) "**Rubber – Tire Particles as concrete Aggregate**". Journal of Materials in Civil Engineering, 5(4), pp478-496, 1993.

FATTUHI, N. I.; CLARK, L. A. **Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber.** Construction and building materials, v. 10, n. 4, pp.229-236, 1996.

FERNANDES, R.M. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto**. São Carlos 2000. 155pps. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FIORITI, C. F. **Avaliação de Compósitos de Concreto com Resíduos de Borracha na Produção de Blocos para Alvenaria.** Ilha Solteira 2002. 134 pps. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

FUSCO, P. B., **Técnica de Armar as Estruturas de Concreto**., Editora Pini Ltda 265 pps, São Paulo 1995.

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

GROOT, A. K.; KUSTERS, G. M. A.; MONNIER, T.. **Numerical modeling of bond-slip behavior.** Heron, Conc. Mech., Vol. 26, 1981.

KAYALI , Stephen R. YEOMANS **Bond of ribbed galvanized reinforcing steel in concrete** Australian Defence Force Academy, School of Civil Engineering, University College, University of New South Wales, Canberra, ACT 2600, Australia Received 16 March 2003; accepted 29 August 2003.

KEMP, E.L ; BREZNY, F.S ; UNTERSPAN, J.A. **Effect of rust and scale on the bond characteristics of deformed reinforcing bars**. Journal of the American concrete Institute, 65 (9) : 743-56, Sept. 1968.

LAPPONI, J.C., **Estatística Usando Excel** Lapponi Treinamento e Editora,450 pps. São Paulo 2000.

LEONHARDT, F., **Construções de Concreto**. (Tradução: João Merino). Rio de Janeiro, Interciência, 6v, 1979.

LI, Z.; LI, F.; and LI., J. S. L. **Properties of concrete incorporating rubber tyre particles.** Magazine of Concrete Research, n. 4, p.297-304, 1998.

LIMA, I. S.; ROCHA, F. S.; FERREIRA, J. B. **Um estudo de argamassa de cimento com adição de fibras de borracha vulcanizada para a construção civil.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42º, 2000, CD-ROM.

LORRAIN, M.;KHÉLAFI , H. ***Sur la resistence de la liaison armature-beton de haute resistence.*** **Annales de l´Institut Technique du Batiment et dês Travaux Publics**. Série: Béton 260, n. 470, p.117-28, dec. 1988

MADUREIRA, Cláudio José de; CRUZ, Paulo Teixeira da. **O uso de pneus descartados em aterros reforçados** São Paulo 2002. 285pps.Tese (Doutorado) – Escola da Politécnica da USP - Universidade de são Paulo.

MARTIN, H. **"Die haftung der bewehrung in stahlbeton.**", Rodex-Rundschau. nº 108, pp 43 – 98, Apr. 1967.

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

MAULINE, N.M., ASTROVA, T.I. **Etude de línfluence de la composition du béton sur la adhérence acier-béton.** Bulletin d´Information du Comitê Européen du Béton, (48), avr. 1965.

NABIL M. Al-Akhras , MOHAMMED M. Smadi, **Properties of tire rubber ash mortar** , Cement & Concrete Composites, elsevier.; accepted 5 January 2004

NETO J. M.; ASSAN A. E. **Análise do deslizamento entre o aço e o concreto: modelagem de vigas submetidas à flexão**, . In: Congresso Brasileiro do Concreto.43º, 2001. CD-ROM.

NGO, D.; SCORDELIS, A. C.. **Finite element analysis of reinforced concrete beams.** ACI Journal, Proc. Vol. 64, March, pp. 152-163, 1967.

NILSON, A. H.. **Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method.** ACI Journal, Proc. Vol. 65, September, pp. 757-766, 1968.

OLIVARES F. Herna´ndez-, BARLUENGA G. , **Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete**, Cement and Concrete Research 34 pp109– 117, 2004.

PIERCE C.E., BLACKWELL M.C**. Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in .owable** .ll Waste Management (23) pp197–208, 2003.

RAFAT Siddique, TARUN R. Naik, **Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview** Cement & Concrete Composites, Elsevier Accepted 2 January 2004.

RAGHAVAN, D. **Study of rubber filled cementitious composites.** Journal of applied Polymer Science, v. 77, p. 934-942, 2000.

RAGHAVAN, D.;HUYNH, H.; FERRARIS, C. F. **Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite.** Journal of Materials Science, 33, p. 1745-1752, 1998.

REHM, G. **The Basic Principales of the bond Between Steel and concrete**. C & CA Library Translation n.134 (Uber die Grundlagem des Verbundes Zwischen Stahl und Beton. Deutscher Ausschuss Fur Stahlbeton, Heft 138, p.59, 1961). Cement and Concrete association, London, p.66, Research, 25(2), p.304-310, 1995.

REYNOLDS, G. C., BEDDY, A., **"Bond Strength of deformed bars"**, In: Bond and Concrete 23º, Londres, P. Bartoz, 1982.

RIBEIRO, J. L. D., **Análise Experimental dos fatores que influenciam a aderência em barras nervuradas**. Porto Alegre 1985. 180pps.Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul -RS.

RIBEIRO F.C.V.; BOLORINO H; FERNANDES S.A. ; "**Análise da Influência da adição de pneu na deformabilidade do concreto"**; In:Congresso Brasileiro do Concreto 44º, 2002.

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

ROBISON, M.D. – **Tours de béton armé**.– Paris, École Nationale de Ponts et Chaussées,. v.3, 1963

ROSA, W. A.. **Modelagem do deslizamento entre o aço e o concreto com tensão de aderência não-linear**; Rio de Janeiro 1994. 121pps. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,– RJ.

ROSTAMI, H. et ai. **Use of Recycled Rubber Tires in Concrete**. in: Proc. Int. Conf. Concrete 2000, University of Dundee, p.39i -399, 2000.

ROSTAMI, H.; LEPORE, J.; SILVESTIM, T.; ZANDI, I. **Use of recycled rubber tyres in concrete.** Economic and Durable Construction Through Excellence. Proceedings of International Conference, University of Dundee, Scotland, UK, v. 2, p. 391-398, 1993.

SEGRE, N**. Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento.**Campinas, 1999. 142pps. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

SEGRE, N.; JOEKES; I. **Use of tire rubber particles as addition to cement paste.** Cement and Concrete Research, v. 30, p.1421-1425, 2000.

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

SPACONE, E.; LIMKATANYU, S.. **Responses of reinforced concrete members including bond-slip effects.** ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 6, November-December, pp. 831-839, 2000.

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

TASSIOS, T**. Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions**. AICAP-CEB Symposium, v.1, State of Art Reports, (CEB – Bul. D´Information n.131 , Rome), ,p. 67-122, 1979.

TAVARES, M.E.N., **Estudo Experimental de Vigas de Concreto protendido – Influência da Variação da Aderência Aço-Concreto na Flexão.** Rio de Janeiro 2000. 201pps. Tese (Doutorado) - COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro,

TEPFERS, R., **"Cracking of Concrete cover along Anchored Deformed Reinforced Bars",** Magazine of Concrete Research, v. 31, n. 106, (Mar), pp. 3-12, 1979.

TOPÇU, I. B. **The properties of rubberized concretes.** Cement and Concrete Research, v. 25, n. 2, p.304-310, 1995.

TOUTANJI, H. A. **The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates**. Cement and Concrete Composites n. 18, p.135-139, 1996.

TROST, H., CORDES, H.,, **La Precontraine Partielle.** Universitât de Braunschweig, Hefr 50 1980.

VARGAS, J. R. M. **Estúdio Experimental de la Adherencia de Cordones Pretesos em Hormigones de Altas Prestaciones Iniciales.** Valencia 2001.203p. Tese (Doutorado) - Universidad Politécnica de Valencia - E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puetos

VIEIRA, F.M.P.. **Estudo do Comportamento da Aderência das Barras de Aço no Concreto de Alta Resistência com Adição de Microssílica**. Porto Alegre 1994. 107p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

WEBER, V., **Untersuchung des Riss- und Verformungsvarhaltens Segmentarer Spannbetonbanteile**. Universitât de Braunschweig, Hefr53. 1982,

YANKELEVSKY, D. Z.. **A two-phase one dimensional model for steel concrete interaction.** Computers & Structures, Vol. 65, No. 6, pp. 781-794, 1997.

YANKELEVSKY, D. Z.. **New finite element for bond-slip analysis.** ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 7, July, pp. 1533-1542, 1985.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AKASAKI, J. L. **Alvenaria Estrutural com Blocos de Concreto – A Evolução dos Materiais, Equipamentos e Mão-de-Obra – Uma Experiência em São José do Rio Preto.** São Carlos, 1995. 125pps. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,

AKASAKI, J. L.,FIORITTI, C.F., NIRSCHL, G. C., **Análise Experimental das Propriedades Mecânicas do Concreto com Adição de Fibras de Borracha Vulcanizada.** . In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43º, 2001, CD-ROM

A. S. C. E.. **State-of-the-art report on finite element analysis of reinforced concrete.** American Society of Civil Engineers, New York – USA, 1982.

ASSAN, A. E.. **Método dos elementos finitos: primeiros passos.** Editora da Unicamp, Campinas – SP, Brasil, 1999.

CIRMA (CENTRO DE INFORMAÇÕES SOBRE RECICLAGEM E MEIO AMBIENTE**). A Borracha e o Pneu Reaproveitamento e Reciclagem**. (Disponível na Internet no endereço www.recicloteca.org.br. Publicado em 2000. Acessado em 05 de maio de 2003).

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**..Editora: Edgard Blucher , 238pps, 8º edição,São Paulo, 1977.

ELDIN, N. N.; SENOUCI, A. B. (b) **Observations on rubberized concrete behaviour.** Cement, Concrete and Aggregates. v. 15, n. 1, pp.74-84, 1993.

FAZIO, J. A., OLIVEIRA, S. A. G. **Utilização do Pó de Borracha de Pneu Reciclado em Misturas Betuminosas para Pavimentação Urbana e Rodoviária**. In: VII - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1995.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1 ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 349 pps,1993.

HUYNH, H.; RAGHAVAN, D. FERRARIS, C. F. **Rubber particles from recycled tires in Cementitious Composite materials.** Department of Chemistry, Howard University, Washington, 18 pps., 1996.

HUYNH; H.; RAGHAVAN, D. **Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline enviroments.** Department Chemistry, Howard University, Washington, 22pps, 1997.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil.** São Paulo, 2000. 102p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Jornal Gazeta do Povo. 28/04/1999. Curitiba – PR

KHATIB, Z. K.; BAYOMY, F. M. **Rubberized Portland cement concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, p.206-213, August 1999.

LEE, B. I.; BURNETT, L.; MILLER, T.; POSTAGE, B.; CUNEO, J. **Tyre rubber / Cement matrix composites.** Journal of Materials Science Letters, v. 12, p.967-968, 1993.

Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado, Cempre/IPT –1995

LORRAIN, M.,MAUREL, O.,SEFFO, M. *Cracking* **Behavior of Reiforced High-Strength Concrete**. ACI Structural Journal , pp. 244-251(Apr), 1989.

MAGANHA, M. F. B., KOMATSU, C. E. **Pneus Como Alternativa Energética**. In: Congresso Brasileiro de Cimento, 5º, 1999, São Paulo. CD-ROM.

MARINS NETO, J.. **Análise do deslizamento entre aço e concreto.** Campinas 2002. 108pps. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Editora Pini Ltda 1º ed. 573 pps, São Paulo, 1994.

MIRZA, S. M.; HOUDE, J.. **Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete.** ACI Journal, Proc. Vol. 76, January, pp. 19-46, 1979.

MYLREA, T. D.. **Bond and anchorage.** ACI Journal, Proc. Vol. 44, March, pp. 521-552, 1948.

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

NAAMAN, A. E. **Fiber Reinforcement for Concrete**. Concrete International. v.7, nº 3, p.21-25, March, 1985.

NEVILLE, ADAM M. **Propriedades do Concreto.** Editora PINI 2º ed.202pps, (Tradução de Salvador E. Giammusso), São Paulo:, 1997.

RETOQUEJOR http://www.conhecerparaconservar.org/opinião/notícias/

RMD – *Recuperación Materiales Diversos, S.A* – **Recuperación Integral de Neumáticos** – Integral Recovey of used tires , Valencia ,Octubre, 2000.

SÁNCHEZ M, E. **Aplicaciones del caucho granulado en carreteras Gestión de Residuos Especiales**: Neumáticos Fuera de Uso,ed. Madrid 2001.

TARTUCE, R. **Dosagem Experimental do Concreto**. Editora Pini Ltda 1º ed. 115 pps. São Paulo, 1989.

TARTUCE, R., GIOVANNETTI, E. **Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland.** Editora Pini Ltda, 1º ed. 107 pps. São Paulo 1990.

TEZUKA, Y. **Concreto Armado com Fibras**. 2 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 28 p. 1999.

TOPÇU, I. B. **Assessment of the brittleness index of rubberized concretes.** Cement and Concrete Research, v. 27, n. 2, p.177-183, 1997.

TOPÇU, I. B.; AVCULAR; N. **Collision behaviours of rubberized concrete.** Cement and Concrete Research, v. 27, n. 12, p.1893-1898, 1997.

TOPÇU, I. B.; AVCULAR; N.; **Analysis of rubberized concrete as a composite material.** Cement and Concrete Research, v. 27, n. 8, p.1135-1139, 1997.