

KELLY REJANE DE SOUZA OLIVEIRA

**ADERÊNCIA DA ARMADURA AO CONCRETO LEVE COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS**

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia da Construção.

Orientador: PROTASIO FERREIRA E CASTRO – Ph.D

Niterói
2006

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de
Computação da UFF

O48 Oliveira, Kelly Rejane de Souza.

Aderência da armadura ao concreto leve com adição de resíduos /
Kelly Rejane de Souza Oliveira – Niterói, RJ : [s.n.], 2006.

198 f

Orientador: Protasio Ferreira de Castro.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal Fluminense, 2006.

1. Concreto leve. 2. Resíduos. 3. Agregados (Materiais de
construção). I. Título.

CDD 693.5

KELLY REJANE DE SOUZA OLIVEIRA

**ADERÊNCIA DA ARMADURA AO CONCRETO LEVE COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS**

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia da Construção.

A provada em 31 de Janeiro de 2006.

BANCA EXAMINADORA

Protasio Ferreira e Castro, Ph.D.
Universidade Federal Fluminense

Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Henrique Inecco Longo, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói
2006

A Deus, aos meus pais Geraldo e Regina, aos meus tios, avós e aos amigos com profunda admiração e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais e a toda família, que nos momentos de angústia e apreensão se mostraram meu refúgio e fortaleza.

Ao meu orientador Prof. Protasio Ferreira e Castro, pelo crédito, confiança e incentivo na elaboração desta dissertação.

A concreteira REDEMIX S.A pelo apoio técnico e fornecimento dos materiais para a fabricação do concreto, especialmente ao Eng. Homero pela amizade, atenção e consideração.

À Prof. Maria Teresa Barbosa, que muito me incentivou para o início desta caminhada.

Aos Professores Cláudia Coura e Sérgio Kitamura pelo apoio incondicional.

A todos os profissionais que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Cássia, funcionária da secretaria de pós-graduação, pela amizade e compreensão.

A todos os amigos da graduação e pós-graduação, que no decorrer desta etapa, muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Em relação a todos os atos de iniciativa e de criação, existe uma verdade fundamental cujo desconhecimento mata inúmeras idéias e planos esplêndidos: é que no momento em que nos comprometemos definitivamente, a Providência move-se também. Toda uma corrente de acontecimentos brota da decisão, fazendo surgir a nosso favor toda a sorte de incidentes, encontros e assistência material que nenhum homem sonharia que viesse em sua direção”.

(Goethe)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
SUMÁRIO.....	6
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE EQUAÇÕES	15
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Importância da pesquisa	19
1.2 Metodologia da pesquisa	21
1.3 Estrutura da dissertação	21
2 CONCRETO LEVE	23
2.1 Histórico	23
2.2 Definições e classificações	25
2.3 Propriedades dos concretos leves	29
2.3.1 Resistência à compressão e massa específica.....	29
2.3.2 Resistência à tração	31
2.3.3 Módulo de deformação	34
2.3.4 Retração	35
2.3.5 Fluência	36
2.3.6 Permeabilidade	37
2.3.7 Porosidade	38
2.3.8 Trabalhabilidade	39
2.3.9 Propriedades Térmicas	39
2.3.10 Resistência ao fogo.....	40
3 CONSIDERAÇÕES SOBRE ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO.....	42
3.1 Introdução	42
3.2 Tipos de aderência	49
3.2.1 Aderência por adesão.....	49

3.2.2	Aderência por atrito	50
3.2.3	Aderência mecânica.....	50
3.3	Fatores que influenciam na aderência	51
3.3.1	Estado superficial da armadura.....	52
3.3.2	Diâmetro das barras	52
3.3.3	Resistência do concreto	54
3.3.4	Composição da matriz	54
3.3.5	Adensamento	55
3.3.6	Resistência do agregado	55
3.3.7	Disposição das armaduras	56
3.4	Zonas de aderência	57
4	ADERÊNCIA MATRIZ-AGREGADO	63
4.1	Caracterização dos agregados.....	64
4.1.1	Utilização de resíduos como agregados.....	68
4.1.2	Resíduos de raspa de pneu.....	70
4.1.3	Resíduo plástico da indústria farmacêutica	75
4.2	Considerações sobre aderência matriz – agregado	77
5	ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA.....	80
5.1	Ensaio de arrancamento com anel circunferencial (<i>Ring pull out test</i>)	80
5.2	Ensaio de viga (<i>Beam test</i>)	81
5.3	Ensaio de arrancamento (<i>Pull out test</i>).....	82
5.3.1	Modelo proposto pelo CEB/ FIP	82
5.3.2	Modelo proposto pelo ASTM – C 234	85
5.4	Ensaio de extremo de viga (<i>Beam end test</i>)	87
5.5	Ensaio de conformação superficial.....	87
5.6	Ensaio das quatro barras	89
6	PROGRAMA EXPERIMENTAL I	91
6.1	Materiais constituintes.....	92
6.1.1	Espumogen	93
6.1.2	Aditivo	93
6.2	Proporção dos materiais.....	93
6.3	Caracterização do concreto.....	95
6.4	Barras de aço	97
6.5	Ensaio de conformação superficial.....	97
6.6	Ensaio de arrancamento (<i>Pull out test</i>).....	100
7	PROGRAMA EXPERIMENTAL I: RESULTADOS	104
7.1	Ensaio de conformação superficial.....	104
7.1.1	Tensão média de aderência.....	105
7.2	Determinação da tensão de aderência pela NBR 6118.....	105
7.3	Ensaio de arrancamento (<i>pull out test</i>)	106
7.4	Módulo de deformação	109
8	PROGRAMA EXPERIMENTAL II	111
8.1	Materiais constituintes.....	112
8.1.1	Cimento	112
8.1.2	Agregados.....	112
8.1.2.1	Areia	112

8.1.2.2	Brita	113
8.1.3	Espumogen	113
8.1.4	Aditivo plastificante	114
8.2	Proporção dos materiais.....	114
8.3	Caracterização do concreto.....	115
8.4	Barras de aço	116
8.5	Ensaio de conformação superficial.....	116
8.6	Ensaio de arrancamento (Pull out).....	118
9	PROGRAMA EXPERIMENTAL II: RESULTADOS	121
9.1	Ensaio de conformação superficial.....	121
9.1.1	Tensão média de aderência (τ_m CASTRO).....	123
9.2	Determinação da tensão de aderência pela NBR 6118.....	124
9.3	Ensaio de arrancamento (<i>Pull out test</i>).....	124
9.3.1	Tensão média de aderência (τ_{mCEB})	125
10	COMPARATIVO ENTRE PROGRAMAS EXPERIMENTAIS I E II.....	127
10.1	Comparativo das densidades	127
10.2	Comparativo dos resultados da resistência à compressão F_c	128
10.3	Comparativo dos resultados de resistência à tração f_t	129
10.4	Ensaio de conformação superficial.....	130
10.4.1	Coeficiente de conformação superficial η	130
10.4.2	Tensão média de aderência (τ_m CASTRO em MPa).....	131
10.5	Ensaio de arrancamento (τ_{RmCEB})	132
10.6	Tensão de aderência proposta pela NBR 6118 ($\tau_{NBR 6118}$).....	133
11	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
11.1	Programa Experimental I.....	136
11.1.1	Ensaio de conformação superficial.....	136
11.1.2	Ensaio de arrancamento (pull out).....	137
11.2	Programa Experimental II	137
11.2.1	Ensaio de conformação superficial.....	138
11.2.2	Ensaio de arrancamento (pull out).....	138
11.3	Programa Experimental I x Programa Experimental II.....	138
11.4	Sugestões para pesquisas futuras	139
	OBRAS CITADAS	140
	OBRAS CONSULTADAS	145
	ANEXO A: PROGRAMA EXPERIMENTAL I - ANÁLISE DOS RESULTADOS	147
A.1	Resumo dos resultados	147
A.2	Análise dos resultados	149
A.2.1	Resistência à compressão f_c entre os concretos leve e bombeado:.....	149
A.2.2	Análise da resistência à tração por compressão diametral f_t entre os concretos leve e bombeado	150
A.2.3	Análise da relação f_t/f_c	150
A.2.4	Análise da relação entre f_t e f_c	151
A.2.5	Análise do módulo de deformação	153
Total.....		154
A.2.6	Análise das tensões de aderência: τ_m CASTRO X $\tau_{NBR 6118}$	154

A.2.7	Análise das tensões de aderência: τ_m CASTRO X $\tau_{NBR\ 6118}$ X $\tau_{Rm\ CEB}$	156
A.2.8	Análise da tensão de aderência: τ_m CASTRO X Resistência à compressão f_c	157
A.2.9	Análise da tensão de aderência: τ_m CASTRO X Resistência à tração por compressão diametral f_t	158
A.2.10	Análise da tensão de aderência τ_m CASTRO X Resistência à tração por compressão diametral f_t X Resistência à compressão f_c	160
A.2.11	Análise da tensão de aderência $\tau_{NBR\ 6118}$ X Resistência à compressão f_c	160
A.2.12	Análise da tensão de aderência $\tau_{NBR\ 6118}$ X Resistência à tração por compressão diametral f_t	162
A.2.13	Análise da tensão de aderência $\tau_{NBR\ 6118}$ X Resistência à tração por compressão diametral f_t X Resistência à compressão f_c	163
A.2.14	Análise da tensão de aderência $\tau_{Rm\ CEB}$ X Resistência à compressão f_c	164
A.2.15	Análise da tensão de aderência $\tau_{Rm\ CEB}$ X Resistência à tração por compressão diametral f_t	166
A.2.16	Análise da tensão de aderência $\tau_{Rm\ CEB}$ X Resistência à tração por compressão diametral f_t X Resistência à compressão f_c	167
A.3	Gráficos Tensão τ X Deslocamento s	168
A.3.1	Gráfico CBBA.....	168
A.3.2	Gráfico CBBE.....	169
A.3.3	Gráfico CBFA.....	169
A.3.4	Gráfico CBEF.....	170
ANEXO B: PROGRAMA EXPERIMENTAL II - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....		171
B.1	Resumo dos resultados.....	171
B.2	Análise dos resultados.....	172
B.2.1	Resistência à compressão f_c entre os concretos leve e bombeado.....	173
B.2.2	Análise de f_t entre os concretos leve e bombeado.....	173
B.2.3	Análise da relação f_t/f_c	174
B.2.4	Análise da correlação entre f_t e f_c	175
R-quadrado ajustado.....		176
B.2.5	Análise das tensões de aderência: τ_m CASTRO X $\tau_{NBR\ 6118}$	176
B.2.6	Análise das tensões de aderência: τ_m CASTRO X $\tau_{NBR\ 6118}$ X $\tau_{m\ CEB\ RC6}$	177
B.2.7	Análise da tensão de aderência: τ_m CASTRO X Resistência à compressão f_c	178
B.2.8	Análise da tensão de aderência: τ_m CASTRO X Resistência à tração por compressão diametral f_t	180
B.2.9	Análise da tensão de aderência τ_m CASTRO X Resistência à tração por compressão diametral f_t X Resistência à compressão f_c	182
B.2.10	Análise da tensão de aderência $\tau_{NBR\ 6118}$ X Resistência à compressão f_c	183
B.2.11	Análise da tensão de aderência $\tau_{NBR\ 6118}$ X Resistência à tração por compressão diametral f_t	184
B.2.12	Análise da tensão de aderência $\tau_{NBR\ 6118}$ X Resistência à tração por compressão diametral f_t X Resistência à Compressão f_c	186
B.2.13	Análise da tensão de aderência $\tau_{m\ CEB}$ X Resistência à compressão f_c	187
B.2.14	Análise da tensão de aderência $\tau_{m\ CEB}$ X Resistência à tração por compressão Diametral f_t	188
B.2.15	Análise da tensão de aderência $\tau_{m\ CEB}$ X Resistência à tração por compressão Diametral f_t X Resistência à Compressão f_c	190
B.3	Gráficos Tensão τ x Deslocamento s	191
B.3.1	Gráfico CBBA.....	191
B.3.2	Gráfico CBBE.....	191

B.3.3	Gráfico CBFA	192
B.3.4	Gráfico CBFE	192
B.3.5	Gráfico CBPA	193
B.3.6	Gráfico CBPE	193
ANEXO C: RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO		194

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos concretos leves.	27
Figura 2: Classificação dos concretos leves por TEIXEIRA FILHO (1992).	28
Figura 3: Relação teor de cimento / resistência à compressão.	30
Figura 4: Resistência à tração simples por compressão diametral.	32
Figura 5: Comparativo da fluência entre concreto leve e comum.	37
Figura 6: Trajetória de tensões.	44
Figura 7: Resistência à fadiga x nº de ciclos.	47
Figura 8: Aderência por adesão.	50
Figura 9: Aderência por atrito.	50
Figura 10: Aderência mecânica.	51
Figura 11: Distribuição das microfissurações.	52
Figura 12: Influência da direção de concretagem.	56
Figura 13: Influência da posição das barras.	57
Figura 14: Zona de contato agregado-matriz em concreto normal (a) e leve (b).	67
Figura 15: Aspecto dos resíduos de raspa de pneu.	75
Figura 16: Curva granulométrica do resíduo plástico.	76
Figura 17: Aspecto dos grãos do resíduo plástico.	77
Figura 18: Microestrutura da interface matriz-agregado leve.	78
Figura 19: Visão ampliada da camada de etringita na interface.	79
Figura 20: Ensaio de arrancamento com anel circunferencial.	81
Figura 21: Esquema de ensaio de aderência na flexão.	81
Figura 22: Esquema do corpo-de-prova no ensaio de arrancamento (<i>pull out test</i>).	83
Figura 23: Modelo ASTM C 234 com barra vertical.	85
Figura 24: Modelo ASTM C 234 com barra horizontal.	86
Figura 25: Esquema de ensaio de extremo de viga (<i>beam end test</i>).	87
Figura 26: Esquema do ensaio de conformação superficial.	88
Figura 27: Esquema do corpo-de-prova empregado no ensaio de quatro barras.	90
Figura 28: Espumogen utilizado na mistura.	93
Figura 29: Betoneira utilizada na confecção dos traços.	94
Figura 30: Furadeira com hélice adaptada.	94
Figura 31: Mistura do espumogen à água da mistura.	95
Figura 32: Determinação da resistência à tração por compressão diametral.	96
Figura 33: Esquematização das formas do ensaio de conformação superficial.	98
Figura 34: Formas utilizadas no ensaio de conformação superficial.	99
Figura 35: Corpos-de-prova para o ensaio de conformação superficial.	99
Figura 36: Representação esquemática do CP do ensaio de arrancamento.	100
Figura 37: Formas cilíndricas do ensaio de arrancamento.	101

Figura 38: Corpos-de-prova (CBBA, CBBE, CBFA, CBFE, CBPA, CBPE).....	101
Figura 39: Esquema do equipamento utilizado no ensaio	102
Figura 40: Execução do ensaio de arrancamento.	102
Figura 41: Célula de carga.....	103
Figura 42: Execução do ensaio de determinação do módulo de deformação.....	109
Figura 43: Formas do ensaio de conformação superficial.....	117
Figura 44: Ensaio de conformação superficial.	118
Figura 45 : Formas do ensaio de arrancamento.....	119
Figura 46 : CP do ensaio de arrancamento.....	119
Figura 47: Máquina do ensaio de arrancamento.....	120
Figura 48: Máquina do ensaio de arrancamento.....	120
Figura 49: Histograma comparativo das densidades.....	128
Figura 50: Histograma comparativo de f_c	129
Figura 51: Histograma comparativo de f_t	130
Figura 52: Histograma comparativo de η	131
Figura 53: Histograma comparativo de τ_m CASTRO.....	132
Figura 54: Histograma comparativo de τ_{RmCEB}	133
Figura 55: Histograma comparativo de $\tau_{NBR 6118}$	134
Figura 56: Correlação entre f_c e f_t	152
Figura 57: Tensões de aderência τ_m CASTRO X $\tau_{NBR 6118}$	155
Figura 58: Resistência à compressão f_c X τ_m CASTRO.....	157
Figura 59: Resistência à tração por compressão diametral f_t X τ_m CASTRO.....	159
Figura 60: Resistência à compressão (f_c) X $\tau_{NBR 6118}$	161
Figura 61: Resistência à tração por compressão diametral f_t X $\tau_{NBR 6118}$	163
Figura 62: Resistência à compressão f_c X $\tau_{Rm CEB}$	165
Figura 63: Resistência à tração por compressão diametral f_t X $\tau_{Rm CEB}$	166
Figura 64: Gráfico tensão x deslocamento de CBBA.....	168
Figura 65: Gráfico tensão x deslocamento de CBBE.....	169
Figura 66: Gráfico tensão x deslocamento de CBFA.....	169
Figura 67: Gráfico tensão x deslocamento de CBFE.....	170
Figura 68: Correlação entre f_c e f_t	175
Figura 69: Tensões de aderência τ_m CASTRO X $\tau_{NBR 6118}$	177
Figura 70: Resistência à compressão f_c X τ_m CASTRO.....	179
Figura 71: Resistência à tração por compressão diametral f_t X τ_m CASTRO (MPa)	181
Figura 72: Resistência à compressão f_c X $\tau_{NBR 6118}$	183
Figura 73: Resistência à tração por compressão diametral f_t X $\tau_{NBR 6118}$	185
Figura 74: Resistência à compressão f_c X τ_m CEB.....	187
Figura 75: Resistência à tração por compressão f_t X τ_m CEB.....	189
Figura 76: Gráfico tensão x deslocamento de CBBA.....	191
Figura 77: Gráfico tensão x deslocamento de CBBE.....	191
Figura 78: Gráfico tensão x deslocamento de CBFA.....	192
Figura 79: Gráfico tensão x deslocamento de CBFA.....	192
Figura 80: Gráfico tensão x deslocamento de CBPA.....	193
Figura 81: Gráfico tensão x deslocamento de CBPE.....	193

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Massa específica dos agregados leves.	28
Tabela 2: Relação resistência à compressão/ massa específica.	29
Tabela 3: Relação teor de cimento/ resistência à compressão.	31
Tabela 4: Comprimento de ancoragem - ACI 318 R (1999).	61
Tabela 5: Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado.	68
Tabela 6: Resultados das características do concreto com raspa de pneu.	72
Tabela 7: Composição dos traços.	73
Tabela 8: Resultados dos ensaios.	74
Tabela 9: Caracterização do resíduo plástico.	77
Tabela 10: Proporção dos traços.	95
Tabela 11: Pesos e densidades dos CP.	96
Tabela 12: Ensaio de caracterização do concreto.	97
Tabela 13: Caracterização das barras de aço.	97
Tabela 14: Distância média entre fissuras (cm), coeficientes de variação e conformação superficial.	105
Tabela 15: Tensões médias de aderência segundo CASTRO (2000).	105
Tabela 16: Tensão de aderência segundo a NBR 6118 (MPa).	106
Tabela 17: Tensão de aderência em CBBA.	106
Tabela 18: Tensão de aderência em CBBE.	107
Tabela 19: Tensão de aderência em CBFA.	107
Tabela 20: Tensão de aderência em CBFE.	108
Tabela 21: Tensão de aderência em CBPA.	108
Tabela 22: Tensão de aderência em CBPE.	108
Tabela 23: Módulos de deformação.	110
Tabela 24: Análise do agregado miúdo.	113
Tabela 25: Análise do agregado graúdo.	113
Tabela 26: Caracterização do aditivo.	114
Tabela 27: Proporção dos traços.	114
Tabela 28: Pesos e densidades dos CP.	115
Tabela 29: Ensaio de caracterização do concreto	116
Tabela 30: Caracterização das barras de aço.	116
Tabela 31: Distância média entre fissuras (cm) e coeficiente de variação (%).	122
Tabela 32: Coeficiente de conformação superficial.	123
Tabela 33: Tensões médias de aderência segundo CASTRO (2000).	124
Tabela 34: Tensão de aderência pela NBR 6118.	124
Tabela 35: Tensão média de aderência para deslocamentos específicos.	126
Tabela 36: Tensões médias de aderência pelo CEB RC6.	126

Tabela 37: Comparativo das densidades.	127
Tabela 38: Comparativo de f_c (MPa).	128
Tabela 39: Comparativo de f_t (MPa).	129
Tabela 40: Coeficientes η	130
Tabela 41: Tensões médias de aderência ($\tau_{m \text{ CASTRO}}$ em MPa).	131
Tabela 42: Tensões médias de ruptura ($\tau_{Rm \text{ CEB}}$).	132
Tabela 43: Tensões de aderência $\tau_{NBR \ 6118}$	133
Tabela 44: Ensaio de caracterização do concreto.	147
Tabela 45: Distância média entre fissuras (cm) e coeficientes de conformação superficial.	147
Tabela 46: Tensões médias de aderência segundo CASTRO (2000).	148
Tabela 47: Tensão de aderência segundo a NBR 6118 (MPa).	148
Tabela 48: Tensão média de ruptura pelo CEB RC 6 ($\tau_{Rm \text{ CEB}}$).	148
Tabela 49: Módulos de deformação.	149
Tabela 50: Relação f_t/f_c (%).	151
Tabela 51: Módulo de deformação $E_{NBR \ 6118} \times E_{\text{ENSAIO}}$	153
Tabela 52: Módulo de deformação $E_{\text{ESP.}} \times E_{\text{PLAST.}}$	154
Tabela 53: $\tau_{m \text{ CASTRO}} \times \tau_{NBR \ 6118}$	155
Tabela 54: $\tau_{m \text{ CASTRO}} \times \tau_{NBR \ 6118} \times \tau_{Rm \text{ CEB}}$	156
Tabela 55: $f_c \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$	157
Tabela 56: $f_t \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$	158
Tabela 57: $f_c \times f_t \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$	160
Tabela 58: $f_c \times \tau_{NBR \ 6118}$	161
Tabela 59: $f_t \times \tau_{NBR \ 6118}$	162
Tabela 60: $f_c \times f_t \times \tau_{NBR \ 6118}$	164
Tabela 61: $f_c \times \tau_{Rm \text{ CEB}}$	165
Tabela 62: $f_t \times \tau_{Rm \text{ CEB}}$	166
Tabela 63: $f_c \times f_t \times \tau_{Rm \text{ CEB}}$	167
Tabela 64: Ensaio de caracterização do concreto.	171
Tabela 65: Distância entre fissuras (cm) e Coeficiente de variação (%).	171
Tabela 66: Tensões médias de aderência segundo CASTRO (2000).	172
Tabela 67: Tensões médias de aderência pelo CEB RC6.	172
Tabela 68: Tensão de aderência pela NBR 6118.	172
Tabela 69: Relação f_t/f_c (%).	174
Tabela 70: $\tau_{m \text{ CASTRO}} \times \tau_{NBR \ 6118}$	176
Tabela 71: $\tau_{m \text{ CASTRO}} \times \tau_{NBR \ 6118} \times \tau_{m \text{ CEB}}$	178
Tabela 72: $f_c \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$	179
Tabela 73: $f_t \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$	181
Tabela 74: $f_c \times f_t \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$	182
Tabela 75: $f_c \times \tau_{NBR \ 6118}$	183
Tabela 76: $f_t \times \tau_{NBR \ 6118}$	184
Tabela 77: $f_c \times f_t \times \tau_{NBR \ 6118}$	186
Tabela 78: $f_c \times \tau_{m \text{ CEB}}$	187
Tabela 79: $f_t \times \tau_{m \text{ CEB}}$	188
Tabela 80: $f_c \times f_t \times \tau_{m \text{ CEB}}$	190
Tabela 81: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBBA.	194
Tabela 82: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBBE.	195
Tabela 83: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBFA.	195
Tabela 84: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBFE.	196
Tabela 85: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBPA.	196
Tabela 86: Resultado ensaio do módulo de deformação secante para CBPE.	197

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Tensão de carregamento do ensaio de resistência à tração.....	32
Equação 2: Resistência à tração do concreto leve pelo CEB.....	33
Equação 3: Tensão de tração do concreto leve pelo CEB.....	33
Equação 4: Módulo de deformação pela NBR 6118.....	34
Equação 5: Módulo de deformação pelo ACI 318 R.....	35
Equação 6: Tensão de aderência pela NBR 6118.....	58
Equação 7: Resistência à tração.....	58
Equação 8: Resistência média à tração.....	58
Equação 9: Resistência à tração característica.....	58
Equação 10: Comprimento de ancoragem pelo ACI 318 R.....	59
Equação 11: Contribuição da armadura de confinamento.....	59
Equação 12: Fator de limitação.....	59
Equação 13: Velocidade de carregamento.....	83
Equação 14: Tensão de aderência proposta pelo CEB.....	84
Equação 15: Coeficiente de conformação superficial.....	88

Equação 16: Tensão média de aderência proposta por CASTRO (2000).....	89
Equação 17: Tensão de ruptura mínima admissível pelo CEB.....	109
Equação 18: Coeficiente de variação.....	122
Equação 19: Tensão média de aderência.....	125
Equação 20: Tensão média de aderência admissível pelo CEB.....	125
Equação 21: Correlação entre F_c e F_t pela NBR 6118.....	125

RESUMO

A utilização do concreto armado na construção civil só é possível em razão da ação conjunta entre a armadura e o concreto, ou seja, a aderência completa entre esses materiais. O entendimento desse mecanismo permite prever o comportamento do conjunto mediante solicitações externas. Para tanto, sob o foco científico, vários estudos são realizados acerca do comportamento da aderência aço-concreto. Porém, em sua grande maioria, limitam-se apenas aos concretos convencionais, não contemplando os concretos especiais tal como o concreto leve. Além disso, no contexto de compatibilização das atividades produtivas no qual o mundo está inserido, tornou-se notório a destinação racional dos resíduos gerados pelos diversos setores da indústria. Com efeito, o reaproveitamento de resíduos na construção civil tem sido alvo de pesquisas científicas, que visam propor soluções alternativas para utilização racional, ambientalmente e tecnologicamente seguras. Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento da aderência entre o aço e o concreto leve, com incorporação de resíduos de raspa de pneu e resíduos plásticos provenientes de indústria farmacêutica. Nos programas experimentais foram mensuradas as tensões de aderência seguindo-se uma formulação teórica proposta e as especificações de normas. Em seguida realizou-se um estudo comparativo entre os concretos bombeados convencional e leve quanto às tensões de aderência obtidas nos ensaios de conformação superficial e arrancamento, seguidos da análise estatística a fim de que fosse identificada a influência de diversos parâmetros no comportamento da aderência aço-concreto.

Palavras chave: Concreto leve, concreto convencional, resíduos.

ABSTRACT

The use of reinforced concrete in construction can only be conceivable because of the simultaneous and interdependent performance of both concrete and steel bars, known as bond strength. The understanding of such phenomenon will allow and assure the foreknowledge of reinforced concrete behavior under stress conditions. Bond between concrete and steel bars has been largely studied. However most of that scientific work has been limited to ordinary concrete and not extended to special cases such as lightweight concrete. It is well known that in order to make and preserve the world's present productive activities it is needed rational destination of residues from the various industrial branches. In fact the reuse of solid waists in construction has been object of scientific research, which is an attempt to propose rationally, environmentally and technologically correct answers. This research presents a study on bond behavior of lightweight concrete. Tire chips and pharmacy industry plastic residues were used as aggregate to obtain lightweight concrete. Within the experimental program bond strength was measured according to the proposed theory formulation and technical requirements. Bond strength results obtained from bar friction coefficient test and pull out test on both regular and lightweight pumping concrete went through a comparative study and statistical analysis. This way the main causes that influence in the bond behavior could be identified.

Key words: Lightweight concrete, ordinary concrete, residues.

1 INTRODUÇÃO

O estudo da aderência tem sido objeto de inúmeras pesquisas que visam observar e avaliar o comportamento desse mecanismo entre o concreto e armadura tal como o aço e armaduras em PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro). Na Universidade Federal Fluminense destacam-se pesquisas realizadas por MOURA (1991), que desenvolveu um estudo sobre a influência de inibidores de corrosão na aderência aço-concreto, ALVES (1997) cujo enfoque da pesquisa baseou-se em analisar comportamento da aderência do concreto com barras em PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro), dentre outros autores.

Além disso, a utilização de resíduos como agregados em concretos desta dissertação encontrou motivação em estudos realizados na referida instituição tais como, CAMPOS JÚNIOR (1993) com os estudos relacionados ao composto de argamassa de cimento com raspa de pneu, PIRES (2001) sobre o comportamento do concreto utilizando rejeito do processo de jateamento de peças metálicas recém-forjadas, RIBEIRO (2002) que pesquisou a potencialidade do uso do rejeito de carvão vegetal em artefatos de concreto, OLIVEIRA (2002) que avaliou o potencial de aplicação de rejeitos plásticos na construção civil, FREITAS (2004) que pesquisou sobre a produção e as propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso e MATTOS (2005) cujo enfoque foi a aplicação sustentável de materiais alternativos em blocos de concreto celular.

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Conhecer o comportamento da aderência entre a armadura e o concreto que a envolve é fundamental, visto que por intermédio deste estudo é possível avaliar a capacidade de carga das estruturas em concreto armado, estabelecendo-se deste modo, a definição de regras de projeto de ancoragens e emendas por traspasse nas estruturas de concreto.

Usualmente a aderência é representada pela relação entre a tensão de aderência e o deslocamento relativo entre a armadura e o concreto. Neste estudo foram realizados ensaios de extração de barras de armadura embutidas em corpos-de-prova de concreto, que permitiram avaliar o comportamento da aderência aço-concreto.

Porém, existem questões que merecem devida consideração, como por exemplo, o comportamento da aderência de armaduras associadas a concretos não convencionais, tal como o concreto leve.

Sendo assim, tem-se por objetivo principal nesta pesquisa avaliar o comportamento da aderência de barras de aço ao concreto leve. Posto que nas peças de concreto armado confeccionadas com concreto leve, o efeito das solicitações na aderência não é conhecido, acarretando na necessidade de estudos mais consistentes.

É válido mencionar que embora o concreto leve tenha suas vantagens no uso como isolante térmico de baixo peso específico, não tem uma vasta utilização na indústria da construção civil. Este tipo de concreto é constituído por bolhas de ar ou gás em matriz sólida, normalmente cimentícia, que podem ser incorporadas à matriz por processos químicos ou mecânicos.

Além disso, considerando-se que o desenvolvimento tecnológico em diversos setores da construção civil criou, imperiosamente, a necessidade de estudos específicos acerca das propriedades dos materiais utilizados no concreto e o modo de interação entre eles, tornou-se necessário viabilizar o equilíbrio entre as atividades produtivas no contexto de preservação ecológica em que o Brasil está inserido. Surge então como alternativa o aproveitamento de resíduos provenientes de diversos setores da indústria na construção civil.

No estudo do desempenho da aderência aço/concreto leve serão utilizados nos programas experimentais desta dissertação resíduos urbanos em substituição parcial aos agregados convencionais. O aproveitamento de elementos nocivos ao meio ambiente tem sido objeto de muitos estudos, apresentando potencialidades significativas em economia de custos para a confecção do concreto.

Portanto, o estudo aqui proposto tem por finalidade contribuir para o conhecimento da utilização de resíduos urbanos como agregados na construção civil, para produção de um concreto armado leve onde se tenha maior domínio do seu comportamento.

1.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

A primeira etapa de desenvolvimento deste estudo foi a identificação do tema, sendo definidos os objetivos e as possíveis variáveis a serem estudadas no programa experimental.

Em seguida, realizou-se uma revisão bibliográfica no intuito de estabelecer os conceitos fundamentais para o entendimento do tema proposto. Dentre os conceitos essenciais abordados, se destacam o estudo sobre o concreto leve, a forma de interação matriz-agregado e entre matriz-armadura. Além disso, são estudadas as variáveis que influenciam no desempenho do conjunto quando estiver sob atuação de solicitações, tais como o diâmetro da barra, o tipo de nervura, a conformação superficial das barras, posição das barras conforme a posição de concretagem, porosidade do concreto além do tipo de agregado leve, o fator A/C dentre outros conceitos mencionados nesta dissertação. Foi apresentado um estudo sobre o comportamento do mecanismo de aderência aço-concreto (concretos bombeados convencional e celular), além dos ensaios pertinentes à sua verificação.

Posteriormente, na elaboração dos programas experimentais, foram empregados os ensaios de conformação superficial e arrancamento, buscando-se avaliar o comportamento da aderência aço-concreto.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação se estrutura em 11 capítulos, dos quais o primeiro é a introdução na qual foram ressaltados os principais objetivos da pesquisa.

No capítulo dois foi efetuada uma revisão bibliográfica sobre o concreto leve, incluindo-se um breve histórico a respeito de sua utilização, estudos realizados por outros autores e suas principais propriedades.

Sendo objetivo desta dissertação a avaliação do comportamento da aderência aço-concreto, será apresentado no capítulo três, um levantamento bibliográfico sobre o mecanismo da aderência aço-concreto e os fatores que o influenciam, como por exemplo, o tipo de carregamento aplicado ao concreto.

O capítulo quatro aborda, de forma geral, a relação existente entre o agregado e a matriz, mencionando-se características do agregado que influenciam no desempenho do

concreto. Este capítulo enfatiza um estudo sobre os resíduos propostos no programa experimental, a saber: raspa de pneu e resíduo plástico oriundo da indústria farmacêutica.

No capítulo cinco encontra-se uma revisão bibliográfica dos principais ensaios empregados no estudo da aderência entre o concreto e o aço.

O capítulo seis constitui-se do programa experimental I, envolvendo o ensaio de conformação superficial das armaduras e o ensaio de arrancamento (*pull out*). Faz-se necessário mencionar que os ensaios foram realizados em concretos bombeados convencional e leve, com resistência aos 28 dias de idade, incorporados com resíduos de raspa de pneu e resíduo farmacêutico. Em seguida são apresentados no capítulo sete, os resultados obtidos nos ensaios mencionados.

Em virtude do número de resultados encontrados nos ensaios de arrancamento e conformação superficial no programa experimental I, referentes aos capítulos seis e sete, foi decidido refazer esses mesmos ensaios no intuito de verificar os valores das tensões de aderência obtidas. Assim, os capítulos oito e nove se referem, respectivamente, ao novo programa experimental realizado e os resultados obtidos.

No capítulo 10 foi realizado um estudo comparativo e ilustrativo dos resultados encontrados nos programas experimentais I e II.

É importante salientar que as análises estatísticas correspondentes aos programas experimentais I e II constam os anexos A e B.

No capítulo 11 são apresentadas as considerações finais, com dados comparativos deste estudo, incluindo-se as sugestões para pesquisas futuras.

2 CONCRETO LEVE

A utilização de concretos especiais como alternativa na construção civil é decorrente do avanço crescente da técnica de construir, induzindo ao aparecimento de materiais que correspondam às condições impostas pelo mercado.

O concreto leve surgiu com o intuito de reduzir o peso próprio das estruturas, naturalmente elevado, quando do emprego do concreto convencional. O aproveitamento desse tipo de concreto traz dentre outros benefícios, além da redução do peso próprio da estrutura devido à diminuição de sua massa específica, o aperfeiçoamento de propriedades tais como isolamento térmico e acústico.

Ao se optar pela utilização do concreto leve em sistemas construtivos, seja para qualquer finalidade, estrutural ou não estrutural, é necessário que se tenha o pleno conhecimento das propriedades dos materiais que o constitui. É importante ter conhecimento do seu comportamento sob atuação de cargas.

2.1 HISTÓRICO

As civilizações primitivas utilizavam os materiais em sua forma natural, não havendo qualquer processo de aperfeiçoamento ou adaptação, limitando-se assim seu uso. Deste modo, materiais tais como, madeira, pedra e barro, possuíam ampla utilização nas construções. Contudo, o processo evolutivo natural da humanidade levou ao aumento das suas necessidades. Os aspectos nos padrões de exigência como, por exemplo, resistência, durabilidade e aparência se tornaram prioridade. Dentro deste contexto, surgiram o clínquer, o cimento portland e posteriormente o concreto, amplamente utilizado até a atualidade.

Em seguida, a incorporação de barras de aço à mistura, configurando-se o então chamado, concreto armado, permitiu ao concreto maior capacidade de suporte de cargas e viabilizando a realização de projetos mais ousados e seguros.

Ao longo dos anos o concreto teve constantes transformações e inovações, com o objetivo de satisfazer as necessidades do homem. As concepções arquitetônicas despontavam, forçando o surgimento de estruturas com peso próprio reduzido.

O concreto leve surgiu então como solução para vencer os obstáculos das estruturas de grandes vãos, haja visto a redução da massa específica, característica peculiar à esta variação do concreto, o que viabilizou a realização de diversos projetos.

WEIGLER e KARL (1974, p.2) citam a construção do Pantheon de Roma no séc II a.C., como a primeira obra em concreto leve, com a utilização de pedra pome como agregado.

Dentre as variações de concreto leve surgiu na Polônia no séc XIX, uma espécie de concreto celular em 1889, patenteado por Hoffmann. A argamassa celular era composta de um aglomerante (cimento ou gesso), e o ácido clorídrico, que era incorporado à mistura como agente gerador de gás, e reagia então com o bicarbonato de sódio.

Várias patentes surgiram para a obtenção do concreto celular. Erickson em 1917 patenteou um concreto celular constituído de uma argamassa de sílica e cal aeradas por agente metálico e posteriormente curadas numa câmara de vapor, dando início à fase dos concretos auto clavados (MANUAL TÉCNICO PARA IMPLEMENTAÇÃO – HABITAÇÃO 1.0, 2002 p.41).

No século XX foi lançada segundo TEIXEIRA FILHO¹ (1992 *apud* FREITAS 2004, p.25), “a pedra fundamental para a produção de concretos celulares espumosos”. Obtido com espuma com cola vegetal, gelatina, formaldeídos e sabões de resina, cujo patenteador era a BAYER. Foi constatado, posteriormente, que este tipo de concreto não oferecia, uma otimização significativa das propriedades físicas e mecânicas. Isso vinha em contraposição ao concreto celular de cura à vapor, utilizado desde 1928 pela empresa sueca Cristian Nielsen que após 1934 teve destaque mundial com a produção do “Siporex”.

¹ TEIXEIRA FILHO, Fernando José *Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos*. Dissertação de Mestrado, Escola politécnica da USP, São Paulo, 1992, 112p.

O concreto leve constituído por agregado leve de argila expandida teve utilização na Iª Guerra Mundial pelos E.U.A. na construção de barcas e navios. Foram elaborados pelos Estados Unidos na década de 20 blocos de concreto feitos com o mesmo material. Devido ao fato de ser um material relativamente recente, eram escassos os critérios de projetos para estruturas em concreto leve.

A aplicação do concreto leve se fez necessário ainda no começo da década de 30 em seu uso na plataforma superior da ponte de S. Francisco-Oakland, se mostrando como a solução mais viável para obtenção de um projeto mais econômico. Durante a IIª Guerra Mundial, a história se repetiu com a construção de mais de cem navios em concreto leve, direcionando o uso das chapas de aço para outras aplicações essenciais.

Imediatamente após a IIª Guerra Mundial, o National Bureau of standards (NBS) e o U. S. Bureau of Reclamation desenvolveram estudos mais específicos das propriedades do concreto leve utilizando-se diferentes tipos de agregados leves. A partir daí, surgiu maior interesse dos setores de pesquisa, tendo em vista a potencialidade de utilização do novo material em sistemas estruturais de edifícios, lajes, pontes e pré-fabricados.

Vários estudos prosseguiram, tendo em vista solucionar os problemas de controle de expansão volumétrica e estabilidade da massa até então apresentados pelos concretos espumosos de base orgânica, sem sucesso até a década de sessenta (FREITAS, 2004 p.25).

Atualmente, existem instituições internacionais normalizadoras que realizam estudos e ensaios para o concreto leve. O concreto leve e os agregados que o constituem foram inicialmente abordados na ASTM em 1956. Em 1967 o ACI – American Concrete Institute publicou o Guide for Strutural Lightweight Aggregate Concrete. Em 1977, o CEB/ FIP – Commitee Euro – International du Béton publicou o Lightweight aggregate concrete – Manual of Design and Technology, no bulletin d’Information 43. Estas instituições ainda possuem normas específicas para o concreto leve e os elementos que o constitui.

2.2 DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÕES

O concreto leve é aquele cuja massa específica é reduzida em relação ao concreto dito tradicional. Enquanto estes apresentam massas específicas entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 , o

concreto leve tem sua massa específica num valor máximo de 1900 kg/m^3 . HOLM² (1994, *apud* FREITAS, 2004 p.29) confirma este valor para concretos produzidos com agregados leves, com fins estruturais cuja resistência mínima de compressão seja 17 MPa.

É possível reduzir a massa específica através da incorporação de ar à mistura, por três maneiras: incorporação de ar na pasta de cimento, caracterizando o concreto celular; nas partículas do agregado tornando-o leve originando os concretos de agregados leves e por fim, extinguindo-se a presença agregado miúdo na mistura, resultando no concreto sem finos.

NEVILLE (1997, p.675) admite que o intervalo prático de valores de massa específica dos concretos leves é de cerca de 300 kg/m^3 a 1800 kg/m^3 . Ele ainda destaca que a classificação dos concretos por meio de sua massa específica é sensível tendo em vista sua relação direta com a resistência que ele apresenta.

O ACI (1989, *apud* RIBEIRO 2000, p.9) classifica os concretos leves de acordo com sua massa específica, em três categorias:

1. concreto de baixa massa específica: para fins não estruturais, com o propósito de isolamento térmica, possui massa específica de 300 kg/m^3 a 800 kg/m^3 e resistência à compressão inferior a 7 MPa;
2. concreto de resistência moderada: com resistência à compressão entre 7 MPa e 17 MPa. Suas características são intermediárias entre o concreto de baixa massa específica e o estrutural quando se trata de isolamento térmica;
3. concreto estrutural: apropriado para fins estruturais com incorporação de agregados leves e com massa específica aos 28 dias na faixa de 1440 kg/m^3 a 1850 kg/m^3 e com resistência mínima de 17 MPa.

A Figura 1 mostra conforme a classificação do ACI 213 R-87, as três categorias de concreto, incluindo os tipos de agregados possíveis de serem incorporados.

² HOLM, Thomas A. *Lightweight Concrete and Aggregates. STP169-C, Significance of Test and Properties of concrete* – Manquing Materials – ASTM Publications Code Number (PCN) 04-169030-07, 1994, p.522-532.

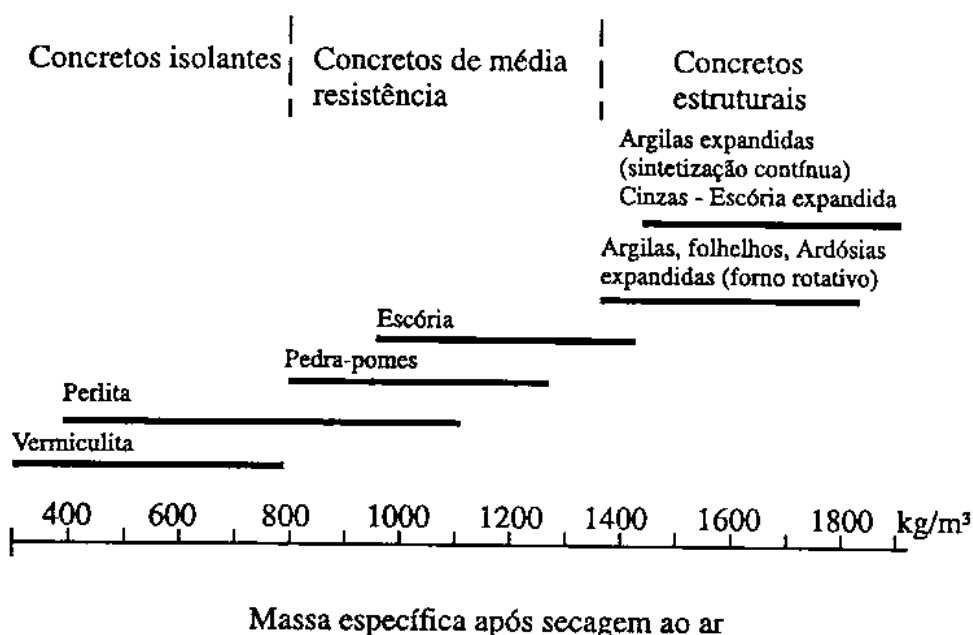


Figura 1: Classificação dos concretos leves.

Fonte: NEVILLE (1997).

As propriedades mecânicas do concreto leve estão diretamente relacionadas com o tipo de agregado incorporado à mistura. Deste modo, agregados leves como a pedra pomes, sendo um material vítreo, vulcânico, com textura de espuma e massa específica entre 500 kg/m³ e 900 kg/m³ são capazes de produzir concretos com massa específica entre 800 kg/m³ e 1800 kg/m³. Os resultados são concretos com capacidade isolante maior, elevada absorção e grande retração.

A Tabela 1 mostra em termos de massa específica, concretos leves obtidos a partir de agregados leves de características distintas, bem como a finalidade para que fora projetado.

Tabela 1: Massa específica dos agregados leves.

Massa unitária do agregado	Agregados leves	Massa específica do concreto (kg/ m³)	Utilizações
160 a 320	Argila Expandida	1640 a 1800	Concreto estrutural (15 a 45 MPa)
400 a 600	Escórias	1400 a 1900	Concreto isolante e de encunhamento (5 a 15 MPa)
200 a 400	E.P.S	300 a 450	Concreto isolante (0,5 a 5,0 MPa)
140 a 170	Vermiculita	200 a 600	Concreto isolante (0,5 a 5,0 MPa)
320 a 500	Pumicita	800 a 1280	Concreto isolante e enchimento (5,0 a 15 MPa)

Fonte: SÁNCHEZ (1999).

TEIXEIRA FILHO (1992, *apud* FREITAS, 2004 p.33) apresenta através da Figura 2 a classificação dos concretos leves que só vêm a confirmar as definições anteriormente expostas.

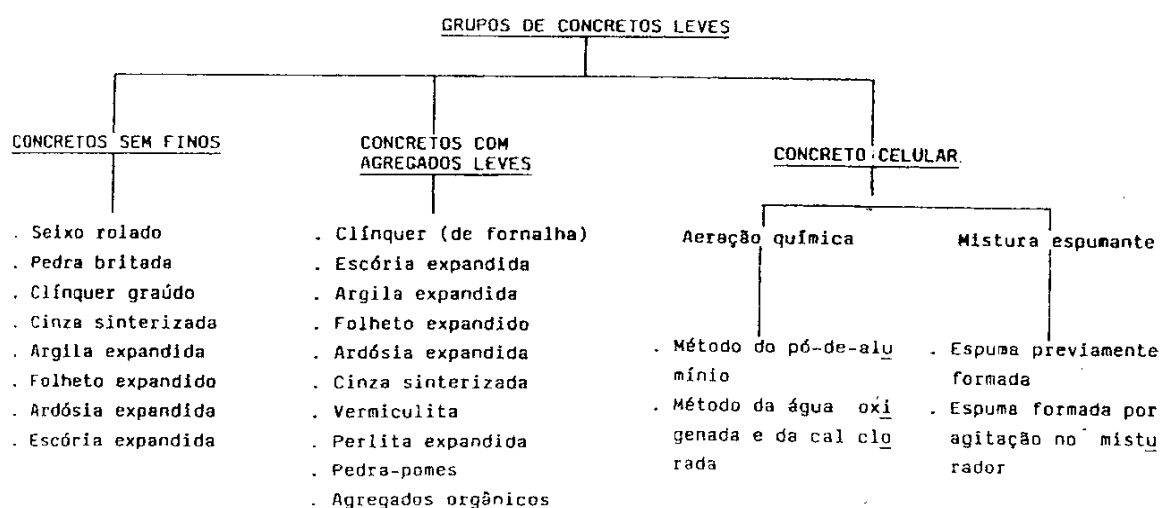


Figura 2: Classificação dos concretos leves por TEIXEIRA FILHO (1992).

Fonte: FREITAS (2004).

2.3 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS LEVES

2.3.1 Resistência à compressão e massa específica

A resistência à compressão e massa específica são dois parâmetros característicos inerentes ao concreto leve. A relação entre a massa específica e a resistência mecânica é variável conforme o tipo de agregado.

A substituição de agregados leves por areia natural aumenta a massa específica do concreto. O CEB destaca que nesta substituição, com cerca de 20% dos agregados em areia natural, o concreto apresenta um aumento de massa específica de aproximadamente 200 kg/m³. Embora a adição de areia natural implique num aumento de peso próprio, ocorre um acréscimo da resistência do concreto independente do agregado leve utilizado na matriz.

Outro aspecto que deve ser mencionado quanto à resistência à compressão do concreto leve é a influência da relação água/cimento sobre essa propriedade. SOBRAL (1987, p.30) destaca que as curvas de correlação resistência à compressão/ relação água/ cimento dos gráficos comumente observados em diversas bibliografias para concretos comuns, não se aplicam aos concretos leves. Cada tipo de agregado leve determina uma correlação diferente entre os referidos parâmetros. A ABNT, através de sua especificação EB-230 procura estabelecer a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e os máximos valores para a massa específica do concreto.

Tabela 2: Relação resistência à compressão/ massa específica.

Resistência à compressão aos 28 dias, mínima (28 MPa)	Massa específica máxima (kg/m ³)
28	1845
21	1760
14	1680

Fonte: SOBRAL (1987).

NEVILLE (1997) menciona que, para um determinado tipo de agregado, existe uma relação entre o teor de cimento do concreto e a resistência à compressão conforme ilustrado na Figura 3.

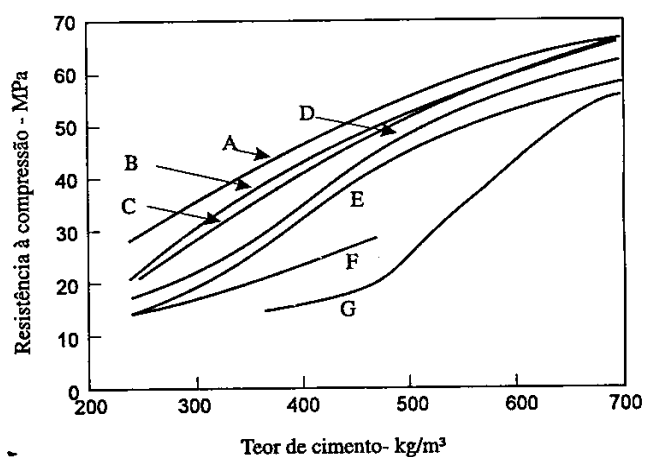


Figura 3: Relação teor de cimento / resistência à compressão.

Fonte: NEVILLE (1997).

Referente à Figura 3, o autor especifica como A) agregado graúdo de cinza volante e sinterizada e agregado miúdo normal; B) agregado graúdo de escória de alto forno pelletizada e agregado miúdo normal; C) agregado de cinza volante sinterizada; D) xisto carbonoso sinterizado; E) ardósia expandida e areia; F) argila expandida e areia; G) escória expandida.

O ACI 213 R (1987, *apud* NEVILLE 1997, p.684) indica alguns valores para a relação entre a resistência de concretos leves e o teor de cimento. Há casos, onde resistências à compressão maiores exigem teores significativos de cimento, conforme mostrado na Tabela 3:

Tabela 3: Relação teor de cimento/ resistência à compressão.

Resistência (MPa)	Teor de cimento (kg/m ³)	
	Com agregado miúdo leve	Com agregado miúdo norma
17	240-300	240-330
21	260-330	250-330
28	310-390	290-390
34	370-450	360-450
41	440-500	420-530

Fonte: NEVILLE (1997).

NEVILLE (1997, p.684) destaca que para uma mesma resistência de concreto, o teor de cimento em concretos leves é maior do que em concretos normais; a altas resistências o aumento de cimento pode chegar a mais de 50 %. Um elevado teor de cimento dos concretos leves significa que ele tem uma relação água/cimento mais baixa, embora desconhecida, de modo que a resistência da matriz é alta.

ZHANG and GJØRV³ (1990, *apud* AITCIN 2000, p.612) em seus estudos sobre concreto leve de alto desempenho relatam que em certos casos torna-se difícil produzir concretos com massa específica com valores menores que 2000 kg/m³ e resistência mecânica de 50 MPa, porém em outros, é viável obter concreto com resistência à compressão de 100 MPa e massa específica de 1865 kg/m³ no estado fresco.

2.3.2 Resistência à tração

A resistência à tração do concreto leve é influenciada por vários fatores tais como, tipo de agregado utilizado na mistura, método de cura empregado, densidade do concreto, sua idade e até mesmo a geometria do corpo de prova ensaiado. Isso reflete não só na resistência à tração do concreto como também em características tais como, resistência ao cisalhamento, comprimento de ancoragem, resistência à fissuração dentre outras.

³ ZHANG, M.H. and GJØRV, O.E. *Development of high strength lightweight concrete*, ACI SP- 121, pp. 667-81.

Diversos métodos têm sido empregados para a determinação da resistência à tração na seção de concreto. LOBO CARNEIRO (1949) foi o pioneiro na determinação desta característica. No Brasil, tem-se a NBR 7222 - Resistência à tração simples de argamassas e concreto por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

O ensaio consiste em aplicar um carregamento ao longo da geratriz de um cilindro de concreto com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura por meio de taliscas de madeira, interpostas entre o cilindro e os pratos da máquina.

A Figura 4 mostra, esquematicamente, o mecanismo da carga atuante na seção transversal do cilindro representando uma tensão de tração horizontal.

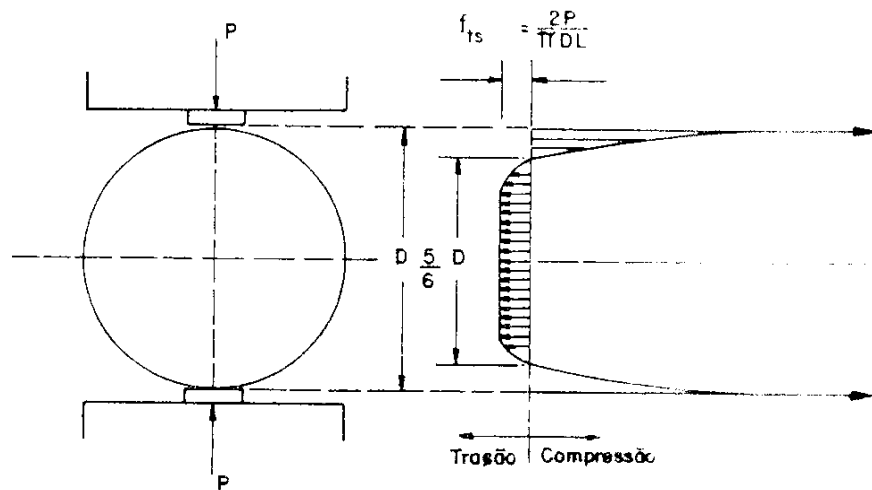


Figura 4: Resistência à tração simples por compressão diametral.

Fonte: SOBRAL (1987).

A tensão de carregamento é dada pela equação (1):

$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

Onde:

f_{ts} – tensão de tração;

P – carga de ruptura;

D – diâmetro do cilindro;

L – comprimento do cilindro.

Outro aspecto que deve ser mencionado é que o conhecimento da resistência à tração do concreto é relevante para uma avaliação do controle de fissuração do mesmo. O concreto é heterogêneo sendo sua tensão de tração variável ao longo de toda a peça.

A configuração das fissuras nos concretos leves é diferenciada ao compará-las ao concreto comum. No concreto leve, elas são mais uniformes e lineares, já que a fratura é produzida pelas tensões de tração tanto nos grãos do agregado como na matriz, sendo que a resistência mecânica dos grãos é menor.

O CEB propõe, segundo a equação (2), para o cálculo da resistência à tração do concreto leve :

$$f_{ct} = 0,23 \sqrt[3]{f_{cu}^2} \quad (2)$$

onde

f_{ct} – tensão de tração em N/mm²;

f_{cu} – tensão de compressão em N/mm²

Também estabelece como alternativa ao cálculo das tensões de tração:

$$f_{ct} = 0,375 \left(0,3 + 0,7 \frac{\rho_{lc}}{\rho_{oc}} \sqrt{f_{cu}} \right) \quad (3)$$

onde

f_{ct} – tensão de tração em N/mm²;

f_{cu} – tensão de compressão em N/mm²;

ρ_{lc} – massa específica do concreto leve;

ρ_{oc} – massa específica do concreto comum.

Com relação à influência da resistência à tração do concreto pelo teor de umidade da peça, SOBRAL (1987, p.31-33) relata que nos concretos leves saturados submetidos aos

ensaios de tração apresentam valores superiores aos valores apresentados pelo mesmo concreto caso estivesse no estado seco. Isto implica em maior uniformidade dos dados em casos de concretos saturados.

2.3.3 Módulo de deformação

RIBEIRO (2000, p.37) considera que os valores dos módulos de deformação utilizados nos cálculos para projetos são normalmente estimados a partir de expressões empíricas, que correlacionam o módulo de deformação com a resistência e a densidade do concreto. De certa forma, essas considerações têm devido fundamento, haja visto que o comportamento dos três componentes do concreto – o agregado, a matriz da pasta de cimento e a zona de transição - é determinado por suas resistências individuais. Como se não bastasse, tem-se ainda que o módulo de deformação do agregado é diretamente relacionado à sua porosidade.

Assim, o módulo de deformação pode ser determinado por intermédio ensaios, devidamente normalizados, como, por exemplo, a NBR 8522 ou expressões, constantes em instituições normalizadoras como o ACI e a ABNT.

A NBR 6118 recomenda para o cálculo do módulo de deformação, a seguinte equação (4):

$$E_c = 5.600\sqrt{f_{cj}} \quad (4)$$

onde

E_c - módulo de deformação expresso em MPa;

f_{cj} - resistência do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias.

Vale a pena ressaltar que na NBR 6118 consta apenas a expressão que possibilita o cálculo do módulo de deformação no caso de concretos comuns, ou seja, com massas específicas entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³. É, portanto, necessário que se recorra às expressões propostas por instituições normalizadoras internacionais para que se proceda ao cálculo deste parâmetro para o caso de concretos leves.

O ACI 318 R admite a expressão (5) para o cálculo do módulo de deformação em concretos com massa específica compreendida entre 1442 kg/m³ e 2483 kg/m³.

$$E_c = 33 \times 10^{-6} \rho^{1,5} \sqrt{f_c} \quad (5)$$

onde

E_c - módulo de elasticidade expresso em GPa;

f_c - resistência determinada em cilindros em MPa;

ρ - massa específica do concreto em kg/m³.

O módulo de elasticidade real pode diferir do calculado de mais de 20% (NEVILLE, 1997, p.688).

2.3.4 Retração

A retração no concreto decorre da variação de volume em função da quantidade de água presente na mistura. Os concretos leves ao se compararem aos concretos comuns têm maior teor de cimento. Assim, ao longo do tempo, a quantidade de cimento eleva as deformações do concreto, embora seja menor o fator água/cimento. Os valores da tensão de tração variam muito em função do tipo de agregado utilizado.

NEVILLE (1997, p.689) frisa que os concretos com agregado leve apresentam uma maior movimentação de umidade que os concretos normais. Eles têm uma retração inicial de 5% a 40% maior que os concretos comuns, variando de acordo com o tipo de agregado leve utilizado. Tendo em vista a baixa resistência à tração dos concretos leves, existe o risco de fissuração por retração.

SOBRAL (1987, p.38) destaca que, os agregados pelo fato de possuírem um módulo de elasticidade reduzido, oferecem menor resistência à contração e à expansão em comparação aos agregados comuns. Em consequência disso, os concretos leves se tornam mais deformáveis. Ainda segundo o autor, na prática, esses concretos de igual resistência à contração e expansão aos comuns, exigem um maior teor de cimento, pois se por um lado aumentam as deformações, dependendo do tempo, por outro conseguem uma diminuir da

relação água/cimento. O conseqüente decréscimo da porosidade da pasta cria uma tendência à redução da retração.

O processo de retração do concreto leve, ao longo do tempo, depende muito da porosidade dos agregados e da sua absorção de água. O deslocamento interno de água no interior do concreto pode retardar a retração, podendo, inclusive determinar uma expansão do concreto, durante um período prolongado quando se trata de peças de seções avantajadas ou quando se dificulta a transferência da água na massa de concreto.

É interessante mencionar que existem estudos que foram realizados objetivando observar o comportamento do concreto leve de alto desempenho, com relação à esta propriedade. Estudos realizados por BERRA e FERRARA⁴, (1990 apud AITCIN 2000, p.613) mostraram uma menor velocidade de retração, em decorrência da presença de água no agregados.

2.3.5 Fluência

NEVILLE (1997, p.448) salienta que as propriedades físicas do agregado também influem sobre esta característica do concreto. O autor menciona ainda, que a porosidade do agregado interfere sobre a fluência do concreto leve, uma vez que os agregados leves possuem um módulo de elasticidade reduzido.

Não há diferença fundamental entre agregados leves e normais quanto à fluência. Ela é maior nos concretos com agregados leves devido apenas ao baixo módulo de elasticidade. A velocidade de fluência de concretos com agregados leves se reduz com o passar do tempo em menor escala que o concreto executado com agregados normais.

O efeito de fluência sobre o comportamento das estruturas de concreto pode ser favorável ou desfavorável. SOBRAL (1987, p.37) destaca que, embora sejam observadas flechas maiores no concreto leve devido à sua fluência. Por outro lado, tem-se a tendência ao equilíbrio das tensões secundárias provenientes dos fenômenos de retração ou então, tensões térmicas no interior da massa de concreto. Essas tensões térmicas decorrem da distribuição desigual da umidade na peça nas primeiras idades.

⁴ BERRA, M. and FERRARA, C. *Normal weight and total lightweight high strength concretes: A comparative experimental study*, ACI SP-121, pp. 701-33.

A fluência no concreto leve se reduz com o aumento da resistência mecânica e cresce com o teor de pasta de cimento endurecida além de depender também do tipo de agregado utilizado, conforme já explicitado.

A Figura 5 ilustra comparativamente, a variação da fluência, do concreto leve e do concreto comum, em função da idade (em dias).

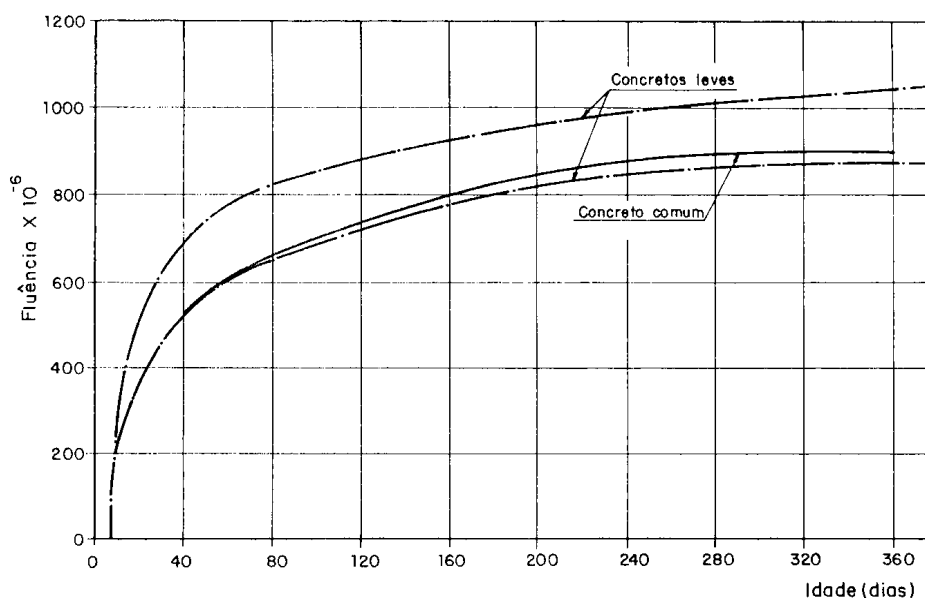


Figura 5: Comparativo da fluência entre concreto leve e comum.

Fonte: SOBRAL (1997).

NEVILLE (1997, p.690) acrescenta que os dados que se referem à fluência do concreto leve são contraditórios, quanto à influência da secagem sobre a fluência. Ele afirma ser provável que a movimentação interna da umidade das partículas de agregado para a pasta de cimento hidratada que as envolve influencie na evolução da fluência por secagem, mas não se dispõe de uma avaliação quantitativa a esse respeito.

2.3.6 Permeabilidade

NEVILLE (1997, p.689) esclarece que sendo descontínuo o sistema de poros dos agregados leves, a porosidade das partículas do agregado não tem influência sobre a permeabilidade do concreto, que é controlada pela permeabilidade da pasta endurecida. Porém, ao substituir o agregado leve por agregado normal, a permeabilidade do concreto é

reduzida. A provável causa, segundo o autor, é que a substituição implica em uma relação água/cimento menor.

A baixa permeabilidade dos concretos leves é o resultados de diversos fatores, tais como relação água/cimento reduzida, melhor qualidade da região na interface matriz/agregado, além da compatibilidade entre os módulos de elasticidade do agregado e da matriz, o que implica em redução dos efeitos da microfissuração sob atuação de cargas ou por efeito de variações térmicas. Sem contar, que o teor de água existente na mistura, permite o prosseguimento da hidratação do cimento com conseqüente redução da permeabilidade.

WEIGLER-KARL (1974, p.156) inclui que apesar de sua grande capacidade de absorção, os concretos leves, não se comportam pior que os concretos comuns no que se refere à sua impermeabilidade. Os autores confirmam a resistência de um concreto leve à penetração de água depende mais da qualidade da argamassa de cimento do que da porosidade e estanqueidade dos agregados. A relação água/cimento nos concretos leves é normalmente menor que no concreto normal de igual resistência. Isto significa que a pasta de cimento contém menos poros capilares e são, portanto, mais impermeáveis.

2.3.7 Porosidade

O concreto de maneira geral é considerado como um material compósito, pois várias fases o constituem: pasta de cimento hidratada, agregados, ar e água livre. Esses dois últimos se encontram na estrutura porosa dos concretos em forma de poros interconectados ou capilares, poros de gel e células ou poros incomunicáveis.

A porosidade total de um concreto é a soma dos vazios formados pelos poros capilares e os poros celulares. A porosidade efetiva representa apenas a quantidade de poros interconectados que permite a passagem de água, ou seja, permite a permeabilidade. Esta permeabilidade pode ser quantificada através de ensaios de absorção sob pressão ou não e por difusão através dos dutos capilares.

A porosidade capilar da paste de cimento depende do fator água/cimento da mistura e do grau de hidratação. A água livre fica retida pelas forças superficiais das partículas de gel por causa da coesão da água combinada aos silicatos hidratados.

Assim, pode-se ter água no concreto endurecido sob a forma livre evaporável e não evaporável. Somente a água evaporável pode ser determinada por perda de secagem em estufa.

TEIXEIRA FILHO (1997, *apud* FREITAS 2004, p.38) cita que somente um fator água/ cimento da ordem de 0,2 é responsável pela hidratação do cimento.

2.3.8 Trabalhabilidade

A literatura técnica dispõe de muitas variações com relação ao conceito de trabalhabilidade. NEVILLE (1997, p.552) admite a trabalhabilidade como “a propriedade do concreto ou argamassa recém-misturados que determina a facilidade e a homogeneidade coma qual podem ser misturados, lançados, adensados e acabados”. Ela depende de vários fatores tais como, tamanho máximo do agregado, sua granulometria, forma textura e principalmente do teor de água da mistura.

O mesmo autor salienta que a trabalhabilidade pode ser melhorada por meio da incorporação de ar ao concreto. Isto se justifica pelo fato de que as bolhas de ar se comportam como agregado miúdo com a vantagem de possuírem baixo atrito superficial além da grande elasticidade. Como resultado, a incorporação de ar na mistura promove a redução da demanda de água necessária, limitando desta forma, a relação água/cimento.

VINCENT⁵ (2003, *apud* FREITAS 2004, p.37) destaca que, no caso do concreto ser constituído por agregados leves, ele se torna menos trabalhável, tendo em vista a tendência à segregação da mistura e ao fato de flutuarem.

2.3.9 Propriedades Térmicas

CUNHA (2001, p.58) considera um bom material isolante aquele cuja condutividade térmica é baixa em relação aos materiais usuais. Em sua maioria, os isolantes térmicos são formados por células de gás ou simplesmente de ar, razão pela qual os isolantes são leves.

⁵ VINCENT, Edward C. *Compressive Creep of a Lightweight High Strenght Concrete Mixture*. Dissertação de Mestrado. Virgínia Poltechnic Institute and State University, january 2003, Blackbirg - VA, USA, 137p.

Assim, a condutibilidade térmica está atrelada à densidade aparente do material bem como seu teor de umidade.

FREITAS (2004, p.42) confirma que a baixa condutividade térmica do concreto celular faz com que ele seja um excelente material a ser utilizado como isolante térmico.

NEVILLE (1997, p.690) salienta que a baixa capacidade do concreto leve de transmitir calor reduz o aumento da temperatura da armadura em caso de incêndio. E ainda, que a massa específica não tem influência significativa sobre a condutibilidade térmica do concreto comum, mas, devido à baixa condutividade do ar, a capacidade do concreto leve de conduzir calor é afetada por sua reduzida massa específica.

2.3.10 Resistência ao fogo

CÀNOVAS⁶ (1984, *apud* FREITAS 2004, p.45) admite que quando o concreto é submetido à ação do fogo, seus elementos constituintes sofrem modificações intensas devido à elevação da temperatura ambiente. Inicialmente a água livre dos poros capilares que o constitui se evapora ao atingir 100°C. A água presente nos poros retarda a deterioração do concreto de modo que, os concretos leves, naturalmente porosos, possuem a vantagem de se comportarem melhor em altas temperaturas.

A resistência do concreto armado em geral à ação do fogo depende de aspectos como sua condutibilidade térmica e resistência a altas temperaturas. Assim, o concreto leve pelo fato de possuir menor condutividade térmica, é menos susceptível a apresentar danos em relação ao concreto comum.

Isso interfere na determinação da espessura do cobrimento, que será menor se comparado ao concreto comum visto que concretos leves são mais resistentes ao fogo. Conseqüentemente, o risco de ocorrer fissuração na zona de ancoragem da peça se reduz em função desse comportamento do concreto leve.

NEVILLE (1997, p.392) salienta que para temperaturas superiores a 430°C, os concretos com agregados silicosos perdem maior parte da resistência em comparação aos

⁶ CÀNOVAS, Manoel Fernádes. Patologia y Terapêutica Del Hormigón Armado. Editorial Dossat S. A. Barcelona, 1984, 619p.

concretos leves, com calcáreos ou agregados leves. Ocorre, porém que ao atingir a temperatura de 800°C esta perda de resistência é a mesma para ambos os concretos.

3 CONSIDERAÇÕES SOBRE ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

3.1 INTRODUÇÃO

A existência do concreto armado e sua eficiência na engenharia civil se deve ao trabalho conjunto dos materiais que o constitui: o concreto e o aço. É justamente a ação solidária existente entre eles, denominada aderência que é a responsável por impedir o escorregamento relativo do aço quando sofre um esforço mecânico inserido no concreto.

Quando o elemento em concreto armado está sujeito à ação externa, a aderência permite a distribuição uniforme das deformações das armaduras e do concreto, que as envolve. As tensões de aderência, originárias das solicitações atuantes na superfície de contato aço-concreto podem ser estimadas a partir de expressões de cálculo propostas por normas oriundas de ensaios ou modelos matemáticos. Conhecer o comportamento da aderência é condição indispensável para que sejam estabelecidas regras de projetos para comprimentos de ancoragem e emendas por traspasse.

Como a aderência permite a distribuição uniforme das deformações das armaduras e do concreto, admite-se que o controle da abertura de fissuras está diretamente relacionado com a ligação existente entre esses dois materiais. Assim, quanto maior a aderência, maior a possibilidade de obter o maior número de fissuras com menor abertura individual, garantindo, deste modo, melhor proteção da armadura.

A aderência pode assumir diferentes comportamentos, podendo estabelecer modos de ruptura distintos. CASTRO (2002, p.16) menciona dois modos de ruptura:

1. ruptura por arrancamento ocasionado pelo corte do concreto entre as nervuras. FUSCO (2005, p.141) cita que nestes casos não ocorre somente o simples deslizamento da barra de aço no concreto, pois os esforços que são mobilizados

pela aderência criam uma região microfissurada no concreto, no entorno das armaduras.

2. ruptura por fendilhamento: decorrente do fendilhamento longitudinal do concreto circunvizinho à barra, devido aos esforços de tração, havendo uma tendência de propagação em direção às bordas. A aderência deixa de existir a partir do instante em que a fissuração atinge a superfície externa do elemento estrutural.

A aderência pode assumir diferentes comportamentos conforme o tipo da barra. Nas barras lisas, por exemplo, a ruptura ocorre pelo arrancamento do concreto e a aderência é atribuída principalmente à adesão química entre a matriz e a barra. Quando ocorre o rompimento da adesão química entre os materiais, surge uma resistência ao deslizamento por causa do atrito. A resistência então se extingue e ocorre um fendilhamento, não generalizado, mas a armadura é arrancada do interior da massa de concreto.

Ao contrário das barras lisas, nas nervuradas o fenômeno da aderência tem natureza distinta. Criada no intuito de promover maior resistência ao deslizamento, a aderência neste tipo de armadura decorre principalmente da ação mecânica entre o concreto e as nervuras. A adesão química entre a armadura e a matriz de concreto que a envolve existe, porém é de pequena monta e o atrito, embora esteja presente, não ocorre até que haja escorregamento entre a barra e o concreto. Nestas barras, o deslocamento é impedido pelos dentes de concreto que se formam entre as nervuras.

A distribuição das solicitações de tração e compressão antes da fissuração, ocorre de maneira uniforme. Contudo, ao iniciar o fendilhamento no concreto, pelo rompimento da aderência mecânica, as deformações, na região próxima às fissuras, passam a se comportar de modo diferenciado. A armadura se alonga mais do que o concreto, e deslizando mais em relação a ele.

A Figura 6 ilustra as trajetórias de compressão e tração que se desenvolvem na região circunvizinha à armadura.

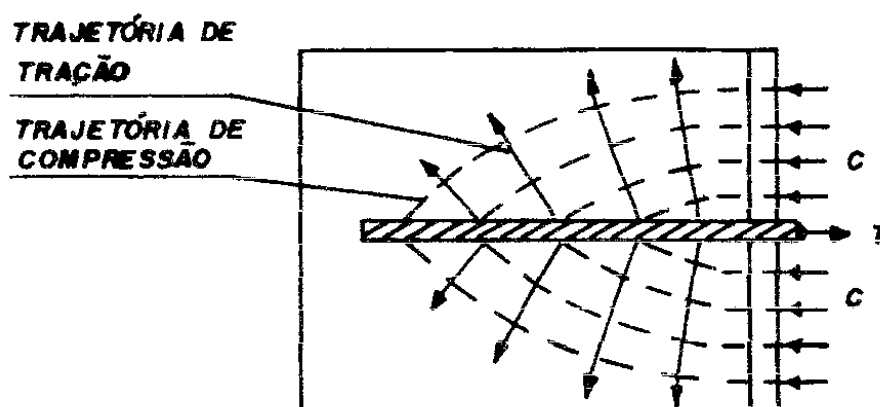


Figura 6: Trajetória de tensões.

Fonte: LEONHARDT (1979).

FRANÇA (2004, p.24-33) em sua pesquisa, elaborou um histórico sobre o estudo da aderência sob a ótica de diversos autores. Ele menciona que o interesse pelo mecanismo de aderência se tornou crescente, principalmente a partir de 1940. A seguir, será abordado um breve histórico, a fim de elucidar a evolução dos estudos sobre o mecanismo da aderência.

WATSTEIN (1941) por meio do ensaio de arrancamento analisou a distribuição das tensões aderência ao longo das barras de aço por meio do ensaio de arrancamento (*pull out test*). Ele observou pela medida de alongamento e tensão na barra inserida no concreto, a ocorrência de uma maior concentração de tensões na região próxima ao apoio do bloco de concreto.

REHM⁷ (1961, *apud* FRANÇA, 2004) estudou sobre a influência do posicionamento das barras nos resultados da aderência no momento da concretagem. Ele destaca que, tratando-se de 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 menores ainda, em comparação às barras horizontais no topo das formas. Isso se justifica pelo fato do acúmulo de argamassa porosa sob as nervuras das barras.

⁷ RHEM, G. The basic principles of the bond between steel and concrete. C & CA Library Translation n. 134 (Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Deutscher Ausschuss Für Stahlbeton, Heft 138, p. 59, 1961). Cement and Concrete association, London, p. 66, Research, 25 (2), p. 304-310, 1995.

O método dos elementos finitos também foi utilizado para a construção de um modelo numérico com objetivo de 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 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 foi reproduzido numericamente o comportamento das vigas de concreto (NGO, 1967).

RIBEIRO (1985) realizou uma análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas. Um dos ensaios empregados pelo pesquisador, o arrancamento, com variações do diâmetro da barra, do cobrimento do concreto e a porcentagem de estribos, após a análise dos resultados, chegou-se às seguintes conclusões:

1. ao se aumentar o cobrimento, a resistência última de aderência também aumenta;
2. 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 CP sem estribos.

DUCATTI e AGOPYAN (1996) analisaram comparativamente o comportamento da aderência do concreto de elevado desempenho. Foram realizados diversos ensaios comparando-se o concreto de elevado desempenho e o concreto convencional.

Foi realizado um estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de sílica. Em seu programa experimental escolheu-se o ensaio de arrancamento, em corpos-de-prova de concreto com diferentes relações água-cimento e diferentes teores de microssílica. As variáveis medidas durante o programa experimental foram os escorregamentos das barras e as tensões de aderência. Nos resultados foi constatado que a adição de sílica melhora em até 20% o comportamento de aderência de barras nervuradas. No caso das barras lisas o efeito da sílica é pequeno; mas para um dado fator a/c, a adição de sílica pode prejudicar a resistência à aderência. (VIEIRA, 1994).

BARBOSA (2001) 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, 10,0, 12,5, 16,0, 20,0 e 25,0 mm), e barras de seção quadrada com três dimensões de lado (6,3, 8,0 e 10,0 mm). Foram empregados neste 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 conformação superficial e o ensaio de arrancamento (*pull out test*), para cada dimensão da barra, e para cada classe de resistência do concreto. A realização dos ensaios permitiu que se chegasse às seguintes conclusões:

1. à medida que aumenta a resistência do concreto, a tensão de aderência aumenta. 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.
2. à medida que aumenta o diâmetro da barra, a tensão de aderência aumenta. Foi verificado que a aderência das barras de seção quadrada possuem um comportamento similar às de seção circular, apesar de possuírem uma tensão de aderência (média e máxima) ligeiramente inferior.
3. o ensaio de arrancamento superestima os valores da tensão de aderência, quando comparado aos resultados obtidos no ensaio de tirantes;
4. 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.

SPACONE⁸ (2000, *apud* FRANÇA 2004, p.29) discutiu a importância da modelagem 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 de aderência e deslizamento na análise dessas estruturas.

FERNANDES (2000) investigou 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 na degradação da ligação aço-concreto. O seu trabalho analisa o comportamento da aderência sob ações monotônicas e repetidas através da investigação experimental, utilizando-se o modelo do ensaio de arrancamento padronizado pela RILEM-FIP-CEB. No programa experimental, foi analisada a influência que alguns parâmetros na

⁸ SPACONE, E., LIMKATANYU, S.. Responses of reinforced concrete members including bond-slip effects. ACI structural Journal, Vol. 97, N° 6, November-December, pp. 831-839, 2000.

interface aço-concreto, tais como diâmetro da armadura nervurada, tipo e amplitude de carregamento. Em seguida, os resultados foram comparados com as recomendações do CEB-FIP MC 1990, EUROCODE 2 e NB-1/78, obtendo-se uma dispersão considerável em relação aos valores experimentais.

LARANJEIRAS (1991) apresentou um estudo sobre o fenômeno da fadiga decorrente de ações repetidas que implicam em modificações progressivas e irreversíveis nos materiais como concreto, aços para o concreto armado e protendido. Estas ações, que podem ser danosas resultam na formação de fissuras em elementos estruturais em concreto armado. Como o autor considera a ruptura por fadiga no concreto como sendo uma fração da resistência estática, o concreto submetido às solicitações de natureza cíclica, apresenta microfissurações que procedem em deformações maiores do que se tivesse submetido a ação de um carregamento estático.

O CEB-FIP MODEL CODE 1990 evidencia através da Figura 7 que a resistência à fadiga do concreto é tanto menor quando maior o número de ciclos.

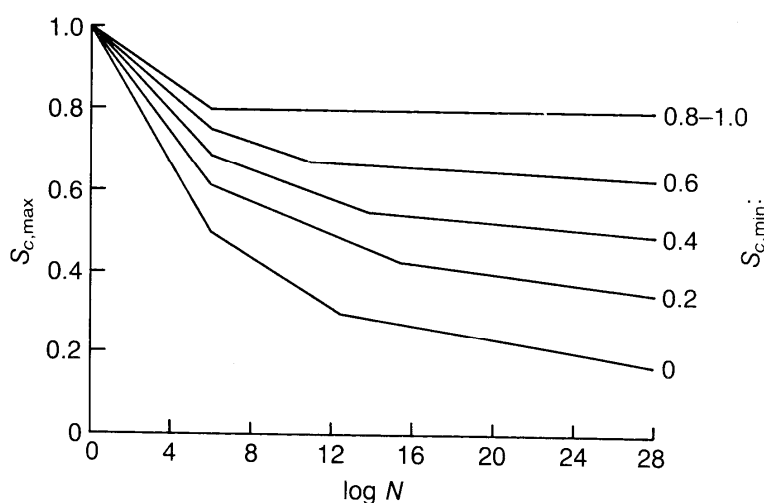


Figura 7: Resistência à fadiga x nº de ciclos.

Fonte: CEB FIP (1990).

A ordenada que representa a resistência à fadiga é a razão entre a tensão máxima e a resistência estática do concreto. As abscissas correspondem ao número de ciclos necessários à ruptura em escala logarítmica. É válido mencionar que quanto menor a diferença entre as tensões máxima e mínima, maior será a resistência à fadiga, para um mesmo número de ciclos.

Diversos fatores influenciam na resistência à fadiga, dentre eles, a dosagem do concreto, as condições de cura além de sua associação com o teor de umidade do concreto, variando inclusive de acordo com o tipo de concreto, como no caso dos concretos de alta resistência.

Ao analisar o comportamento do aço mediante as ações da fadiga, o CEB-FIP 1990 concluiu que as barras nervuradas são mais susceptíveis do que as lisas. Isto se justifica pelo fato de que na região onde deveria estar garantida a aderência com o concreto, isto é, na região das nervuras, ocorre uma concentração de tensões, gerando precipitadamente, a ruptura por fadiga. Outra dedução, é que não há diferenças significativas no comportamento à fadiga entre aços de diferentes categorias, incluem-se assim as barras de aço CA50, CA 60, fios lisos de trefilados. Além disso, a resistência à fadiga diminui com o aumento do diâmetro da barra, fato que pode ser comprovado em experimento realizado pela instituição onde constatou-se que as barras com diâmetro de 40 mm apresentaram uma redução em 25% na resistência à fadiga em comparação às barras com diâmetro nominal de 16 mm, do mesmo fabricante.

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 os padrões da ASTM C 234. Os autores concluíram que a galvanização do aço implica uma redução em torno de 20% na tensão de aderência comparados ao aço sem tratamento. 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.

MOURA (1991) avaliou a influência dos inibidores de corrosão na aderência aço-concreto através de dois ensaios a saber: o ensaio de arrancamento e o ensaio de conformação superficial η . Ao aplicar inibidores de corrosão de bases distintas às barras lisa e nervurada constatou, com base nas médias dos coeficientes de conformação superficial encontrados que:

1. o inibidor à base de cimento modificado com inibidores reduz em 8,6% a aderência em barras nervuradas e 3,3% em barras lisas de 12,5 mm de diâmetro.
2. o inibidor à base de zinco pode reduzir em 32,7% a aderência aço-concreto em barras nervuradas e em 26,8% em barras lisas de 12,5 mm de diâmetro.

Em seu programa experimental o autor observou o comportamento de barras nervuradas e lisas com inibidores de corrosão à base de cimento modificado com inibidores. Utilizou também barras lisas e nervuradas com inibidores de corrosão à base de zinco.

A análise da variância permitiu verificar que o inibidor de corrosão à base de cimento modificado com inibidores, influenciou significativamente os resultados dos ensaios de fissuração das barras nervuradas. Esta mesma análise mostrou que não há influência significativa para o caso de ser utilizado o mesmo inibidor em barras lisas.

Para o segundo caso, com utilização de inibidores à base de zinco, foi constatado pela análise de variância que houve influência significativa nos resultados dos ensaios de fissuração, tanto das barras nervuradas, quanto das lisas.

3.2 TIPOS DE ADERÊNCIA

A aderência pode ser classificada em três parcelas, conforme o comportamento diferenciado que intervêm na ligação dos dois materiais. É importante mencionar que essa divisão da aderência em parcelas, é de cunho ilustrativo, haja visto a impossibilidade de serem determinados, separadamente, os valores de aderência.

Deste modo, somente ensaios específicos de arrancamento é que poderão estabelecer valores médios de aderência, suficientes para efeito de projeto.

3.2.1 Aderência por adesão

Esta parcela de aderência é possível ser verificada na tentativa de separação de dois materiais. Esquemáticamente, é a resistência à oferecida por um bloco de concreto aderido à uma chapa de aço ao tentar separá-los. Esta resistência por adesão ocorre devido às ligações físico químicas estabelecidas na interface dos materiais, impedindo sua separação. A Figura 8 ilustra, esquematicamente, esse mecanismo de aderência.

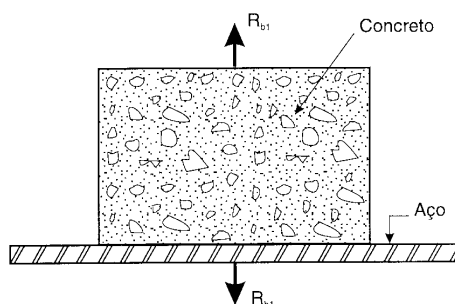


Figura 8: Aderência por adesão.

Fonte: FUSCO (2005).

3.2.2 Aderência por atrito

A aderência por atrito pode ser determinada ao submeter uma barra de aço, imersa no concreto, ao ensaio de arrancamento, devido à força de atrito existente entre os dois materiais. Esta, por sua vez, depende do coeficiente de atrito dos materiais, segundo sua conformação superficial das barras de aço. Tem-se então que a pressão superficial do concreto sobre a barra é determinada pela retração no interior da massa de concreto, conforme mostrado na Figura 9.

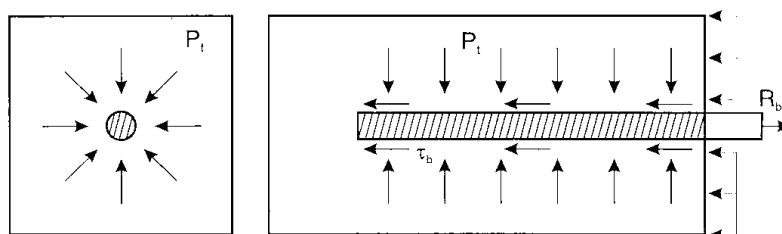


Figura 9: Aderência por atrito

Fonte: FUSCO (2005)

3.2.3 Aderência mecânica

A aderência mecânica se dá pela presença de rugosidades na superfície das armaduras, exercendo função de apoio, conforme mostrado na Figura 10 mobilizando as tensões de compressão no interior do concreto. Por isso, as barras destinadas à armação possuem saliências ao longo de todo o seu comprimento.

A mensuração da aderência por atrito é obtida pela execução de ensaios tipo arrancamento em barras inseridas no concreto, onde são obtidos na realidade valores médios

da aderência. Ocorre que as forças de atrito aparecem em virtude da retração do concreto e da conformação superficial das barras nervuradas.

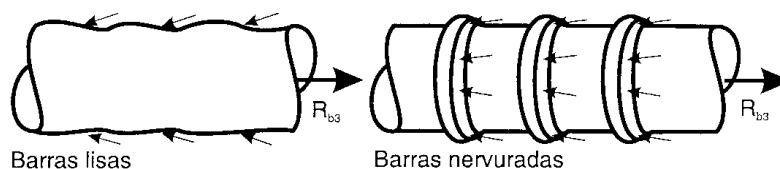


Figura 10: Aderência mecânica.

Fonte: FUSCO (2005).

Outro aspecto que vale ser mencionado, é que o trabalho solidário entre os dois materiais é variável ao longo de toda a interface aço concreto. Sendo que, em cada ponto ela é influenciada por fenômenos tais como retração, fluência e fissuração do concreto.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA ADERÊNCIA

As estruturas, de modo geral, se utilizam sistemas de ancoragem para garantir a aderência. Um sistema de ancoragem eficiente é atribuído a diversos fatores que influenciam no mecanismo da aderência entre o concreto e o aço. O tipo e estado superficial das barras, a sua distribuição nas formas, a resistência do concreto, o adensamento próximo à região de localização das barras, a qualidade da matriz, as características gerais do agregado incorporado na mistura, como por exemplo, a sua resistência mecânica, o tipo e a granulometria, interferem significativamente no desempenho do conjunto.

A função da ancoragem, também conhecido como comprimento de aderência, é basicamente, a transferir dos esforços entre o aço e concreto. O comprimento ideal para que os esforços sejam transmitidos sem danos à estrutura, depende de diversos fatores que serão mencionados a seguir.

Para FUSCO (2005, p.145) existe uma intensa microfissuração no concreto na região que envolve a armadura, culminando numa perda de aderência, quando da existência de tensões transversais de tração. Estes esforços provocam efeitos de fendilhamento do concreto ao longo de toda região da armadura envolvida pelo concreto. Sem contar o fato de que a barra na região de ancoragem está sujeita à microfissuração, na sua extremidade também existe uma concentração de tensões que podem acarretar numa ruptura localizada. Sendo

assim, no intuito de combater ou pelo menos reduzir os efeitos desses esforços, é que são colocadas as armaduras transversais ao longo da peça de concreto.

A Figura 11 ilustra o modo de distribuição das microfissurações ao longo da barra de aço nervurada, inserida no concreto.

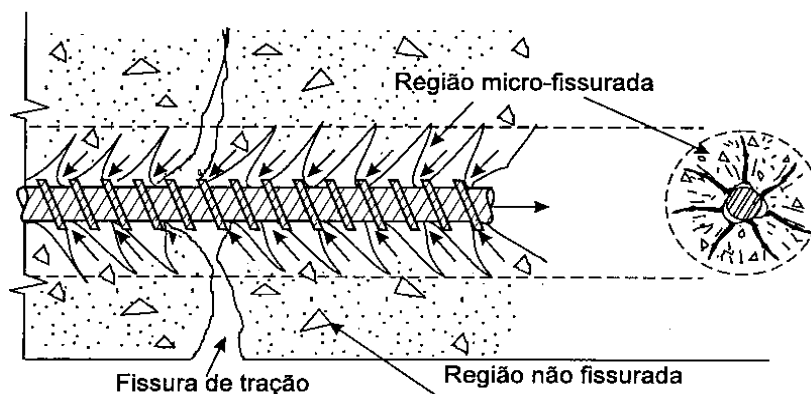


Figura 11: Distribuição das microfissurações

Fonte: FUSCO (2005).

3.3.1 Estado superficial da armadura

A maior ou menor aderência está diretamente relacionada ao estado superficial das barras, que impedirá o deslocamento relativo entre o aço e o concreto. A pouca aderência das barras lisas, em comparação às nervuradas, ocorre em virtude da deficiência de rugosidades que garantam o atrito, conforme já explicitado. Com relação às barras nervuradas, tem-se que a aderência é garantida pelas saliências inerentes a este tipo de armadura.

3.3.2 Diâmetro das barras

Para LEONHARDT (1982 *apud* ALVES, 1997 p.71) o diâmetro das barras pouco influi na aderência entre o aço e o concreto. Entretanto, os esforços de aderência desenvolvidos por uma força crítica reduzem quanto maior o diâmetro da barra para uma mesma relação comprimento de aderência - diâmetro de barra.

O CEB/FIP (1977, p.80) salienta que estudos comparativos dos ensaios de arrancamento realizados em concretos leve e comum, para uma mesma resistência à compressão apresentaram como resultado, menor resistência de aderência para o concreto leve, com a ressalva de que a tensão de aderência no concreto leve se iguala ao concreto

comum nos casos onde o agregado empregado for a argila expandida. E acrescenta que a justificativa da menor aderência está no fato de existir cavidades ao longo de toda a porção inferior das barras longitudinais.

O ACI committee 408⁹ referido por FRANÇA (2004, p.39) considera que a tensão de aderência independe do diâmetro da barra, sendo esta uma variável de menor importância, desde que o cobrimento e o comprimento de ancoragem sejam proporcionais ao diâmetro da barra.

A pesquisa realizada por DUCATTI (1993), constatou que a resistência de aderência reduz com o aumento do diâmetro da barra. A justificativa está ligada à espessura da zona de transição, que é mais grossa nas barras de grande diâmetro. Isto porque o diâmetro da armadura se torna maior na região das nervuras, culminando num maior acúmulo de água e promovendo conseqüentemente, aumento desta zona de transição. Ocorre então um enfraquecimento da ligação entre a pasta e a armadura, tornando-a mais porosa e susceptível ao esmagamento por compressão nas nervuras.

BARBOSA (2001) prosseguiu seus estudos sobre o mecanismo de aderência ao se tratar da variação do diâmetro das barras. Por meio da realização de ensaios de conformação superficial e de arrancamento, foi realizado um tratamento estatístico básico para interpretação dos resultados.

Constatou-se que o diâmetro da barra e a resistência do concreto interferem nos resultados da aderência. Mais especificamente, à medida que a resistência do concreto aumenta a tensão de aderência também aumenta. Além disso, essa resistência de aderência aumenta com incorporação de sílica, visto que há uma redução da porosidade da zona de transição entre o concreto e a armadura. Ela comenta também que quanto maior o diâmetro da barra ocorre um aumento na tensão de aderência.

Vale comentar que, os resultados encontrados por ela no tocante à relação entre a resistência de aderência e o diâmetro, contrariam os estudos realizados por DUCATTI (1993)

⁹ 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/ Dec 1991

e SOROUUSHIAN e CHOI¹⁰ (1989) apud FRANÇA (2004, p.39). Eles baseiam seus estudos na espessura da zona de transição, mais grossa nas barras de maior diâmetro, a qual aliada à maiores dimensões das nervuras, retém mais a água de amassamento sob a barra provocando uma exsudação interna e enfraquecendo a ligação da matriz de argamassa e armadura. A contradição, segundo a autora, está no fato de que esse comportamento do concreto descrito pelos pesquisadores está ligado ao adensamento e não à espessura da zona de transição.

3.3.3 Resistência do concreto

Este fator está relacionado com a aderência aço-concreto. SILVA¹¹ (1987, *apud* MOURA, 1991, p.50), em estudos realizados, verificou que as tensões de aderência crescem com a resistência à compressão do concreto. Assim, em ensaios realizados, constatou-se que concretos de resistência característica igual a 15 MPa, apresentaram como valores das tensões médias de aderência e tensão de aderência na ruptura, valores correspondentes respectivamente a 16,1% e 19,1% inferiores em relação ao concreto de F_{ck} com 30 MPa.

3.3.4 Composição da matriz

Considerando-se a qualidade do concreto, tem-se que as adições do cimento, a característica dos agregados, a trabalhabilidade do concreto, a relação água/cimento estão dentre os fatores que interferem na eficiência da aderência.

O melhor comportamento da aderência ocorre à medida que se diminui a relação água cimento e a quantidade de agregado miúdo; portanto, quando se aumenta a quantidade de agregado graúdo. RIBEIRO (1985, *apud* FRANÇA 2004, p.36).

BRETTMANN, DARWIN e DONAHEY¹² (1986) ainda citados pelo mesmo autor estudaram o efeito da presença de aditivos superplastificantes na resistência de aderência aço-concreto e chegaram à conclusão de que independente da presença de aditivos, os concretos

¹⁰ SOROUUSHIAN, 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, p.227-32. May/June 1991.

¹¹ SILVA, Daígon Maciel da. Ee CREUS, Guilherme J. Análise experimental sobre aderência e a ancoragem de barras de aço para o concreto armado. Anais do Colóquio 87, Porto Alegre – RS. 1987.

¹² 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, pp 98-107, Jan/Feb. 1986.

com grande abatimento apresentaram uma resistência de aderência menor se comparados aqueles com menor abatimento, para uma mesma resistência à compressão.

LEONHARDT (1979) menciona que a qualidade do cimento interfere consideravelmente na aderência. Ele cita que concretos constituídos por cimentos com adição de escória ou pozolânicos remetem uma perda de 25% a 75% nos valores da aderência, se comparados aos concretos com cimento portland comum.

ALMEIDA *et al* (1999)¹³ *apud* BARBOSA (2001, p.8) concluíram que o emprego de superplastificantes reduz a quantidade de água necessária para o concreto promovendo uma melhoria na aderência aço-concreto.

3.3.5 Adensamento

Nas regiões onde é grande a concentração de armadura, como é mais difícil a execução da concretagem, a aderência tende a ser deficiente. O surgimento de vazios torna a região mais fraca quando houver solicitação.

RIBEIRO¹⁴ (1985, *apud* BARBOSA 2001, p.35) menciona que a forma como o concreto é adensado não influencia na aderência. Em contrapartida, o CEB 151 (1982) afirma que tanto o adensamento quanto a resistência interferem na aderência do aço ao concreto.

3.3.6 Resistência do agregado

As características dos agregados são importantes, pois influenciam no comportamento do concreto.

Agregados leves são menos resistentes à concentração de tensões do que os agregados normais. Os grãos se dividem mais facilmente na região entre as nervuras das barras de aço. Então, a aderência da barra inserida no concreto é menor nestes pontos, embora a resistência da matriz seja a mesma de um concreto comum.

¹³ ALMEIDA, I.R., 1999, Evaluation of bond between reinforcing steel and high strength concrete according to international standards. International Congress Creating with Concrete, (Sept.). p. 133-41, Thomas Telford, London.

¹⁴ RIBEIRO, J. L. D. Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência em barras nervuradas. Porto Alegre, 1985, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1985.

Em torno das barras, a resistência do agregado tem uma certa influência na aderência, que dependerá principalmente da resistência da matriz.

MOURA (1991, p.51) enfatiza que como a aderência por atrito que os agregados envolvem é maior do que a produzida com a pasta, as tensões de aderência são reduzidas com a diminuição na proporção de agregados no concreto.

3.3.7 Disposição das armaduras

O posicionamento das barras de aço durante a concretagem intervêm na aderência. As armaduras concretadas na posição vertical possuem melhores resultados para o ensaio de arrancamento do que àquelas armadas horizontalmente. Este fato decorre da porosidade da matriz acumulada sob as barras, prejudicando a aderência, que pode ser observado através da Figura 12 (BARBOSA (2001, p.32).

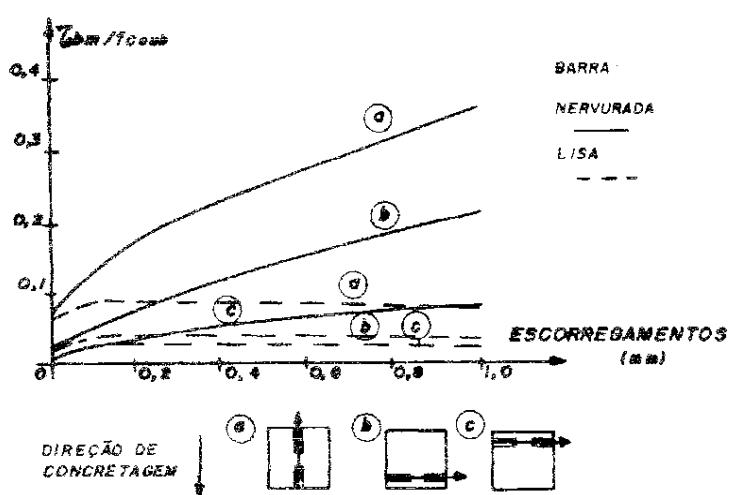


Figura 12: Influência da direção de concretagem.

Fonte: LEONHARDT (1979).

A interpretação que pode ser feita é a de que as barras localizadas no fundo da forma apresentam melhor comportamento do que as situadas no topo, pois elas são concretadas na região onde o adensamento é mais eficiente dificultando a presença de porosidade da argamassa sob a armadura.

Tem-se também que a direção de concretagem e o fator água/cimento interferem no comportamento do conjunto. A Figura 13 permite compreender que a posição das barras horizontais no molde influencia na qualidade da aderência.

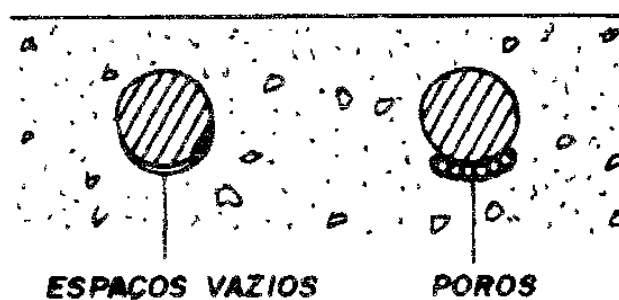


Figura 13: Influência da posição das barras.

Fonte: LEONHARDT (1979).

ALVES (1997, p.71) acrescenta que a resistência de aderência é influenciada pelo posicionamento relativo das barras durante a concretagem. Neste estágio, é que se torna possível compreender o funcionamento das zonas de aderência.

3.4 ZONAS DE ADERÊNCIA

A qualidade do adensamento na matriz de concreto é um fator importante para a classificação das zonas de aderência. Assim, tem-se as regiões de má aderência e outras de boa aderência. FUSCO (1995, p.139)

Naturalmente, as características geométricas da peça e a qualidade do concreto na região de ancoragem além daquelas já mencionadas anteriormente, estão entre os fatores que influenciam a aderência.

A NBR 6118 especifica como condições gerais para ancoragem de armaduras, que todas as barras devam ser ancoradas de forma que os esforços a que estejam submetidas sejam integralmente transmitidos ao concreto, seja por meio de aderência ou de dispositivos mecânicos ou combinação de ambos. Em seu item 9.3.1, é considerado em boa situação quanto à aderência os trechos das barras que estejam em uma das posições:

1. armaduras inclinadas a mais de 45° em relação à horizontal;
2. armaduras horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, desde que:
 - para elementos estruturais $c/h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;

- para elementos estruturais com $h \geq 60$ cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

Os trechos das barras em outras posições e quando do uso de formas deslizantes devem ser considerados em má situação quanto à aderência.

São também considerados nesta norma, os valores de cálculo da tensão de aderência entre a armadura e o concreto, para o caso de armaduras passivas (NBR 6118, 2003 p.26):

$$\tau_{\text{NBR6118}} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{\text{ctd}} \quad (06)$$

$$f_{\text{ctd}} = \frac{f_{\text{ctk,inf}}}{\gamma_c} \quad (07)$$

sendo

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

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

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

$$f_{\text{ctm}} = 0,3 f_{\text{ck}}^{\frac{2}{3}} \quad (08)$$

$$f_{\text{ctk,inf}} = 0,7 f_{\text{ctm}} \quad (09)$$

onde

$f_{bd} (\tau_{NBR6118})$ – resistência de aderência de cálculo da armadura passiva;

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto expresso em MPa;

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

ϕ – diâmetro da barra em milímetros;

η_1, η_2 e η_3 – coeficientes para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva.

Na avaliação sobre o comportamento da aderência aço concreto, CARVALHO (2002, p.61) realizou um levantamento bibliográfico onde destaca informações relevantes extraídas da norma ACI 318 R.

O ACI 318 R recomenda para o cálculo do comprimento de ancoragem a equação geral:

$$\frac{\lambda_b}{\phi} = \frac{3}{40} \frac{f_{yd}}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{\alpha \beta \gamma \chi}{\frac{c + K_{tr}}{\phi}} \right) \quad (10)$$

onde

$$K_{tr} = \frac{A_{tr} f_{yt}}{1500 \times s \times n} \quad (11)$$

com o limite

$$\frac{c + K_{tr}}{\phi} \leq 2,5 \quad (12)$$

sendo:

λ_b – o comprimento de ancoragem, em polegadas;

ϕ – o diâmetro das barras da armadura longitudinal, em polegadas;

f_{yd} – tensão de escoamento do aço, em psi;

f_{yt} – tensão de escoamento do aço à tração da armadura transversal, em psi;

α – constante que representa a posição da armadura longitudinal na peça;

β – constante em função das barras a serem ou não revestidas com epóxi;

γ – constante em função do diâmetro das barras da armadura longitudinal;

χ – constante que relata a massa específica do agregado;

$\sqrt{f_c}$ – raiz quadrada da resistência à compressão, em psi;

c – fator que representa o menor cobrimento da barra ou fio, cobrimento lateral ou cobrimento sobre a barra ou fio (em ambos os casos medidos entre os eixos da barra ou fio), ou metade do espaçamento dos eixos das barras e fios, em polegadas;

K_{tr} – fator que representa a contribuição da armadura de confinamento (estribos) que cruzam o plano de fendilhamento ;

A_{tr} – área total da armadura transversal na região que cruza a emenda por traspasse, em polegadas² ;

s – espaçamento médio entre estribos da armadura transversal, em polegadas;

n – número de barras ou fios emendados na seção do comprimento de emenda;

1 psi – 0,007 MPa;

1 in – 25,4 mm.

A expressão que limita o termo $\frac{c + K_{tr}}{\phi}$ em 2,5, garante a proteção das peças de concreto contra a ruptura por arrancamento.

Baseado na tensão média de aderência atingível o conceito de comprimento de transferência para a ancoragem da armadura foi abordado na ACI 318 em 1971. Essa norma foi importante à medida que elementos como ancoragem em estruturas se tornaram de extrema relevância, devido à tendência de fendilhamento do concreto na seção confinada.

Em 1989 essa norma teve alterações quanto aos procedimentos de cálculo para o comprimento de ancoragem de barras e fios submetidos à tração. CARVALHO (2002, p.64) relata que embora as alterações da norma fossem baseadas em ampla pesquisa com profissionais experientes na área, foi constatado que provisões eram excessivamente detalhadas e complexas em sua aplicação. Sem contar que para determinadas situações o comprimento de ancoragem atingia valores superestimados.

Revisões desta norma prosseguiram até a sua revisão em 1999, que se destacou por permitir ao projetista considerar o efeito de todas as variáveis que intervêm no dimensionamento do comprimento de ancoragem. A equação referenciada no ACI atingiu seu formato final ao ser estabelecida a Tabela 4 que possibilita dimensionar o comprimento de ancoragem de acordo com as considerações de projeto.

Tabela 4: Comprimento de ancoragem - ACI 318 R (1999).

Características geométricas	$\phi \leq 20mm$	$\phi \geq 22mm$
Espaçamento livre entre as barras sendo ancorada ou emendada não inferior à ϕ ; cobrimento livre não inferior à ϕ e estribos ao longo do λ_b não inferiores aos valores mínimos desta norma; ou espaçamento lidas barras sendo ancoradas, ou emendadas não inferior à 2ϕ e cobrimento livre não inferior à ϕ .	$\frac{\lambda_b}{\phi} = \frac{f_{yd}}{25} \frac{\alpha\beta\chi}{\sqrt{f_c}}$	$\frac{\lambda_b}{\phi} = \frac{f_{yd}}{20} \frac{\alpha\beta\chi}{\sqrt{f_c}}$
Outras situações	$\frac{\lambda_b}{\phi} = \frac{3f_{yd}}{50} \frac{\alpha\beta\chi}{\sqrt{f_c}}$	$\frac{\lambda_b}{\phi} = \frac{3f_{yd}}{40} \frac{\alpha\beta\chi}{\sqrt{f_c}}$

Fonte: CARVALHO (2002).

O ACI¹⁵ (1999, *apud* CARVALHO 2002, p.67) recomenda que o comprimento de ancoragem obtido através da Tabela 4 e pela equação geral, devem ser multiplicados por fatores que dependem do patamar de escoamento do aço. Assim, para aços com patamar de escoamento (A), tem-se o fator $\lambda_t = 1,0\lambda_b$, e para aços sem patamar de escoamento $\lambda_t = 1,3\lambda_b$.

¹⁵ ACI COMMITTEE 318, Building Code requirements for structural concrete. ACI 318-99 and commentary (318 R-99). American Concrete Institute. Farmington Hills, Mich. p.391. 1999.

4 ADERÊNCIA MATRIZ-AGREGADO

O mecanismo da aderência matriz-agregado está intimamente relacionado às características mecânicas do concreto e do agregado que o constitui. É imperativo, portanto a qualificação do tipo de agregado a ser incorporado na mistura, tendo em vista a compreensão da natureza do processo de fissuração do concreto.

O fato da interface matriz-agregado ser mais susceptível ao aparecimento de microfissuras aponta para a importância do comportamento deste processo. A microestrutura da pasta na interface é distinta em relação à região mais afastada, sendo justificado pela fase de mistura do concreto onde as partículas de cimento se mostram incapazes de se dispor densamente na superfície do agregado, culminando numa deficiência de grãos de cimento a se hidratarem na interface e conseqüentemente, numa maior porosidade. Entretanto, resistência da zona da interface pode apresentar um aumento com o passar do tempo, em decorrência de uma reação secundária do Ca(OH)_2 com pozolanas (NEVILLE, 1997, p.307).

A aderência entre a pasta de cimento e os agregados comuns dependem de três mecanismos, são eles: o travamento mecânico dos produtos hidratados do cimento com a superfície áspera do agregado, que possui microfissuras; o crescimento de cristais, como produtos de hidratação na superfície do agregado e por fim a aderência por reação química entre a pasta de cimento e os constituintes dos grãos do agregado. (AGOPYAN, 1986, p.116).

As características do agregado influem consideravelmente tanto no desempenho da zona de transição, como também no comportamento do concreto em geral. Assim, aspectos tais como forma do agregado, constituição química, resistência mecânica, composição granulométrica, rugosidade, porosidade e densidade dos materiais merecem considerável atenção no estudo da aderência, pois se distinguem conforme o tipo de concreto ao qual forem incorporados.

Neste capítulo, serão apresentadas as características gerais dos agregados utilizados em concretos convencionais que intervêm em suas propriedades. Em seguida, foram apresentados os resíduos a serem utilizados no programa experimental desta pesquisa, são eles: raspas de pneu e o resíduo plástico oriundo da indústria farmacêutica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Eles desempenham um papel fundamental nas argamassas e concretos, do ponto vista técnico e econômico. Ocupando cerca de 70% do volume total de concreto, os agregados exercem um efeito benéfico sobre alguns parâmetros característicos tais como, a retração e o aumento da resistência ao desgaste sem que haja prejuízo na resistência aos esforços mecânicos. ALMEIDA (1994, p.36) menciona que as características dos agregados que mais influenciam na resistência à compressão dos concretos são sua própria resistência à compressão, o módulo de elasticidade, o diâmetro máximo, módulo de finura, forma e textura superficial.

A literatura técnica consultada permitiu esclarecer as diversas classificações dos agregados conforme suas características. Dentre elas, conforme a origem, os agregados se constituem em naturais e artificiais. Os primeiros recebem esse nome por serem encontrados diretamente na natureza, sem a necessidade de aperfeiçoamento, como por exemplo, as areias, pedregulhos e seixos rolados. Por outro lado, a segunda classificação se estende aos agregados onde há necessidade de algum processo de aprimoramento afim de que ele possa ser utilizado, destacando-se agregados como, por exemplo, a brita, o pó de pedra e agregados leves tal como, o isopor.

PETRUCCI (1995, p.38) enfatiza outra divisão para os agregados baseado em sua massa específica aparente, subdividindo-os em agregados leves, normais e pesados. Entre os primeiros, tem-se a pedra-pomes, a vermiculita e a argila expandida; com relação aos agregados normais, destacam-se os mais comumente utilizados na construção civil, como, por exemplo, a areia, a brita o pó de pedra dentre outros. Na escala dos agregados pesados, o autor distingue a barita, a magnetita e a limonita.

A NBR 7211 fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Desta forma, define o agregado miúdo como grãos de origem natural ou resultantes do

britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm. Com relação aos agregados graúdos, podem ser definidos como brita ou pedregulho proveniente de rochas estáveis ou mistura de ambos, cujos grãos passam por um peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

É importante ressaltar a importância da classificação do concreto segundo suas principais propriedades físicas, químicas ou mecânicas. O conhecimento do tipo de esforço a que o concreto é solicitado, meio de exposição, dimensões geométricas das peças a serem moldadas ou até mesmo dos agregados que o constitui, possibilita discernir prescrições e características mínimas exigíveis dos agregados a serem utilizados.

Sendo assim, na caracterização do agregado, a distribuição granulométrica é importante, tendo em vista que, ela contribui para a redução do índice de vazios, permitindo maior economia de cimento e ganho de resistência do concreto.

Deve ser enfatizado que a forma do agregado exerce um papel significativo no desempenho do concreto tanto no estado fresco como no endurecido, uma vez que, o teor de cimento e a quantidade de água da mistura variam conforme o tipo de agregado utilizado. É portanto, ponto pacífico considerar que as dimensões dos agregados influenciam de modo incisivo no fator A/C dos concretos. Materiais, que dispõem de maior granulometria e apresentam menor superfície específica, requerendo, conseqüentemente, menor quantidade de água de molhagem, possibilitando, dada trabalhabilidade com fator A/C reduzido. A bibliografia consultada, defende que o aumento da resistência à compressão em função da redução da quantidade de água incorporada na mistura, é superado pelo efeito prejudicial devido a menor área de contato dos agregados (ALMEIDA 1994, p.37). O referido autor destaca ainda que, o diâmetro máximo do agregado mais indicado para um concreto, sob a ótica de resistência à compressão, está associado à quantidade de cimento na mistura.

Concretos pobres é em geral vantajoso o emprego de agregados maiores, com $D_{máx}$ na ordem de 150 mm. Nos concretos estruturais correntes, parece não haver vantagem na utilização de agregados com $D_{máx}$ superior a 25,0 mm ou 40,0 mm (ALMEIDA 1994, p.37).

Em termos de forma e textura superficial, é consenso geral que a forma angular acrescido de uma superfície áspera, como a maioria das superfícies britadas, remetem, na maioria das vezes, no acréscimo da aderência, ao contrário do que é obtido em agregados de

conformação superficial lisa e arredondada como seixos rolados, por exemplo. Entretanto, o autor destaca que “a angulosidade acentuada deve ser evitada, pois provoca a elevação da quantidade de água necessária à obtenção de uma dada trabalhabilidade, a forma ideal dos agregados graúdos parece então ser a cúbica”. (ibid, p.38)

É importante mencionar que partículas de agregado com aspecto arredondado são interessantes aos concretos leves, sendo essa conformação prejudicial para os casos do concreto convencional, conforme explicitado no parágrafo anterior (WEIGLER e KARL, 1974, p.18).

Em contrapartida, CAMPOS JÚNIOR (1993, p.51) menciona que agregados leves pelo fato de apresentarem menor resistência à concentração de tensões, em relação aos agregados convencionais, facilmente cisalham entre as nervuras de barras corrugadas. Ele acrescenta que, de acordo com os ensaios realizados na “building research station” foi constatado que a tensão de aderência em barras circulares inseridas em concreto leve é, normalmente menor em comparação ao concreto comum. Faz-se exceção nos casos onde o agregado utilizado for argila expandida, pois a tensão de aderência desenvolvida pode atingir os mesmos valores do concreto comum.

Outro aspecto a ser mencionado é o fato de que nos agregados leves, devido à sua estrutura porosa, há uma tendência à maior capacidade absorção de água em relação aos agregados tradicionais. Em decorrência desta peculiaridade, há estudos que têm por finalidade investigar a influência do tempo de pré-saturação dos agregados nas características do concreto. LO *et al* (2003), pesquisaram sobre a interferência do tempo de pré saturação nas características do concreto leve no estado fresco.

Utilizando agregados de argila expandida, os resultados apontaram para uma influência significativa da pré-saturação do agregado no ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump) do concreto no estado fresco.

Além disso, no tocante à resistência à compressão do concreto com incorporação de agregados pré-saturados, a pesquisa dos autores indicou valores significativos. O agregado não saturado absorve água de hidratação do cimento nas primeiras idades, promovendo o aparecimento de microporos na zona de interface entre as partículas de agregado e a pasta, facilitando o surgimento de microfissurações. Os agregados submetidos ao processo de pré-saturação no intervalo de 1 hora implicaram numa redução da resistência à compressão do

concreto ao contrário do ocorrido com os agregados submetidos à 30 minutos de pré saturação.

HOLM e VAYSBURD (1992, p.295-317), consideram que a água de amassamento do concreto migra para a superfície do agregado. Em consequência disso, essa água e uma quantidade insuficiente de pasta de cimento para envolver o agregado formam vazios nas suas vizinhanças que não conseguem ser efetivamente preenchidos durante a fase de hidratação, estabelecendo, deste modo, uma região mais porosa em relação à matriz. Assim, os autores enfatizam que a interface matriz-agregado normal é mais susceptível à microfissuração culminando na redução da aderência neste ponto, quando o concreto é submetido a esforços mecânicos. Foi elaborado por eles uma descrição sistemática da formação da zona de contato agregado-matriz em concretos leves e normais.

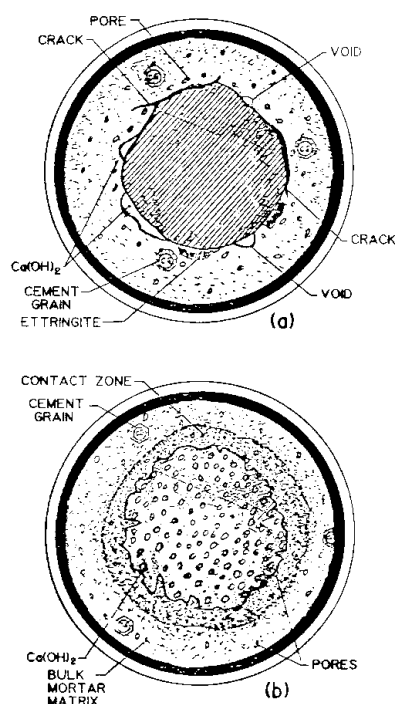


Figura 14: Zona de contato agregado-matriz em concreto normal (a) e leve (b).

Fonte: HOLM e VAYSBURD (1992).

Na Tabela 5 VALVERDE (2001, p.3) relaciona algumas das principais propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado.

Tabela 5: Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado.

Propriedades do concreto	Características relevantes do agregado
Resistência mecânica	Resistência mecânica
	Textura superficial
	Limpeza
	Forma dos grãos
	Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade
	Forma dos grãos
	Textura superficial
	Limpeza
	Dimensão máxima
Massa Unitária	Massa específica
	Forma dos grãos
	Granulometria
	Dimensão máxima
Economia	Forma dos grãos
	Granulometria
	Dimensão máxima
	Disponibilidade

Fonte: VALVERDE (2001).

4.1.1 Utilização de resíduos como agregados

Considerando que o respeito ao meio ambiente vem ocupando posição de destaque e se consolidando como responsabilidade de toda atividade humana, ações no intuito de reduzir os impactos ambientais tem sido objeto de diversas pesquisas. A redução de áreas disponíveis para disposição de resíduos gerados pelos mais diversos setores, aliado ao crescimento populacional e a modificação das atividades humanas vem contribuindo significativamente para o aumento da quantidade de resíduos gerados.

Nos últimos anos, a preocupação com o reaproveitamento de resíduos, vem crescendo significativamente. Neste contexto, a inclusão de novas tecnologias e meios de reaproveitamento no ambiente da construção civil, demonstra grande importância. Diversas iniciativas no intuito de viabilizar a utilização de materiais tais como, sílica ativa, cinza volante, cinza de casca de arroz, bagaço de cana, resinas de polietileno tereftalato (PET), além de resíduos de raspas de pneu e indústria farmacêutica têm merecido atenção das comunidades de pesquisa. SILVA (1994, p.17), menciona conforme os estudos da Rilem-Rèunion International des Laboratoires d'Essais et Matériaux, existe a seguinte proposta de critério geral de avaliação do resíduo para uso na construção civil, a saber:

- 1 A quantidade disponível em um local deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento do sistema de manuseio, processamento e transporte.
1. As distâncias de transporte envolvidas devem ser competitivas com os materiais convencionais.
2. O material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação na estrutura.

Usados esses critérios e determinada a viabilidade técnica de utilização é possível determinar a que grupo pertence o resíduo, permitindo uma avaliação global.

Classe 1: Materiais com potencial de aplicação máxima. Possuem as melhores propriedades tanto na sua ocorrência natural, na sua forma processada ou combinada, ou quando já registrado um desempenho satisfatório;

Classe 2: Materiais que requerem um processamento mais extensivo e/ou quando as suas propriedades não são tão adequadas quanto às da classe 1;

Classe 3: Materiais que se mostram menos promissores do que os das classes 1 e 2, recomendados somente para casos isolados.

CINCOTTO¹⁶ (1983, *apud* SILVA, 1995) ainda menciona para esta classificação, que os resíduos de raspas pneu e plástico de origem farmacêutica, utilizados no programa experimental desta dissertação, encontram-se respectivamente nas classes 2 e 3.

4.1.2 Resíduos de raspa de pneu

A borracha natural é um produto sólido obtido pela coagulação de látices de determinados vegetais. Essa matéria prima vegetal é proveniente de uma árvore popularmente conhecida como seringueira, nativa da Amazônia. Após o processo de extração, coagulação e secagem, a borracha natural é aquecida e posteriormente processada em outras substâncias químicas, sendo transformada em borracha.

Os primeiros estudos científicos acerca da borracha se deram em 1735 por Charles de la Condamine. Posteriormente, várias tentativas frustradas sucederam no intuito de melhorar as qualidades da borracha, até Goodyear descobrir acidentalmente, em 1840, a vulcanização deste material. Essa técnica de vulcanização consiste em aquecer a borracha misturada com enxofre, o que a torna mais resistente às variações de temperatura.

A importância que ganhou a indústria da borracha desde seu surgimento e o papel decisivo que assumiu no desenvolver da civilização moderna despertou o interesse pela descoberta da sua composição química e, posteriormente, sua síntese.

Na escala evolutiva de processos diferenciados para obtenção da borracha, a Alemanha foi precursora na sua fabricação a partir do petróleo, dando origem á denominada “borracha sintética”.

O período correspondente à Iª Guerra Mundial caracterizou-se como o marco inicial para o desenvolvimento das borrachas sintéticas. O produto obtido era facilmente vulcanizável e acabou se transformando em um dos principais da indústria da borracha mundial, embora suas propriedades não correspondessem à todas da borracha natural.

Entretanto, o crescimento populacional aliado à corrida pela industrialização, tornou necessário o equilíbrio das atividades produtivas. Neste atual contexto, face à produção

¹⁶ CINCOTTO, Maria Alba. *Utilização de Subprodutos e Resíduos na Indústria da Construção Civil*. A Construção. São Paulo. N. 1855, p. 27 – 30, ago, 1983.

exacerbada, os resíduos industriais passaram a merecer atenção especial dos órgãos gestores da política ambiental.

O reaproveitamento da fibra de borracha oriunda da indústria de condicionamento de pneus é responsável pela recauchutagem de pneus, ou seja, devolver a um pneu já desgastado e em desuso as características de um novo. As fibras, que resultam deste processo, dão origem às raspas de pneu.

O processo de sintetização das raspas de pneu através da recauchutagem de pneus, sucintamente é dado da seguinte forma:

Primeiramente, avalia-se o estado geral do produto, quanto a possibilidade de recauchutagem. Ao ser aprovado em exame preliminar, o pneu é conduzido ao torno de raspa. Na impossibilidade de recauchutagem direta, ele é levado para uma oficina de reparos, onde receberá um ou mais manchões pré-fabricados. Em seguida, é levado para o torno, onde o pneu será raspado e retirada toda a borracha velha, na banda de rodagem, dando origem às raspas de pneu. Estas, por sua vez, podem ser aproveitadas na fabricação de tapetes de automóveis, punhos de bicicletas dentre outras aplicações.

Terminada a fase de raspagem, o pneu recebe uma “cola de cimento” composta, em sua maioria por uma alta porcentagem de borracha natural. Após uma hora de descanso do pneu, aplica-se uma camada de borracha crua.

O pneu é levado, em seguida, à uma máquina vulcanizadora que fará as ranhuras da banda de rodagem. Aquece-se, o pneu na máquina à temperatura média de 150°C e à uma pressão interna de 150 lb.

Em descanso por 24 horas após o processo de vulcanização, o pneu estará habilitado para ser montado no veículo.

Na construção civil, com a finalidade de substituir alguns dos agregados naturais tradicionalmente utilizados devido à escassez dos recursos naturais, cada vez crescente, pesquisadores têm focado seus estudos para a utilização da borracha como agregado na confecção do concreto, dando-lhe uma destinação racional.

No Brasil, cerca de 100 milhões de pneus velhos se encontram espalhados em aterros, terrenos baldios, rios e lagos. Sua principal matéria prima, a borracha vulcanizada, mais

resistente em comparação à borracha natural, não se degrada facilmente causando danos ao meio ambiente, ao considerar o despejo de substâncias carboníferas, sulfurosas e outros poluentes produzidos por ela, quando queimados à céu aberto. Vale considerar que, os pneus sem destinação racional não representam só um problema ambiental como também de saúde pública em decorrência do acúmulo de água das chuvas propiciando a disseminação de doenças tais como, dengue e febre amarela. SANTOS *et al* (2004, p.1).

Os estudos realizados na esfera das propriedades do concreto influenciadas pela adição de resíduos de borracha, apontam como resultado uma redução das suas características físicas e mecânicas. Isto porque, o desempenho do concreto com incorporação de resíduos depende da forma, da quantidade e do tamanho das partículas de borracha a serem adicionadas ou substituídas. Assim, um dos parâmetros que mais se destacam para o índice de qualidade do concreto é a resistência à compressão.

Os referidos autores em seus estudos sobre aplicação da borracha em concreto, constataram que a substituição em até 45% do volume do agregado oriundo de raspas de pneu com as mesmas dimensões do agregado substituído induz a perdas na resistência à compressão, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados das características do concreto com raspa de pneu.

Substituição por raspas de pneu	Perda da resistência à compressão (%)
Do agregado miúdo tradicional	50%
Do agregado graúdo tradicional	60% (CP cilíndrico) 80% (CP cúbico)

Fonte: SANTOS *et al* (2004).

HUYNH e RAGHANVAN (1998) verificaram em sua pesquisa sobre adição de resíduos de borracha ao concreto, por meio da análise de seus aspectos preponderantes, dentre eles a durabilidade, que após quatro meses de imersão em ambiente alcalino, as tiras de borracha apresentaram pouca elasticidade, mantendo a deformação recebida.

De maneira geral, a composição heterogênea do pneu abre possibilidades para suas formas de reciclagem que dentre as quais destacam-se: a queima direta, como combustível na fabricação do cimento; a recauchutagem conforme explicitado em parágrafos anteriores e como agregado, na composição asfáltica e de materiais à base de cimento.

Em pesquisa realizada sobre dosagem de concreto contendo fibras de borracha vulcanizada, NIRSCHIL *et al* (2002) avaliaram as propriedades mecânicas das misturas de concreto incluindo fibras de faixas granulométricas distintas com substituição parcial aos agregados.

Dentre as duas frações de fibra de borracha vulcanizada, a primeira se caracterizava por ser passante na peneira nº 8 (malha de abertura 2,38 mm) e a outra correspondente às fibras retidas na peneira nº 20 (abertura 0,8 mm). Foram efetuados sete traços sendo um de concreto para referência, denominado traço C e os concretos com fibras convencionados na pesquisa dos autores como TRAÇOS F1A, F1B, F2A, F2B, F3A, F3B. Aos 7, 28 e 56 dias foram realizados os ensaios de caracterização dos corpos de prova – resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e ensaio de absorção de água. Os resultados numéricos obtidos, podem ser acompanhados segundo as Tabelas 7 e 8:

Tabela 7: Composição dos traços.

Traço	Tipo de fibra	% de fibras em volume	Relação água/cimento	Relação borracha/cimento	Consumo de cimento (kg/m³)	Superplastificante (% cimento)
C	-		0,66	-	295,57	-
F1A	grossa	20,30	0,52	0,32	348,51	-
F1B	grossa	25,28	0,52	0,42	344,30	-
F2A	grossa	20,18	0,52	0,32	347,47	0,30
F2B	grossa	25,33	0,45	0,45	329,22	0,50
F3A	Fina	20,18	0,52	0,32	347,47	-
F3B	fina	24,96	0,57	0,42	337,17	-

Fonte: NIRSCHIL *et al* (2002).

Tabela 8: Resultados dos ensaios.

Traço	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à tração (MPa)			Módulo de elasticidade (Gpa)		
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
C	34,72	44,23	44,71	4,57	5,41	6,18	44,35	46,25	47,39
F1A	18,84	20,58	21,86	2,80	3,00	3,30	29,38	31,25	30,62
F1B	14,05	14,73	16,04	2,44	2,67	2,83	22,89	28,93	22,75
F2A	14,64	18,12	12,01	2,79	2,80	2,92	24,65	27,08	28,78
F2B	14,64	14,85	14,68	2,46	2,53	2,39	27,53	22,17	30,13
F3A	14,64	16,04	18,12	2,20	2,51	2,81	21,21	25,59	25,48
F3B	10,91	12,48	12,73	1,79	2,33	2,39	17,94	19,05	17,57

Fonte: NIRSCHIL *et al* (2002).

Mediante os resultados apresentados os autores concluíram que os valores de resistência mecânica do traço de concreto ordinário foram superiores em comparação aos traços incorporados com fibras de borracha. Dentre os traços cuja composição se incluem os resíduos, o F1A se destacou por obter as maiores resistências. Isto se justifica pela menor quantidade de raspa de pneu na traço, que implicou num maior consumo de cimento. É importante ressaltar que os traços constituídos de fibras mais grossas (F1A, F1B, F2A, F2B) apresentaram resultados mais satisfatórios.

BLACKWELL e PIERCE (2002, p.199-200) destacam que para a elaboração dos traços de concreto com resíduos, devem ser levados em consideração o teor de absorção dos agregados. Os autores mencionam que a raspa de pneu pode ser entendida como agregado leve devido à sua baixa massa específica. Também destacam que outro fator a ser relevado seria a propensão à segregação de determinados agregados leves ao serem incorporados aos materiais de base cementícia.

A raspa de pneu, ilustrada na Figura 15 utilizada no programa experimental desta dissertação, não sofreu ensaio de caracterização, quanto à sua granulometria.



Figura 15: Aspecto dos resíduos de raspa de pneu.

4.1.3 Resíduo plástico da indústria farmacêutica

A NBR 10004 se refere aos resíduos sólidos aqueles que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar etc. Esta mesma norma também os classifica conforme a periculosidade em três classes: classe I (perigosos), classe II (não inertes) e classe III (inertes).

OLIVEIRA (2002) utilizou em seu programa experimental resíduos plásticos provenientes da indústria farmacêutica em matrizes cimentícias e asfáltica. Segundo a autora “o resíduo plástico é constituído por vários tipos de plásticos, com diferentes características físicas e químicas”. Ela ainda menciona, que é oriundo do processo industrial de embalagens e produtos da indústria farmacêutica do Estado do Rio de Janeiro, B. Braun, caracterizando um resíduo sólido, inerte, classe III. A autora acrescenta que a utilização deste resíduo para reciclagem é dificultada em razão pontos de fusão distintos dos termoplásticos que o constitui. É válido mencionar que este resíduo também foi objeto de estudo nos programas experimentais desta dissertação.

Com relação às características físicas e mecânicas dos plásticos, pode-se ressaltar o baixo módulo de elasticidade. Além disso, eles são classificados, segundo sua resistência a altas temperaturas como termoplásticos, que quando aquecidos têm sua plasticidade aumentada pelo escorregamento entre as moléculas, podendo ser moldados e os termofixos ou termorígidos, que não possuem plasticidade ideal a ponto de serem moldados, devido à estrutura tridimensional das moléculas, apresentando maior resistência sob altas temperaturas.

Nesta classificação, é notório que o reaproveitamento dos termoplásticos é superior aos termofixos o que representa uma opção vantajosa do ponto de vista econômico pelas indústrias (FREITAS, 2004, p.67). O mesmo autor menciona ainda que, o aproveitamento de resíduos plásticos como agregados no concreto não estão sujeitos à separação entre os diferentes tipos de plásticos. Isto porque, ambos os tipos não prejudicam o processo de hidratação do cimento, pelo fato de serem inertes.

Os ensaios de caracterização deste agregado, foram executados pelo referido autor seguindo as prescrições normativas da ASTM para agregados utilizados na produção do concreto, tendo em vista que os resíduos plásticos nos dois programas experimentais possuem a mesma origem. Por meio da curva granulométrica encontrada nesta etapa, foi constatado que o resíduo pode ser classificado como agregado miúdo de granulometria descontínua do tipo grossa conforme a NBR 7214. As Figuras 16 e 17 que se seguem visam mostrar a curva granulométrica do agregado bem como seu aspecto granular.

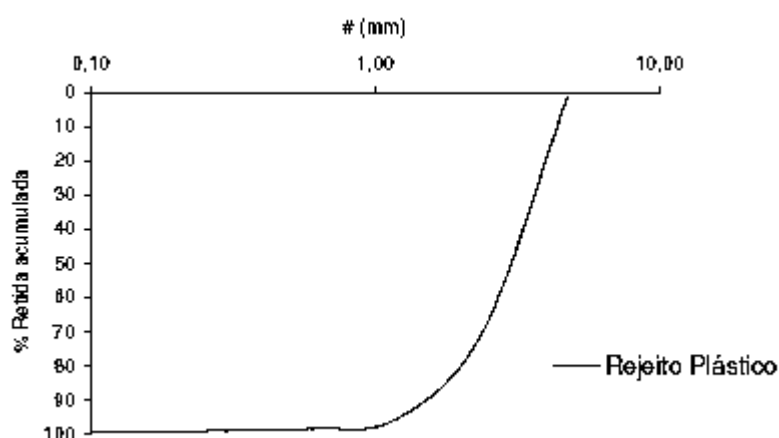


Figura 16: Curva granulométrica do resíduo plástico.

Fonte: FREITAS (2004).



Figura 17: Aspecto dos grãos do resíduo plástico.

A Tabela 9 a seguir apresenta, esquematicamente as principais características do resíduo plástico proveniente da indústria farmacêutica.

Tabela 9: Caracterização do resíduo plástico.

Características	Resíduo plástico
Massa específica aparente (kg/ m ³)	355
Diâmetro máximo (mm)	6,30
Módulo de finura	5,63
Massa específica real (kg/ m ³)	1020

Fonte: FREITAS (2004).

4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE ADERÊNCIA MATRIZ – AGREGADO

Embora a constatação de que a presença de camadas sobre a superfície do agregado prejudiquem a aderência, existem estudos que ainda apontam para o efeito de redução, devido à presença dessas camadas, da resistência do concreto e sua durabilidade. De fato, os autores GULLERUD e CRAMER (2002, p.4) mencionam que a literatura sobre aderência entre agregado e a matriz é cercada de controvérsias. Alguns estudiosos apontam que o enfraquecimento da aderência na interface permite o surgimento de microfissurações que se propagam sob baixas tensões, ao passo que outros defendem que o nível de tensão da região microfissurada não afeta a resistência última do concreto.

Tendo em vista que o enfraquecimento da zona de contato matriz-agregado afeta significativamente a durabilidade do concreto, LO e CUI (2003) estudaram o comportamento

da zona de contato entre dois tipos de concreto a saber: concretos leves e concretos normais. Foi mencionado em sua pesquisa a existência de um efeito denominado “efeito parede” que ocorre apenas nos concretos comuns. A superfície porosa do agregado leve adicionada à sua elevada capacidade de absorção o faz comportar de modo distinto na interface com a pasta de cimento em relação aos agregados convencionais. A elevada porosidade da zona de contato é atribuída à formação de cristais na superfície do agregado leve, impossibilitando a formação desse “efeito parede”.

O referidos autores utilizando o recurso de um microscópio eletrônico equipado com sistema de dispersão de raio X, demonstraram que o “efeito parede” é inexistente na superfície dos poros do agregado leve. Convém destacar que no programa experimental, foram utilizados agregados de argila expandida como referência onde, foi constatado que o concreto leve apresenta uma resistência inicial maior que o concreto comum, sendo este fato justificado pelo desempenho elevado da aderência na interface do agregado leve e a pasta de cimento. A Figura 18, mostra com precisão de 75 vezes a microestrutura de uma seção do concreto leve, onde o autor destaca a presença de uma fina camada entre o agregado e a matriz, com cerca de $10\mu\text{m}$, a qual representa a zona de infiltração da pasta de cimento no agregado. Cumpre salientar nesta etapa que esta camada, em relação ao concreto comum, é bem menor, comprovando então, a inexistência do “efeito parede” mencionado pelo autor.

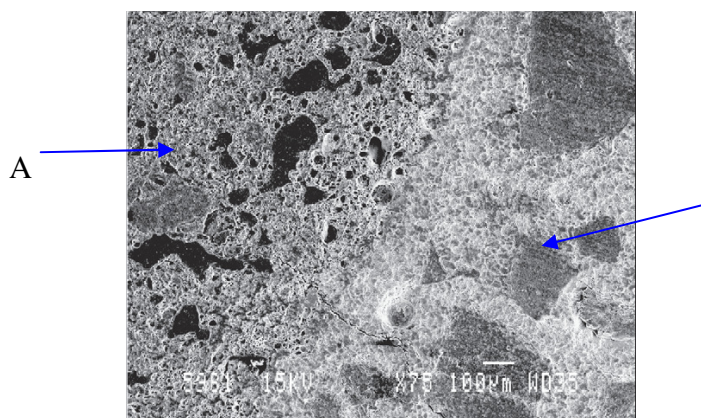


Figura 18: Microestrutura da interface matriz-agregado leve.

Fonte: LO e CUI (2003).

A Figura 19 mostra, com maior precisão (2000 vezes) a presença de uma rede de etringita na interface matriz-agregado leve com espessura entre 0,3 e 1 μm . A referida espessura, conforme SCRIVENER e GARTNER¹⁷ (1998) *apud* LO e CUI (2003, p.918), é suficiente para anular a capilaridade do agregado e enfraquecer a zona de contato do compósito.

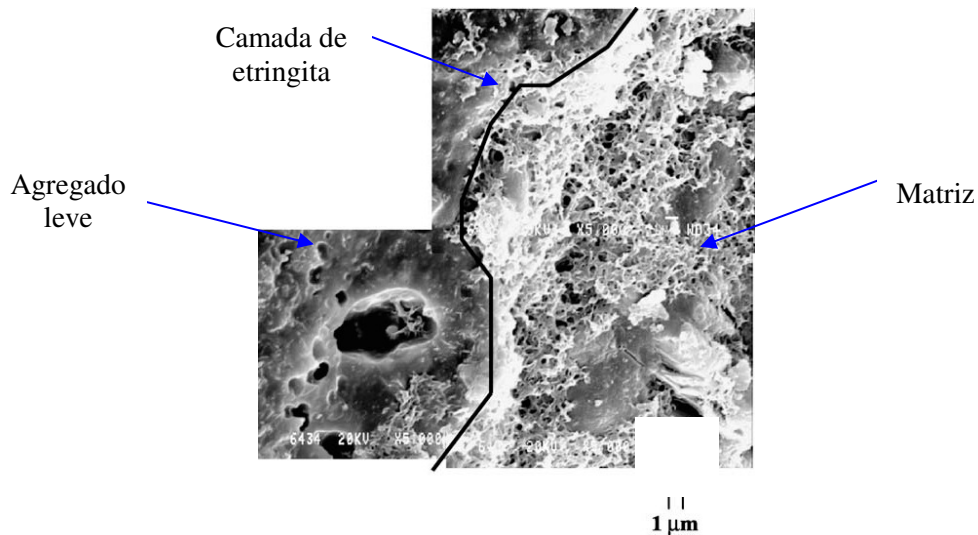


Figura 19: Visão ampliada da camada de etringita na interface.

Fonte: LO e CUI *et al* (2003).

¹⁷ SCRIVENER, K. L.; GARTNER, E. M.. Microstructural gradients in cement paste around aggregate particles. Bonding in Cementitious Composites, Proc. Mat. Res. Soc. Sym., v. 114, 1998, pp. 77-85, Boston.

5 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA

O deslocamento relativo entre o aço e o concreto, bem como as tensões de aderência podem ser estimados por meio de ensaios de arrancamento que consistem, basicamente, na extração de barras de aço embutidas em corpos-de-prova de concreto.

Tais ensaios permitem verificar a influência de fatores, como, por exemplo, resistência à compressão do concreto, diâmetro da barra, qualidade da matriz, adições minerais, idade de carregamento dentre outros, no mecanismo da aderência.

Neste capítulo serão enfatizados os principais ensaios de avaliação de aderência que possibilitam o conhecimento do comportamento da aderência na interface aço- concreto.

Dentre os ensaios de avaliação de aderência mais conhecidos, serão tem-se o ensaio de arrancamento (*pull out test*), ensaio de viga (*beam test*), ensaio de extremo de viga (*beam end test*), ensaio de conformação superficial, e o ensaio de arrancamento com anel circunferencial (*ring pull out test*), além do ensaio das quatro barras que serão explicitados nos itens subseqüentes.

5.1 ENSAIO DE ARRANCAMENTO COM ANEL CIRCUNFERENCIAL (*RING PULL OUT TEST*)

Este ensaio consiste em extrair uma barra de aço de um corpo-de-prova cilíndrico envolvido por um anel metálico, apoiados sobre placas de uma máquina de ensaio.

O referido anel é dotado de *strain gages* (extensômetro elétrico de resistência) que tornam possível medir, além das deformações ocorridas no anel, a tração exercida em um dos extremos da barra e os escorregamentos.

A vantagem do ensaio é que ele permite medir diretamente a componente das forças de aderência que causam o fendilhamento.

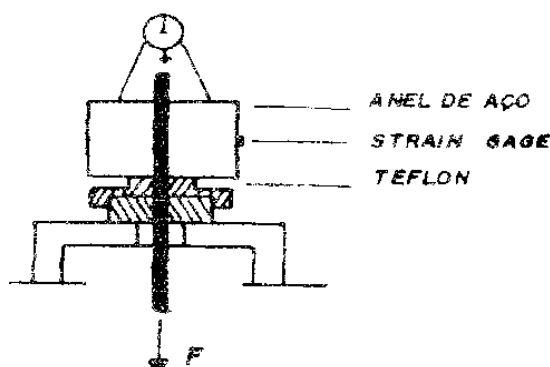


Figura 20: Ensaio de arrancamento com anel circunferencial.

Fonte: BARBOSA (2001).

5.2 ENSAIO DE VIGA (*BEAM TEST*)

Basicamente, o beam test avalia a tensão de aderência entre o aço e o concreto na flexão. São dois corpos-de-prova paralelepípedicos de concreto armado, ligados em sua parte superior por uma rótula metálica, conforme a Figura 21. Submete-se a viga à flexão simples, por meio de duas cargas concentradas e dispostas simetricamente em relação ao meio da viga. Ao aplicar as forças, ocorre o deslocamento das armaduras na seção de concreto tracionada que medido por defletômetros posicionados nos extremos das barras.

Este ensaio tem por instituições normalizadoras o RILEM e o CEB/FIP RC 5, como ilustra a Figura 21.

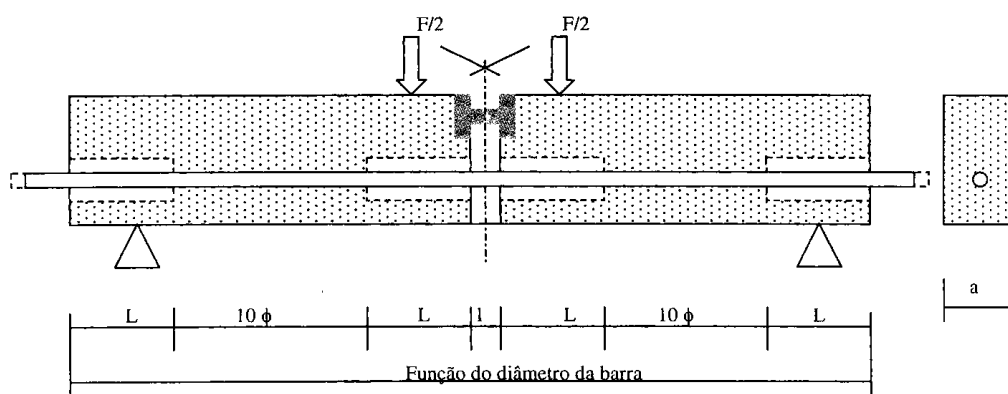


Figura 21: Esquema de ensaio de aderência na flexão.

Fonte: ALVES (1998).

ALVES (1998, p.77) menciona que este ensaio, pela semelhança apresentada com os elementos estruturais, permite a aplicação dos resultados obtidos no ensaio à determinação dos comprimentos de ancoragem.

5.3 ENSAIO DE ARRANCAMENTO (*PULL OUT TEST*)

Conhecido como o mais tradicional dos ensaios de arrancamento e referenciado por diversos pesquisadores, este ensaio se traduz em extrair uma barra de aço posicionada num corpo-de-prova prismático em concreto. Determina-se então a força de tração necessária para promover o arrancamento.

O corpo-de-prova é colocado sobre placas de apoio numa máquina de ensaio. A armadura embutida no concreto deve apresentar as duas extremidades expostas, determinando-se deste modo, a força de tração aplicada em um dos extremos, necessária para promover o escorregamento.

Esse método de ensaio é referenciado em várias instituições. Assim o ASTM C 234 e o CEB RC6 estão dentre as instituições que normalizam este ensaio. A importância da normalização tem propósito na avaliação da interferência de itens como, por exemplo, a dimensão do corpo-de-prova, comprimento de aderência e direção de concretagem nos resultados de ensaio.

5.3.1 Modelo proposto pelo CEB/ FIP

O modelo proposto pelo CEB RC6 consiste numa barra de aço inserida que será posteriormente extraída do corpo-de-prova em concreto através de uma força de tração, sendo medido o deslocamento da barra em relação ao concreto na extremidade descarregada.

As dimensões do prisma utilizado para o ensaio é representado esquematicamente conforme a Figura 22.

$$\tau_{\text{CEB}} = \frac{P}{\pi\phi L_a} \quad (14)$$

onde

τ_{CEB} – tensão de aderência em MPa;

P – carga aplicada em kN;

ϕ – diâmetro da barra. em mm;

L_a – é o comprimento de ancoragem (5ϕ).

É importante salientar que a barra a ser ensaiada deve estar posicionada no centro do corpo-de-prova e com o comprimento de ancoragem efetivo de 5ϕ após comprimento inicial sem aderência. Isto é necessário para manter o trecho ancoragem afastado da face de concreto em contato com a placa de reação, tendo em vista que ela poderá gerar restrições à deformação transversal do corpo-de-prova.

Em barras de diâmetro inferiores a 20mm, as dimensões do corpo-de-prova devem ser iguais a 10ϕ , pois os resultados obtidos em análise experimental mostraram-se mais representativos (CEB 186 1988¹⁸ *apud* BARBOSA, 2001 p.70).

O destaque deste ensaio além da simplicidade de execução do corpo-de-prova e do baixo custo é a possibilidade de serem isoladas variáveis, já mencionadas em capítulo anterior que influenciam no comportamento da aderência (BARBOSA, 2001, p.70).

Por outro lado, tem-se que as tensões de aderência tendem a ser superestimadas já que as placas de apoio envolvidas no ensaio exercem reação de compressão no concreto, criando restrições às deformações do corpo-de-prova. FRANÇA (2004, p.43) menciona como principal desvantagem do ensaio o fato de os resultados serem apenas de cunho comparativo e

¹⁸ COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1988, Bond of reinforcing bars with small diameters determined by the pull out test, Bulletin d'information n. 186, pp.59-96

qualitativo. O modo de solicitação do corpo-de-prova, não reproduz com exatidão as condições reais a que se encontram submetidas as armaduras da peça estrutural.

A relevância deste método se mostra em pesquisas para observar o comportamento de barras de distintos perfis, avaliação da aderência de barras em concretos de diferentes tipos e resistências, além de determinar o efeito da direção de concretagem bem como influencia do posicionamento das armaduras dentre outros fatores já explicitados.

5.3.2 Modelo proposto pelo ASTM – C 234

A designação ASTM C 234 refere-se ao método de ensaio de aderência proposto pela ASTM (1986). É importante, mencionar que esta norma em seu primeiro item enfatiza que os valores obtidos neste ensaio para avaliação da aderência não devem ser considerados para propósitos estruturais. Ele visa apenas os projetos de pesquisa, nos quais as condições de ensaio podem sofrer variações de acordo com os objetivos do estudo.

Para este ensaio, os corpos-de-prova são de dois tipos a saber: um contendo a barra de aço embutida verticalmente e outro com as barras embutidas horizontalmente. Os espécimes do primeiro tipo possuem formato cúbico com aresta de 150 mm e barra posicionada verticalmente ao longo do eixo central do referido cubo. A esquematização do ensaio é feita conforme a Figura 23, na qual tem-se que a barra a ser utilizada no ensaio deve projetar sua extremidade inferior cerca de 10 mm abaixo do fundo do corpo-de-prova. É importante mencionar que a extremidade superior deve possuir um comprimento tal que permita atravessar os blocos de apoio do dispositivo de ensaio e seja ancorada nas garras da prensa.

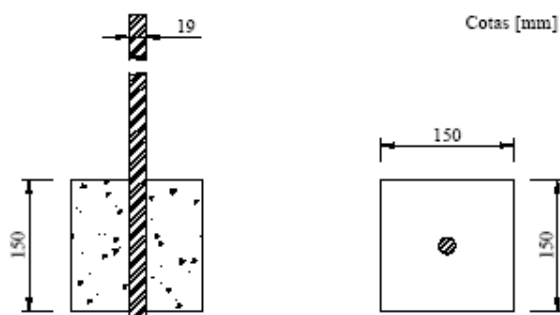


Figura 23: Modelo ASTM C 234 com barra vertical.

Fonte: CASTRO (2002).

O segundo tipo, com dimensões 150 mm x 150 mm x 300 mm tem o eixo maior na vertical conforme ilustrado na Figura 24.

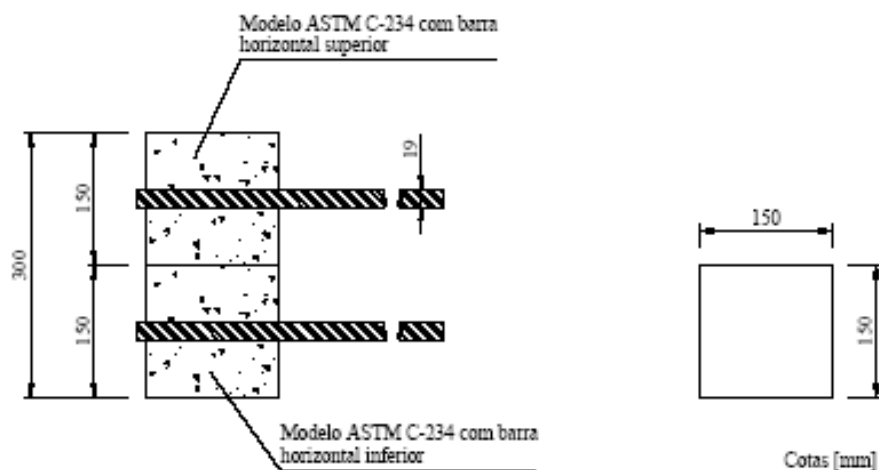


Figura 24: Modelo ASTM C 234 com barra horizontal.

Fonte: CASTRO (2002).

Ambas as barras são concretadas perpendicularmente ao eixo da altura do prisma, com alturas em relação à base, respectivamente, 75 mm e 225 mm. O comprimento deve ser tal que exceda, conforme o modelo apresentado anteriormente as faces opostas do prisma. Vale salientar a importância das ranhuras em cada uma das faces opostas do prisma, paralelas aos eixos das barras com no mínimo 13 mm de profundidade, a fim de facilitar a divisão do prisma em dois cubos através da ruptura por flexão passando pelo plano de enfraquecimento que as contém.

FRANÇA (2004) efetuou estudos sobre a adição de resíduos de raspas de pneu ao concreto em ensaios de avaliação de aderência. O referido autor realizou o *pull out test* e o ensaio de tração simétrica.

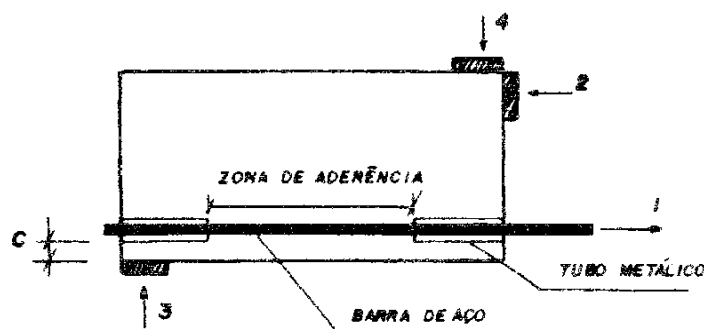
Ele efetuou comparações entre os resultados obtidos, para o ensaio de tração simétrica, no caso do concreto convencional e do concreto com adição de resíduos de raspa de pneu aos 28 dias e 90 dias. Foi concluído, na avaliação das tensões de aderência entre os dois tipos de concreto do programa experimental, que o concreto com incorporação de resíduos apresentou um decréscimo de tensão de aderência comparado ao concreto convencional, embora na curva tensão x cisalhamento obtida tenha apresentado um comportamento parecido entre os dois

tipos de concreto. Foi verificado também que, para ambos os concretos, houve um acréscimo das tensões de aderência de 28 para 90 dias.

5.4 ENSAIO DE EXTREMO DE VIGA (*BEAM END TEST*)

Com a vantagem de redução das dimensões do corpo-de-prova em comparação ao Beam test convencional, este ensaio também consiste em extrair uma barra de aço situada na porção inferior da viga (corpo-de-prova), por meio de uma solicitação de tração.

A Figura 25 mostra que a reação (2) simulando a zona de compressão da viga sendo aplicada na parte superior do corpo-de-prova. É gerado um momento (1 e 2) que logo é equilibrado por outro par de forças (3 e 4) que atuam perpendicularmente à barra e simulam a reação de apoio e o esforço cortante que seria transmitido pelo 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 25: Esquema de ensaio de extremo de viga (*beam end test*).

Fonte: BARBOSA (2001).

5.5 ENSAIO DE CONFORMAÇÃO SUPERFICIAL

Este ensaio normalizado pela NBR 7477 se configura em tracionar a armadura inserida num corpo-de-prova prismático em concreto em seus dois extremos no intuito de observar, através de dois esforços opostos de tração a aderência entre o aço e o concreto. Considera-se mais significativo a utilização deste ensaio em estudos sobre a fissuração do concreto uma vez

que ele consegue reproduzir com alguma fidelidade as condições de solicitação das armaduras nas regiões de tração de vigas fletidas.

CASTRO (2002, p.64) menciona que a dificuldade deste ensaio é a identificação de aberturas de fissuras que não se desenvolvem linear muito menos perpendicularmente à linha média do tirante, bem como não apresentam abertura regular.

Ainda assim, é possível obter o coeficiente de conformação superficial η das barras que é avaliado neste ensaio através do afastamento relativo entre as fissuras verificadas durante a aplicação das cargas Δl podendo ser calculado por meio da expressão:

$$\eta = \frac{2,25d}{X_M} \quad (15)$$

onde

η – coeficiente de conformação superficial;

d – lado da seção do tirante;

X_M – distância média entre as fissuras.

É importante salientar que as barras lisas apresentam fissuras maiores e mais afastadas entre si, ao contrário das barras nervuradas. O ensaio é esquematizado segundo a Figura 26.

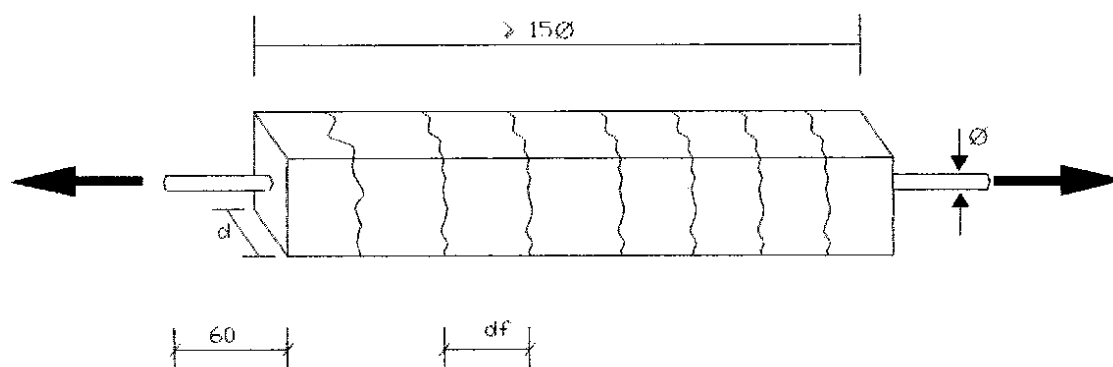


Figura 26: Esquema do ensaio de conformação superficial.

Fonte: FRANÇA (2004).

CASTRO¹⁹ (2000 *apud* BARBOSA, 2001, p.75) propõe a partir do espaçamento médio entre as fissuras (X_M), a tensão média de aderência das barras de aço aplicando-se a equação:

$$\tau_{m\text{CASTRO}} = 0,375 \frac{f_t \phi}{X_M \rho} \quad (16)$$

onde

$\tau_{m\text{CASTRO}}$ – tensão média em MPa;

f_t – resistência à tração do concreto;

X_M – distância média entre as fissuras;

ϕ – diâmetro da barra;

$\rho = A_s/A_c$.

5.6 ENSAIO DAS QUATRO BARRAS

Os ensaios das quatro barras esquematizado na Figura 27 consiste em arrancar uma barra de aço situada na porção central de um corpo-de-prova cilíndrico. A reação oposta à força de arrancamento são produzidas por três barras dispostas simetricamente em relação ao eixo cilíndrico. DUCATTI (1993, p.345) ressalta que este ensaio foi baseado em trabalhos realizados por LORRAIN (1988).

O deslizamento entre o concreto e o aço é medido na extremidade de saída da barra por intermédio de um relógio comparador. Parâmetros tais como, comprimento de ancoragem, uso de armadura transversal (estribos), distância entre as barras central e periférica, o diâmetro das barras e a dimensão transversal, segundo o autor, podem ser variados.

¹⁹ CASTRO, P.F. , Notas sobre o estudo da aderência aço- concreto, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 2000.

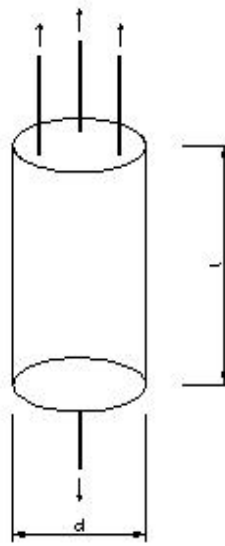


Figura 27: Esquema do corpo-de-prova empregado no ensaio de quatro barras.

Fonte: DUCATTI (1993).

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL I

No intuito de observar o comportamento da aderência aço concreto, apresenta-se neste capítulo, o programa experimental desenvolvido para a elaboração desta dissertação.

Foi estabelecido que, através deste estudo, fossem determinadas as tensões de aderência e, se possível, os deslizamentos da armadura em relação ao concreto em pontos distintos de uma barra de aço. Por esta razão, foram realizados os ensaios de conformação superficial e de arrancamento (*pull out test*).

Em atenção ao programa experimental da pesquisa desenvolvida por MATTOS (2005), em que foram introduzidos agregados reciclados (raspas de pneu e resíduos plásticos provenientes da indústria farmacêutica) em blocos de concreto celular, nos traços do programa experimental foram utilizados os referidos resíduos em substituição de 20% do total em peso da brita com diâmetro máximo de 9,5 mm (convencionalmente denominada brita zero). Em seguida, foram determinadas as tensões de aderência relativa aos traços do programa experimental I.

As barras de aço utilizadas foram de seção circular com diâmetro nominal de 10 mm da classe CA 50 A.

Definidos o tipo de barra, os agregados e os resíduos a serem utilizados para a confecção do concreto, foram elaborados seis traços, de composições distintas, a saber:

- traço CBBA: concreto bombeado com adição de brita zero como agregado graúdo, utilizando aditivo;
- traço CBBE: concreto bombeado com adição de brita zero como agregado graúdo, substituindo o aditivo utilizado no traço anterior por espumogen;

- traço CBFA: concreto bombeado, com substituição de 20% da brita zero por resíduo farmacêutico em volume, utilizando aditivo;
- traço CBFE: concreto bombeado, com substituição de 20% da brita zero por resíduo farmacêutico em volume, utilizando espumogen;
- traço CBPA: concreto bombeado, com substituição de 20% da brita zero por raspa de pneu em volume, utilizando aditivo;
- traço CBPE: concreto bombeado, com substituição de 20% da brita zero por raspa de pneu em volume, utilizando espumogen.

Os traços em CBBA; CBBE; CBFA; CBFE; CBPA; CBPE correspondem, respectivamente, ao concreto bombeado com aditivo, concreto bombeado com espumogen, concreto bombeado com resíduo farmacêutico e aditivo, concreto bombeado com resíduo farmacêutico e espumogen, concreto bombeado com raspa de pneu e aditivo e concreto bombeado com raspa de pneu e espumogen. Os traços foram confeccionados na empresa Concreto Redemix do Brasil S.A.

Foram realizados os ensaios de resistência à compressão para cada traço, para obtenção do F_c , em um número de dois. Além disso, foram determinados, os valores das resistências à compressão, resistência à tração por compressão diametral, do módulo de deformação dos traços envolvidos nesta pesquisa, seguindo os parâmetros da norma brasileira.

O programa experimental realizou-se em duas etapas. Na primeira etapa, executou-se o ensaio de conformação superficial, onde foram confeccionados dois corpos-de-prova cilíndricos para cada traço de concreto. Em seguida, efetuou-se o ensaio de arrancamento no intuito de determinar as tensões de aderência, por meio de dois corpos-de-prova, confeccionados para cada traço.

6.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais utilizados para a confecção dos corpos-de-prova (areia e brita) não sofreram nenhum ensaio de caracterização, tendo em vista que o concreto empregado foi cedido pela empresa Concreto Redemix do Brasil S.A. O cimento utilizado foi o CP III RS 40.

6.1.1 Espumogen

O aditivo formador de espuma utilizado para a confecção do concreto, espumogen, mostrado na Figura 28, produz uma espuma leve de cimento que é desenvolvida pelo fabricante Texsa. O produto final, segundo as informações do fabricante, apresenta uma densidade correspondente a 450 kg/m^3 nos estados seco e endurecido, além de resistência à compressão entre 0,6 MPa a 0,8 MPa. A empresa Texsa também indica que, para alcançar maiores resistências à compressão do produto (até um limite máximo de 16 kg/cm^2), deve-se reduzir a relação água cimento.

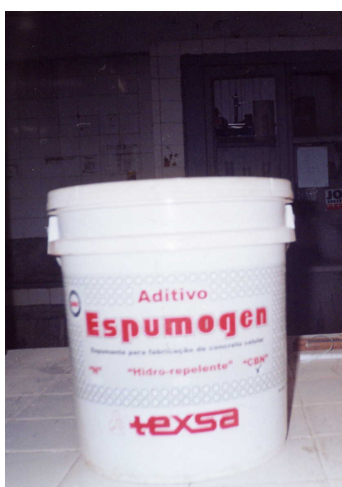


Figura 28: Espumogen utilizado na mistura.

6.1.2 Aditivo

O aditivo utilizado para a confecção dos traços CBBA, CBFA e CBPA, foi do tipo Rheotec tec-mult 410 plastificante e redutor de água multifuncional.

6.2 PROPORÇÃO DOS MATERIAIS

A proporção dos materiais neste programa experimental, conforme explicitado no item 7.2, para a confecção do concreto foi o fornecido empresa Concreto Redemix do Brasil S.A.. A mistura dos materiais foi realizada numa betoneira de eixo inclinado, com capacidade para 320 litros, conforme ilustrado na Figura 29. A colocação dos materiais na betoneira obedeceu à seguinte ordem: primeiramente, a mistura dos agregados gráudo e miúdo, com posterior adição do cimento, água e aditivo (para os traços CBBA, CBFA e CBPA) e espumogen (para

os traços CBBE, CBFÉ e CBPE), totalizando 10 minutos de mistura, para cada traço confeccionado. Justifica-se a inclusão do aditivo nos traços, pela característica do concreto bombeado, ou seja, a origem de seu fornecimento é o caminhão betoneira.



Figura 29: Betoneira utilizada na confecção dos traços.

O espumogen, seguindo as orientações do fabricante foi misturado à água, utilizando uma furadeira com uma hélice adaptada, a fim de a mistura ser incorporada aos materiais na betoneira, como ilustrado nas Figuras 30 e 31.



Figura 30: Furadeira com hélice adaptada.



Figura 31: Mistura do espumogen à água da mistura.

As formas, devidamente ajustadas, foram untadas antes do lançamento do concreto e colocação do aço.

A proporção dos traços adotados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: Proporção dos traços.

Traço	Traço (kg)	Aditivo plastificante (%)	Espumogen (%)
CBBA	1:2,094:2,795	1	--
CBBE	1:2,094:2,795	--	2
CBFA	1:2,094:2,236:0,188	1	--
CBFE	1:2,094:2,236:0,188	--	2
CBPA	1:2,094:2,236:0,170	1	--
CBPE	1:2,094:2,236:0,170	--	2

6.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

O concreto utilizado neste estudo foi devidamente caracterizado por meio de ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral segundo os parâmetros da norma brasileira NBR 5739 e NBR 7222, respectivamente.

Os corpos-de-prova empregados seguem formato cilíndrico de dimensões (15x30) cm devidamente especificados pela norma brasileira NBR 5738.

Foram moldados dois corpos-de-prova para cada traço destinados ao ensaio de determinação da resistência à compressão, totalizando 12 corpos-de-prova. Realizou-se também o ensaio à tração por compressão diametral nos corpos-de-prova (Figura 32).

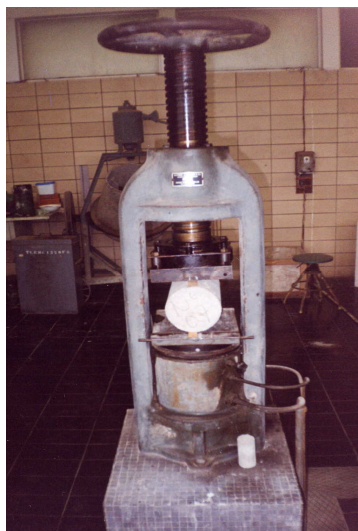


Figura 32: Determinação da resistência à tração por compressão diametral.

É importante mencionar que na etapa de confecção dos corpos-de-prova, foi realizado a pesagem dos elementos, no intuito de observar, comparativamente, os pesos do concreto executado com aditivo (CBBA, CBFA, CBPA) e espumogen (CBBE, CBFE, CBPE).

Tabela 11: Pesos e densidades dos CP.

Traço	Peso (kg)	Densidade
CBBA	12,24	2309,22
CBBE	9,36	1766,45
CBFA	10,25	1934,61
CBFE	8,88	1676,24
CBPA	11,58	2185,99
CBPE	8,54	1611,32

Utilizando dois corpos-de-prova para cada traço, totalizaram-se 12 elementos necessários para a realização deste ensaio.

Os resultados dos ensaios de caracterização do concreto, para cada traço, se encontram na Tabela 12.

Tabela 12: Ensaio de caracterização do concreto.

Traços	Resistência à compressão (F_c) (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (F_t) (MPa)	Relação A/C
CBBA	38,5	3,47	0,61
CBBE	5,7	0,42	0,61
CBFA	26,6	2,68	0,61
CBFE	3,3	0,36	0,61
CBPA	12,4	1,31	0,61
CBPE	4	0,43	0,61

6.4 BARRAS DE AÇO

Empregaram-se barras de aço nervuradas com diâmetro nominal de 10 mm fornecidos pela construtora RG Cortes. As referidas barras foram devidamente caracterizadas segundo as determinações da normalização brasileira NBR 7477 e NBR 7480, no laboratório de resistência dos materiais da UERJ, com objetivo de determinar a tensão de escoamento do aço, bem como a tensão de ruptura e o alongamento na ruptura (tração do aço), além de ensaios de dobramento e área relativa da nervura. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 13

Tabela 13: Caracterização das barras de aço.

Amostra	Dimensões nominais (mm)	Massa real por metro (kg/m)	Área (mm ²)	Cargas (kN)		Tensões (MPa)		Alongamento (%)	Dobramento
				Esc.	Rup.	Esc.	Rup.		
1	10,0	0,591	75,28	43800	63800	582	847	12,40	S/ fissur.
2	10,0	0,605	77,06	45000	62400	584	810	14,00	S/ fissur.

6.5 ENSAIO DE CONFORMAÇÃO SUPERFICIAL

A primeira etapa do programa experimental caracterizou-se pela realização do ensaio de conformação superficial η das barras de aço de seção circular com diâmetro nominal de 10 mm em concretos com resistência à compressão mínima aos 28 dias.

Para cada traço, foram moldados dois corpos-de-prova, num total de 12 elementos para a determinação do coeficiente de conformação superficial. Este ensaio foi conduzido segundo as recomendações da norma brasileira NBR 7477. As dimensões dos corpos-de-prova seguem os parâmetros da mesma norma. (Figura 33)

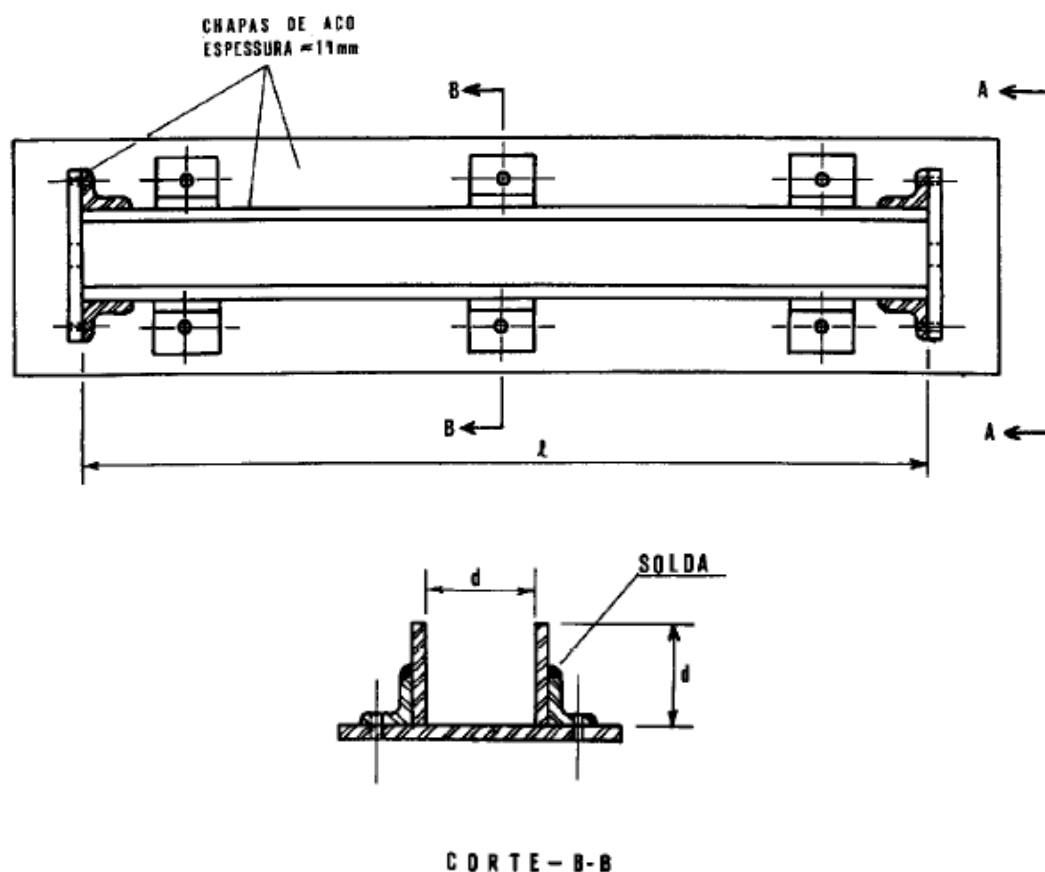


Figura 33: Esquematização das formas do ensaio de conformação superficial.

A força de tração aplicada aos corpos-de-prova para este ensaio corresponde a 80% do limite de escoamento do aço. A concretagem realizou-se manualmente na direção perpendicular às barras conforme. A Figura 34 mostra as formas utilizadas no para a execução do ensaio.



Figura 34: Formas utilizadas no ensaio de conformação superficial.

A etapa de adensamento foi seguida de nivelamento da superfície do concreto com auxílio de colher de pedreiro, cobrindo-se tais corpos-de-prova com um plástico por um período de três dias seguido de desmoldagem cuidadosa, no intuito de não danificá-los. Eles foram mantidos imersos em tanques de cura até a semana antecedente à realização dos ensaios.

Foi necessário notar que o comprimento das barras é de 15ϕ (cm) + 120 cm e que o comprimento do tirante é de 15 cm + ϕ (cm). Procurou-se determinar, ao longo do comprimento da barra de aço envolvida pelo concreto o coeficiente de conformação superficial das barras η , bem como a tensão média de aderência.



Figura 35: Corpos-de-prova para o ensaio de conformação superficial.

Em seguida realizou-se uma análise estatística com objetivo de avaliar os resultados encontrados.

6.6 ENSAIO DE ARRANCAMENTO (PULL OUT TEST)

Na segunda etapa do programa experimental foi realizado o ensaio de arrancamento para as barras de diâmetro nominal de 10,0 mm, em todos os traços de concreto anteriormente citados, com resistência à compressão mínima de 28 dias.

Deste modo, foram moldados dois corpos-de-prova para cada traço de concreto, totalizando 12 elementos para a execução do ensaio de arrancamento. Conforme explicitado no capítulo 5 – ensaios de avaliação de aderência, o ensaio de arrancamento é o mais tradicional de aderência, que consiste em extrair uma barra, posicionada no centro de um corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova, foram moldados em formas cilíndricas metálicas. Salientando-se o diâmetro da seção transversal dos moldes é de 200 mm, para barras de aço com $\Phi \leq 20,0$ mm. As referidas barras de aço a serem ensaiadas serão posicionadas no centro do corpo-de-prova com as respectivas extremidades projetadas para fora, conforme representação esquemática da Figura 36.

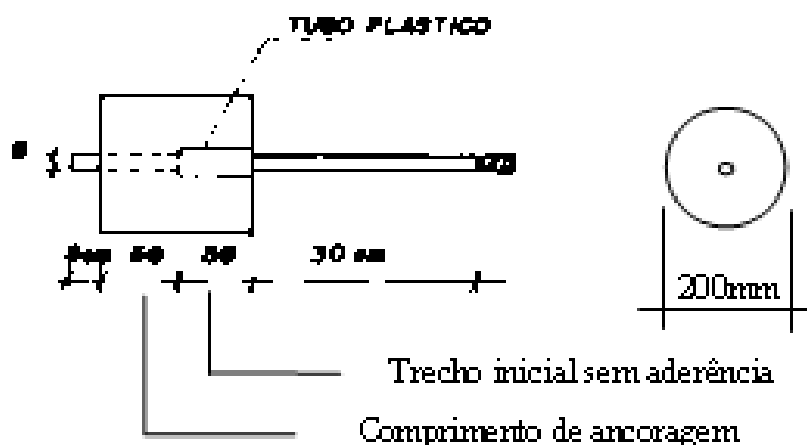


Figura 36: Representação esquemática do CP do ensaio de arrancamento.

O comprimento de ancoragem efetivo é de 5ϕ , sendo ϕ o diâmetro nominal da barra, conforme as especificações do CEB RC 6. Nos trechos sem ancoragem as barras são envoltas por tubos plásticos de PVC, assegurando, desta forma um trecho inicial sem aderência, tomando-se o cuidado de não interferir no comprimento de ancoragem estipulado para manter o trecho e ancoragem afastado da face do concreto em contato com a placa de reação do

equipamento de ensaio. As formas utilizadas para a moldagem dos corpos-de-prova do ensaio de arrancamento estão ilustradas na Figura 37.



Figura 37: Formas cilíndricas do ensaio de arrancamento.



Figura 38: Corpos-de-prova (CBBA, CBBE, CBFA, CBFE, CBPA, CBPE).

Para a execução do ensaio foi utilizado uma máquina elaborada por CASTRO e SOLERO (2005), constituída de uma castanha de protensão conectada a um macaco hidráulico de pistão vazado com capacidade para 440 kN, acionado por uma bomba manual de pressão, segundo a representação esquemática da Figura 39.

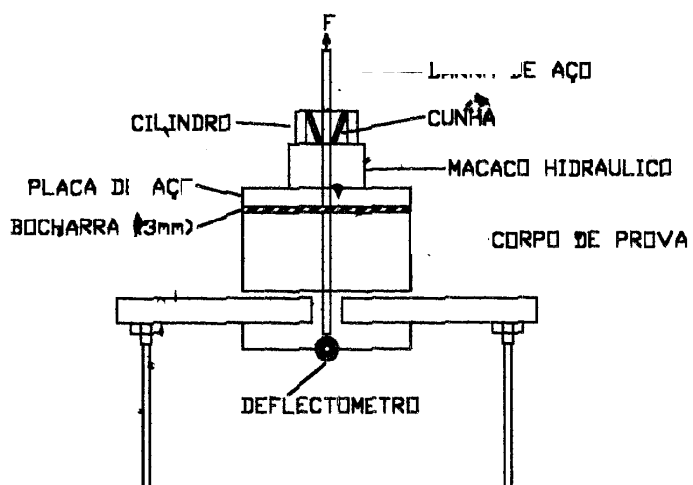


Figura 39: Esquema do equipamento utilizado no ensaio



Figura 40: Execução do ensaio de arrancamento.



Figura 41: Célula de carga.

As deformações ocorridas na célula, indicavam a magnitude da carga aplicada, cuja leitura foi realizada por uma pessoa e os escorregamentos foram medidos por meio de deflectômetros com precisão de 0,01 mm.

A força de tração foi aplicada em um dos extremos da barra pelo macaco hidráulico que reagia contra o corpo-de-prova, sendo os escorregamentos medidos por meio de um deflectômetro encostado na extremidade oposta à mesma barra. Uma placa de aço foi introduzida entre o macaco e o corpo-de-prova a fim de que a compressão fosse distribuída em toda a face. Além disso, a mesma face que recebe a carga foi revestida por uma chapa de borracha com espessura de 3 mm, no intuito de eliminar qualquer concentração de tensão que por ventura venha a ocorrer.

A equipe se constituiu de três pessoas, a primeira para operar a aplicação da carga, outra para observar o deflectômetro avisando quando o escorregamento atinge os valores pré determinados e finalmente uma terceira pessoa para anotar os resultados. A aplicação da carga é interrompida quando a barra não suportava mais acréscimos de carga.

Em seguida, através das cargas obtidas, tornou-se possível mensurar as tensões aderência, permitindo traçar curvas características de tensão de aderência x deslocamento e, conseqüentemente, a realização de uma análise estatística básica a fim de avaliar os resultados obtidos.

7 PROGRAMA EXPERIMENTAL I: RESULTADOS

Foram empregados neste estudo dois ensaios: um para determinação do coeficiente de conformação superficial e o ensaio de arrancamento (*pull out*), para os quais se seguem os resultados obtidos. No anexo A encontram-se as análises estatísticas de todos os resultados encontrados no programa experimental I desta dissertação. O objetivo deste capítulo é apresentar as tensões de aderência dos traços de concreto propostos, incluindo a adição de resíduos tais como raspas de pneu e resíduos oriundos da indústria farmacêutica, para os ensaios de conformação superficial e arrancamento, conforme explicitado no capítulo 6.

7.1 ENSAIO DE CONFORMAÇÃO SUPERFICIAL

Após a realização do ensaio, determinou-se o espaçamento médio entre as fissuras no intuito de obter o coeficiente de conformação superficial nos corpos-de-prova com idade de 28 dias.

A Tabela 14 apresenta os valores obtidos dos espaçamentos médios entre as fissuras, e os coeficientes de variação das amostras (CV), onde CV é uma análise estatística preliminar, que avalia a variação dos dados obtidos no experimento, apresentado em porcentagem. Caso as amostras ultrapassem o limite de 25%, os resultados serão rejeitados, indicando a necessidade de um maior número de elementos.

Em observação aos valores de CV, constata-se que todas as amostras apresentaram um coeficiente de variação inferior a 25%, de modo que os resultados obtidos foram aceitos. É perceptível que, os traços com utilização de aditivo e resíduo (traços CBFA e CBPA), apresentaram os maiores valores para o coeficiente de variação em relação aos demais.

Após análise preliminar dos resultados, determinou-se o coeficiente de conformação superficial, referido também por diversos autores como coeficiente de aderência, nos parâmetros da norma NBR 7477, conforme mencionado no capítulo 5, item 5.5.

Tabela 14: Distância média entre fissuras (cm), coeficientes de variação e conformação superficial.

Traço	X1	X2	XM	Desvio Padrão	CV	η
CBBA	9,01	9,38	9,20	0,262	2,85	1,22
CBBE	7,80	8,35	8,08	0,389	4,82	1,39
CBFA	10,24	8,63	9,44	1,138	12,07	1,19
CBFE	7,57	6,93	7,25	0,453	6,24	1,55
CBPA	8,14	6,47	7,31	1,181	16,17	1,54
CBPE	7,46	7,93	7,70	0,332	4,32	1,46

A NBR 7480 determina que o valor mínimo para o coeficiente de conformação superficial para barras de diâmetro nominal $\Phi \geq 10$ mm, seja igual a 1,5. Para tanto, verifica-se que os valores obtidos nos traços CBBA, CBBE, CBFA e CBPE não atendem aos valores indicados pela norma, porém, os traços CBFE e CBPA atenderam ao valor solicitado.

7.1.1 Tensão média de aderência

No intuito de obter tensão média de aderência através do ensaio de conformação superficial, empregou-se a equação proposta por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA, 2001), já referenciada no capítulo 5, item 5.5. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para a tensão média de aderência.

Tabela 15: Tensões médias de aderência segundo CASTRO (2000).

Traço	$\tau_{m\text{CASTRO}}$ (MPa)
CBBA	4,60
CBBE	0,64
CBFA	3,13
CBFE	0,57
CBPA	1,92
CBPE	0,69

7.2 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA PELA NBR 6118

A NBR 6118, sugere para o cálculo da tensão de aderência, a equação explicitada no capítulo 3, item 3.4. Foram obtidos os valores da tensão de aderência ($\tau_{\text{NBR 6118}}$) segundo a referida norma, que se apresentam na Tabela 16.

Tabela 16: Tensão de aderência segundo a NBR 6118
(MPa).

Traço	$\tau_{\text{NBR 6118}}$ (MPa)
CBBA	7,81
CBBE	0,95
CBFA	6,03
CBFE	0,81
CBPA	2,95
CBPE	0,97

7.3 ENSAIO DE ARRANCAMENTO (*PULL OUT TEST*)

Após a realização deste ensaio, pelo qual foram aplicados esforços de tração, sendo obtidos os respectivos deslocamentos da barra de aço, foi permitido calcular as tensões médias de aderência, relativas a cada traço de concreto.

Os valores das tensões de aderência correspondentes a este ensaio constam nas Tabelas 17 a 22 a seguir.

Tabela 17: Tensão de aderência em CBBA.

CBBA	Desloc.(mm)	τ (MPa)
CP 1	0,03	7,18
CP 1	0,11	8,42
CP 1	0,28	10,16
CP 1	0,52	11,68
CP 1	0,97	13,26
CP 1	1,07	13,41
CP 1	1,33	13,69
CP 2	0,01	4,59
CP 2	0,24	9,51
CP 2	0,51	11,26
CP 2	0,82	11,92
CP 2	1,01	12,03
$\tau_{\text{Ruptura 1}}$	1,77	13,90
$\tau_{\text{Ruptura 2}}$		4,59
τ_{RmCEB}		12,98

Tabela 18: Tensão de aderência em CBBE.

CBBE	Desloc. (mm)	τ (MPa)
CP 1	0,14	0,16
CP 1	0,22	0,17
CP 1	0,46	0,29
CP 1	0,84	0,85
CP 1	1,18	0,99
CP 1	1,44	1,06
CP 1	1,85	1,12
CP 1	2,19	1,15
CP 2	0,12	1,21
CP 2	0,26	0,20
CP 2	0,55	0,20
CP 2	0,80	0,22
CP 2	0,97	0,27
CP 2	1,18	0,37
CP 2	1,54	0,58
CP 2	1,87	0,78
$\tau_{Ruptura\ 1}$	2,65	1,21
$\tau_{Ruptura\ 2}$	2,11	0,99
τ_{RmCEB}	*	1,10

Tabela 19: Tensão de aderência em CBFA.

CBFA	Desloc. (mm)	τ (MPa)
CP 1	0,01	5,22
CP 1	0,08	10,93
CP 1	0,16	11,77
CP 1	0,25	12,77
CP 2	0,01	14,08
CP 2	0,04	7,52
CP 2	0,10	11,47
CP 2	0,20	13,34
CP 2	0,36	15,37
CP 2	0,55	17,09
CP 2	0,80	18,17
$\tau_{Ruptura\ 1}$	0,74	14,08
$\tau_{Ruptura\ 2}$	1,00	18,67
τ_{RmCEB}	*	16,37

Tabela 20: Tensão de aderência em CBFE.

CBFE	Desloc. (mm)	τ (MPa)
CP 1	0,07	0,15
CP 1	0,36	0,95
CP 1	0,66	1,03
CP 2	0,01	1,08
CP 2	0,1	0,43
$\tau_{Ruptura\ 1}$		1,08
$\tau_{Ruptura\ 2}$	0,95	1,46
τ_{RmCEB}	*	1,27

Tabela 21: Tensão de aderência em CBPA.

CBPA	Desloc. (mm)	τ (MPa)
CP 1	0,01	2,87
CP 2	0,01	3,13
$\tau_{Ruptura\ 1}$	0,2	3,13
$\tau_{Ruptura\ 2}$	0,1	4,94
τ_{RmCEB}	*	4,03

Tabela 22: Tensão de aderência em CBPE.

CBPE	Desloc. (mm)	τ (MPa)
CP 1	0,01	1,27
CP 2	0,01	1,48
CP 2	0,1	1,06
$\tau_{Ruptura\ 1}$	0,14	1,48
$\tau_{Ruptura\ 2}$	*	1,48
τ_{RmCEB}	*	1,48

Os gráficos tensão x deslocamento dos traços CBBA, CBBE, CBFA, CBFE constam no Anexo A desta dissertação.

O CEB considera que o valor mínimo admissível para a tensão de ruptura seja, conforme a equação (17):

$$\tau_u \geq (13 - 0,19\phi) \quad (17)$$

Tendo em vista as recomendações do CEB, no tocante ao valor mínimo admissível para a tensão de ruptura 11,1 MPa, é possível afirmar que apenas os traços CBBA e CBFA se apresentam conforme os requisitos mínimos da norma.

7.4 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

O módulo de deformação dos traços CBBA, CBBE, CBFA, CBFE, CBPA, CBPE foi determinado segundo as prescrições da norma NBR 8522. A Figura 42 ilustra a execução do ensaio.

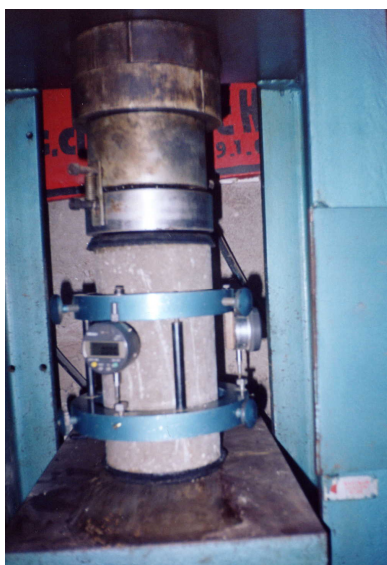


Figura 42: Execução do ensaio de determinação do módulo de deformação.

Os valores dos módulos de deformação secante referentes aos traços do programa experimental seguem segundo a Tabela 23 a seguir.

Tabela 23: Módulos de deformação.

Traço	E (GPa)
CBBA	26,2
CBBE	7,20
CBFA	20,6
CBFE	4,90
CBPA	13,6
CBPE	6,50

Os valores das leituras dos deflectômetros observados para os três corpos-de-prova bem como os respectivos módulos de deformação encontram-se de modo mais detalhado no Anexo C desta dissertação.

8 PROGRAMA EXPERIMENTAL II

A justificativa para a repetição dos ensaios de conformação superficial e arrancamento que caracterizam o programa experimental II desta dissertação, foi em razão do número de corpos-de-prova produzidos no programa experimental I que, sob ponto de vista estatístico, se mostravam inadequados a fim de que posteriormente, fossem produzidas análises estatísticas confiáveis.

Com efeito, foram determinados as tensões médias de aderência τ_m , e os deslocamentos relativos da armadura s específicos em relação ao concreto. Foram executados conforme mencionado no parágrafo anterior os ensaios de determinação do coeficiente de conformação superficial e de arrancamento (*pull out test*).

Novamente, em atenção à pesquisa realizada por MATTOS (2005), acerca da utilização de resíduos de raspa de pneu e resíduo plástico de origem farmacêutica em blocos de concreto celular, foi estabelecido para a confecção dos traços, a incorporação de agregados reciclados em substituição a 20% do total em peso da brita com $D_{máx} = 9,5$ mm (brita zero) utilizada. Na seqüência, foram determinadas as tensões de aderência relativa aos traços do programa experimental.

Definidas as barras de aço, com diâmetro nominal de 10 mm da classe CA 50 A e os resíduos a serem incorporados, foram elaborados seis traços, de mesma constituição do programa experimental anterior (I), aqui convencionados CBBA (2), CBBE (2), CBFA (2), CBFE (2), CBPA (2) e CBPE (2).

Os referidos traços correspondem, respectivamente, ao concreto bombeado com aditivo, concreto bombeado com espumogen, concreto bombeado com resíduo farmacêutico e aditivo, concreto bombeado com resíduo farmacêutico e espumogen, concreto bombeado com

raspa de pneu e aditivo e concreto bombeado com raspa de pneu e espumogen. O número 2 empregado ao final da sigla de cada traço é para justificar o programa experimental II.

Para cada traço foram realizados os ensaios de resistência à compressão, em conformidade com a norma brasileira NBR 5739. Além disso, foram determinados, os valores das resistências à tração por compressão diametral, segundo os parâmetros da NBR 7222.

O programa experimental II realizou-se em duas etapas. Na primeira, foi executado o ensaio de conformação superficial, onde foram confeccionados nove corpos-de-prova prismáticos para cada traço de concreto, totalizando 54 elementos, conforme especificações da NBR 7477.

Após a análise dos resultados obtidos nessa primeira etapa, efetuou-se o ensaio de arrancamento (*pull out*) de acordo com as determinações do CEB RC6 no intuito de determinar as tensões de aderência média e de ruptura, por meio de quatro corpos-de-prova, confeccionados para cada traço, totalizando 24 elementos.

8.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

8.1.1 Cimento

Para a confecção dos traços de concreto, utilizou-se o cimento portland do tipo CP III 40 RS, cujo fabricante é a Holcim do Brasil S.A.

8.1.2 Agregados

8.1.2.1 Areia

O agregado miúdo empregado (areia normal), encontrado no comércio de Juiz de Fora, foi proveniente do leito do rio do peixe. A caracterização desse agregado realizou-se segundo as recomendações da NBR 7211 (Tabela 24).

Tabela 24: Análise do agregado miúdo.

Classificação granulométrica NBR 7211	Grossa
Massa Específica Real NBR 9776 (kg/dm ³)	2,67
Massa Específica Aparente Seca NBR 7810 (kg/dm ³)	1,90
Módulo de Finura NBR 7211	3,12
Torrões de argila NBR 7218 (%)	Isento
Material Pulverulento NBR 7219 (%)	3,00
Impureza Orgânica NBR 7220 (p.p.m.)	< 300
Dimensão Máxima Característica NBR 7211 (mm)	4,80

8.1.2.2 Brita

A Tabela 25 a seguir, consta da análise do agregado graúdo com $D_{máx}$ correspondente a 9,5 mm (brita zero) utilizado no programa experimental desta dissertação. A Tabela 25 a seguir consta a caracterização do agregado.

Tabela 25: Análise do agregado graúdo.

Classificação granulométrica NBR 7211	Fora de graduação
Massa Específica Real NBR 9776 (kg/dm ³)	2,70
Massa Específica Aparente Seca NBR 7810 (kg/dm ³)	1,38
Módulo de Finura NBR 7211	5,75
Torrões de argila NBR 7218 (%)	Isento
Impureza Orgânica NBR 7220 (p.p.m.)	< 300
Dimensão Máxima Característica NBR 7211 (mm)	9,50

8.1.3 Espumogen

O aditivo incorporador de ar utilizado para a confecção do concreto, espumogen CBN, produz uma espuma leve de cimento desenvolvida pelo fabricante Texsa. O produto final, segundo as informações do fabricante, apresenta uma densidade entre 750 e 850 no estado seco e endurecido, além de resistência à compressão compreendida entre 1,6 MPa e 2,0 MPa.

8.1.4 Aditivo plastificante

O aditivo utilizado para a confecção dos traços CBBA, CBFA e CBPA foi do tipo Rheotec tec-mult 410 plastificante e redutor de água multifuncional.

A informações fornecidas pelo fabricante, a fim de caracterizar o produto, são as ilustradas na Tabela 26.

Tabela 26: Caracterização do aditivo.

pH:	12,5 +/- 1,0
Massa específica	1,200 +/- 0,02 g/cm ³
Teor de sólidos	37,55% +/- 1,88

8.2 PROPORÇÃO DOS MATERIAIS

A dosagem dos materiais obedeceu à mesma ordem da concreteira Redemix.

Os traços adotados encontram-se na Tabela 27

Tabela 27: Proporção dos traços.

Traço	Traço (kg)	Aditivo plastificante(%)	Espumogen (%)
CBBA (2)	1:2,094:2,795	1	--
CBBE (2)	1:2,094:2,795	--	2
CBFA (2)	1:2,094:2,236:0,188	1	--
CBFE (2)	1:2,094:2,236:0,188	--	2
CBPA (2)	1:2,094:2,236:0,170	1	--
CBPE (2)	1:2,094:2,236:0,170	--	2

É importante mencionar que a porcentagem de aditivo (e espumogen) utilizados, foram especificados pelos respectivos fabricantes em função da quantidade de cimento.

A mistura dos materiais que constituíram o concreto foi realizada em uma betoneira, de eixo inclinado com capacidade para 145 litros, obedecendo à seguinte ordem: primeiramente, a mistura dos agregados grão e miúdo, com posterior adição do cimento, água e aditivo (para os traços CBBA, CBFA e CBPA) e espumogen (para os traços CBBE, CBFE e CBPE), totalizando 10 minutos de mistura, para cada traço confeccionado. Justifica-

se a inclusão do aditivo nos traços, pela característica do concreto bombeado, ou seja, a origem de seu fornecimento é o caminhão betoneira.

O espumogen, seguindo as orientações do fabricante foi misturado à água, antes de sua incorporação ao traço. Foi utilizada uma furadeira com uma hélice adaptada, de modo que a mistura fosse executada.

8.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

O concreto utilizado neste estudo foi devidamente caracterizado por meio de ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral segundo os parâmetros da norma brasileira NBR 5739 e NBR 7222, respectivamente.

Os corpos-de-prova seguem formato cilíndrico de dimensões 15cmx30cm devidamente especificados pela norma brasileira NBR 5738.

Foram moldados dois corpos-de-prova para cada traço destinados ao ensaio de determinação da resistência à compressão, totalizando 12 corpos-de-prova. Realizou-se também o ensaio à tração por compressão diametral nos corpos-de-prova.

É importante mencionar que na etapa de confecção dos corpos-de-prova, foi realizado a pesagem dos elementos, no intuito de observar, comparativamente, os pesos do concreto executado com aditivo (CBBA, CBFA, CBPA) e espumogen (CBBE, CBFE, CBPE).

Tabela 28: Pesos e densidades dos CP.

Traço	Peso (kg)	Densidade
CBBA (2)	12,31	2323,19
CBBE (2)	9,43	1778,91
CBFA (2)	11,02	2079,74
CBFE (2)	9,01	1700,97
CBPA (2)	11,61	2190,71
CBPE (2)	8,60	1622,27

Os resultados dos ensaios de caracterização do concreto aos 28 dias de idade, para cada traço, se encontram na Tabela 29.

Tabela 29: Ensaios de caracterização do concreto

Traços	Resistência à compressão (f_c) (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (f_t) (MPa)	Relação A/C
CBBA (2)	39,06	3,51	0,61
CBBE (2)	6,57	0,47	0,61
CBFA (2)	28,21	2,72	0,61
CBFE (2)	4,67	0,40	0,61
CBPA (2)	12,96	1,34	0,61
CBPE (2)	5,17	0,49	0,61

8.4 BARRAS DE AÇO

Empregaram-se barras de aço nervuradas com diâmetro nominal de 10 mm fornecidos pela empresa Belgo Mineira/ SMJ, situada na cidade de Juiz de Fora (MG), de classe CA 50-A, laminados à quente, com tensão de escoamento de 500 MPa.

As barras foram devidamente caracterizadas segundo as determinações da normalização brasileira NBR 7477 e NBR 7480. Os valores correspondentes à tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongamento, dobramento e área relativa da nervura encontram-se na Tabela 30 a seguir:

Tabela 30: Caracterização das barras de aço.

Amostra	Dimensões nominais (mm)	Massa real por metro (kg/m)	Área (mm ²)	Cargas (kN)		Tensões (MPa)		Alongamento (%)	Dobramento
				Esc.	Rup.	Esc.	Rup.		
1	10,0	0,604	76,9	48020	611,9	624,4	795,2	12,00	S/ fissura
2	10,0	0,603	76,9	52100	608,6	678,1	792,1	11,00	S/ fissura

8.5 ENSAIO DE CONFORMAÇÃO SUPERFICIAL

Primeiramente foi realizado o ensaio de determinação do coeficiente de conformação superficial η das barras de aço, com diâmetro nominal de 10 mm em concretos com resistência à compressão mínima aos 28 dias. Em seguida, determinou-se a tensão média de aderência segundo o modelo proposto por CASTRO (2000 *apud* BARBOSA, 2001, p.75), anteriormente mencionado e detalhado no capítulo 5.

Para cada traço, foram moldados nove corpos-de-prova, num total de 54 elementos para a determinação do coeficiente de conformação superficial η , conduzido segundo as recomendações da norma brasileira NBR 7477. As dimensões dos corpos-de-prova seguem os parâmetros da mesma norma.

O comprimento das barras foi de 15ϕ (cm) + 120 cm e o comprimento do tirante, $15\text{ cm} + \phi$ (cm). A Figura 43, ilustra as formas utilizadas para a confecção dos corpos-de-prova.



Figura 43: Formas do ensaio de conformação superficial.

A concretagem realizou-se manualmente na direção perpendicular às barras. A etapa de adensamento foi seguida de nivelamento da superfície do concreto com auxílio de colher de pedreiro, cobrindo-se tais corpos-de-prova com um plástico por um período de três dias seguido de desmoldagem cuidadosa, para não danificá-los. Eles foram mantidos imersos em tanques de cura até a semana antecedente à realização dos ensaios.

Para a execução do ensaio, a norma recomenda que a força de tração a ser aplicada aos corpos-de-prova corresponda a 80% do limite de escoamento do aço. A Figura 44 a seguir ilustra a execução do ensaio, com posterior aferição das distâncias médias entre as fissuras e determinação da tensão média de aderência.

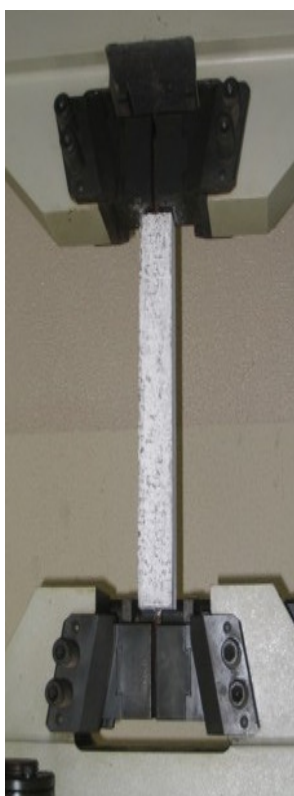


Figura 44: Ensaio de conformação superficial.

Em seguida, realizou-se uma análise estatística com objetivo de avaliar os resultados encontrados (Anexo B).

8.6 ENSAIO DE ARRANCAMENTO (PULL OUT)

O ensaio de arrancamento (*pull out*) para as barras de diâmetro nominal de 10,0 mm foi realizado para todos os traços de concreto com idade de 28 dias. Deste modo, foram moldados quatro corpos-de-prova para cada traço de concreto, totalizando 24 elementos para a execução do ensaio. Conforme explicitado no capítulo 5, o ensaio de arrancamento é o mais tradicional de aderência, que consiste em extrair uma barra, posicionada no centro de um corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova, foram moldados em formas cilíndricas metálicas. Salientando-se o diâmetro da seção transversal dos moldes é de 200 mm, para barras de aço com diâmetro nominal ou inferior a 20,0 mm, seguindo especificações do CEB RC6. As barras de aço serão posicionadas no centro do corpo-de-prova, na vertical, com as respectivas extremidades projetadas para fora.

O comprimento de ancoragem efetivo é de 5ϕ , sendo ϕ o diâmetro nominal da barra. Nos trechos sem ancoragem as barras são envoltas por tubos plásticos de PVC, assegurando, desta forma, um trecho inicial sem aderência, tomando-se o cuidado de não interferir no comprimento de ancoragem estipulado para manter este mesmo o trecho afastado da face do concreto em contato com a placa de reação do equipamento de ensaio. As formas utilizadas para a moldagem e os corpos-de-prova do ensaio de arrancamento estão ilustrados, respectivamente, nas Figuras 45 e 46.



Figura 45 : Formas do ensaio de arrancamento.



Figura 46 : CP do ensaio de arrancamento.

Para a execução do ensaio, utilizou-se um macaco hidráulico de pistão vazado com capacidade para 600 kN, para a aplicação da carga, conectado a uma bomba manual de pressão. Na medida em que as cargas eram aplicadas, eram realizadas leituras, para os deslocamentos específicos (0,01; 0,1; 1) mm, por meio de deflectômetros com precisão de 0,01 mm.

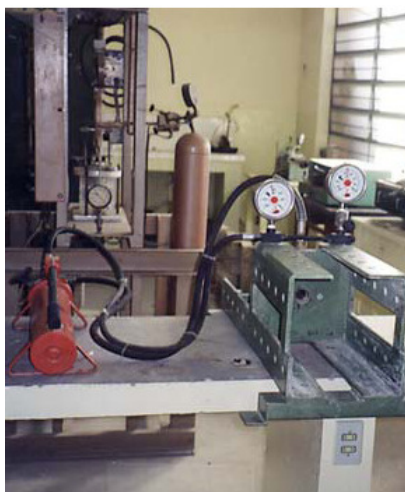


Figura 47: Máquina do ensaio de arrancamento.

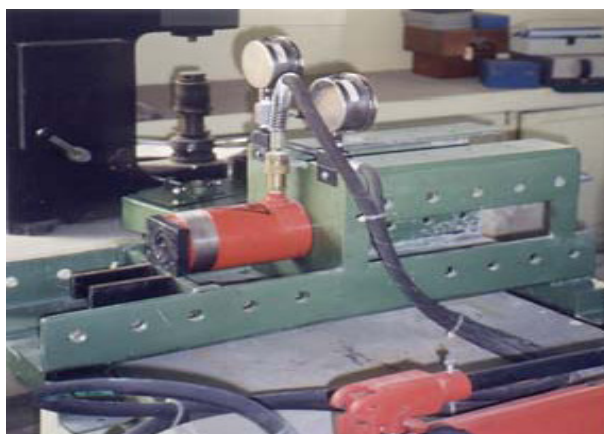


Figura 48: Máquina do ensaio de arrancamento.

Para a realização deste ensaio, foram necessárias de três pessoas, a primeira para operar a aplicação da carga, outra para observar o deflectômetro avisando quando o escorregamento atinge os valores pré determinados e finalmente uma terceira pessoa para anotar os resultados. A aplicação da carga era interrompida quando a barra não suportava mais acréscimos de carga.

Após a medição das cargas e os respectivos deslocamentos, foram calculadas as tensões médias e últimas de aderência e traçadas as curvas de tensão de aderência x deslocamento. Em seguida, a realizou-se a análise estatística, a fim de avaliar os resultados obtidos, que compõe o Anexo B desta dissertação.

9 PROGRAMA EXPERIMENTAL II: RESULTADOS

Neste capítulo, seguem os resultados encontrados no programa experimental II desta dissertação, através dos ensaios de conformação superficial e de arrancamento. No Anexo B encontram-se as análises estatísticas de todos os resultados encontrados no programa experimental II desta dissertação.

9.1 ENSAIO DE CONFORMAÇÃO SUPERFICIAL

Este ensaio tem por finalidade tracionar, em seus dois extremos, uma barra de aço inserida num corpo-de-prova de concreto, conforme as recomendações da NBR 7477, anteriormente explicitada no capítulo 5, no item 5.5.

Deste modo, obtém-se o coeficiente de conformação superficial η , sendo determinado, através da distância entre as fissuras observadas, durante o carregamento. Em seguida, utilizando a equação proposta por CASTRO²⁰ (2000 *apud* BARBOSA, 2001, p.75) é determinada a tensão média de aderência das barras de aço, anteriormente explicitada no item 5.5 do capítulo 5.

Foram moldados nove corpos-de-prova, para cada traço de concreto confeccionado (CBBA, CBBE, CBFA, CBFE, CBPA, CBPE). Logo após a fase de moldagem dos corpos-de-prova, após 28 dias, procedeu-se a etapa do ensaio. Foram determinados os espaçamentos médios entre as fissuras de cada corpo-de-prova, no intuito de serem obtidos os espaçamentos médios entre as fissuras XM, e o coeficiente de variação das amostras, dado em %.

²⁰ CASTRO, P.F. , Notas sobre o estudo da aderência aço- concreto, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 2000.

Tabela 31: Distância média entre fissuras (cm) e coeficiente de variação (%).

Traço	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	XM	CV
CBBA(2)	7,52	7,73	7,77	7,49	7,90	7,93	7,68	7,64	7,55	7,69	2,06
CBBE(2)	6,02	6,80	7,20	6,39	6,47	6,10	5,04	7,25	7,86	6,57	12,60
CBFA(2)	9,31	8,04	8,30	7,60	7,05	6,90	7,23	9,13	7,63	7,91	10,96
CBFE(2)	5,28	6,43	5,70	7,30	5,04	6,60	5,25	4,69	5,37	5,74	14,87
CBPA(2)	5,49	6,84	6,91	5,13	5,18	6,23	4,88	4,97	6,75	5,82	14,71
CBPE(2)	6,85	5,93	5,53	4,69	7,12	6,91	6,20	5,98	6,41	6,18	12,35

O coeficiente de variação (CV) das amostras, conforme já explicitado, é uma análise estatística preliminar, por meio da qual avalia-se a variação dos resultados de um experimento. A finalidade deste coeficiente é comparar a variabilidade de vários traços com seu valor médio. Caso CV seja menor que 25%, a amostra será aceita. Ele é obtido segundo a equação (18)

$$CV = \frac{\text{desvio padrão}}{\text{média}} \times 100 \quad (18)$$

É notório ao observar a Tabela 31, que todos os resultados possuem coeficientes de variação inferiores a 25%, donde conclui-se que todos foram aceitos.

Após análise preliminar, foi obtido o coeficiente de conformação superficial η , de acordo com as recomendações da NBR 7477.

Tabela 32: Coeficiente de conformação superficial.

Traço	η
CBBA (2)	1,46
CBBE (2)	1,71
CBFA (2)	1,42
CBFE (2)	1,96
CBPA (2)	1,93
CBPE (2)	1,82

A NBR 7480, admite em seu item 5.3.2, para barras com diâmetro igual ou superior a 10 mm, que o valor do coeficiente de conformação superficial máximo seja 1,5. É notório, ao observar os dados da Tabela 32 que os traços CBBE, CBFE, CBPA, CBPE, encontram-se dentro dos parâmetros especificados da referida norma. Em contrapartida, nos traços CBBA e CBFA foram verificados valores desse coeficiente abaixo do esperado.

No entanto, é válido mencionar que BARBOSA (2001, p.107) em seus resultados experimentais também constatou valores inferiores para o coeficiente de conformação superficial η em concretos de classe de resistência de 40 MPa com barras de aço com diâmetro inferiores a 12,5 mm. Para o segundo caso é importante mencionar a presença de resíduo farmacêutico, de origem plástica, como fator de influência no coeficiente de conformação superficial inferior ao especificado pela norma.

9.1.1 Tensão média de aderência ($\tau_{m \text{ CASTRO}}$)

A tensão média de aderência foi determinada através da equação proposta por CASTRO (2000 *apud* BARBOSA, 2001, p.75), mencionada no capítulo 5. Os resultados obtidos por meio dessa equação, encontram-se na Tabela 33 a seguir.

Tabela 33: Tensões médias de aderência segundo CASTRO (2000).

Traço	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa).
CBBA (2)	5,45
CBBE (2)	0,85
CBFA (2)	4,11
CBFE (2)	0,83
CBPA (2)	2,75
CBPE (2)	0,95

9.2 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA PELA NBR 6118

A NBR 6118, conforme explicitado no capítulo 3, item 3.4, propõe um modelo para determinação da tensão de aderência entre a armadura e concreto ($\tau_{\text{NBR 6118}}$) cujos resultados são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34: Tensão de aderência pela NBR 6118.

Traço	$\tau_{\text{NBR 6118}}$ (MPa)
CBBA (2)	7,90
CBBE (2)	1,06
CBFA (2)	6,12
CBFE (2)	0,90
CBPA (2)	3,02
CBPE (2)	1,10

9.3 ENSAIO DE ARRANCAMENTO (*PULL OUT TEST*)

Neste ensaio foram aplicados esforços de tração na barra de aço, sendo obtidos os respectivos deslocamentos, permitindo calcular as tensões médias de aderência, relativas a cada traço de concreto. As Figuras 43 e 44, ilustram a execução do ensaio. A esquematização do ensaio foi referenciada e devidamente elucidada nos capítulos 5 e 8 desta dissertação.

Quando os deslocamentos da barra de aço inserida no concreto atingiam valores específicos (0,01; 0,1 e 1) mm observados no deflectômetro, através da aplicação da carga, foi determinada a tensão de aderência por meio da equação explicitada no capítulo 5, item 5.3.1.

Para o cálculo da tensão média de aderência, o CEB, recomenda o emprego da média dos valores das tensões obtidas, correspondentes aos deslocamentos de 0,01 mm; 0,1 mm e 1 mm (na ausência de valores para este último deslocamento, admite-se a tensão de ruptura para deslocamento menor que 1mm). A equação 19 a seguir, corresponde à tensão média de aderência a ser obtida mediante os deslocamentos pré-determinados e as respectivas tensões de aderência.

$$\tau_{mCEB} = \frac{(\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0})}{3} \quad (19)$$

O CEB também considera como valores mínimos admissíveis para as tensões média e última (ruptura) as seguintes equações:

$$\tau_m \geq (8 - 0,12 \times \phi) \quad (20)$$

$$\tau_u \geq (13 - 0,19 \times \phi) \quad (21)$$

9.3.1 Tensão média de aderência (τ_{mCEB})

A Tabela 35 apresenta os valores obtidos para a tensão média de aderência no ensaio de arrancamento para os deslocamentos específicos. Os valores da Tabela representam a média de quatro corpos-de-prova, sendo todos os resultados mostrados no Anexo B.

Tabela 35: Tensão média de aderência para deslocamentos específicos.

Desloc.	$\tau_{0,01}$ (MPa)		$\tau_{0,1}$ (MPa)		τ_R (MPa)	
	média	CV	média	CV	média	CV
Traço						
CBBA (2)	3,51	1,58	7,51	2,32	12,19	8,98
CBBE (2)	0,17	21,48	0,22	21,03	0,84	8,86
CBFA (2)	5,76	1,81	12,30	1,79	16,57	8,94
CBFE (2)	0,29	17,29	0,83	17,30	1,17	7,01
CBPA (2)	2,12	4,89	3,77	4,85	4,17	5,11
CBPE (2)	1,08	7,67	1,29	7,83	1,47	6,32

OBS.: Os valores representam as médias de 4 corpos-de-prova nos deslocamentos pré determinados.

Os valores das tensões médias de aderência, segundo a equação anteriormente mencionada, constam na Tabela 36.

Tabela 36: Tensões médias de aderência pelo CEB RC6.

Traço	τ_{mCEB} (MPa)
CBBA (2)	7,73
CBBE (2)	0,40
CBFA (2)	11,54
CBFE (2)	0,76
CBPA (2)	3,35
CBPE (2)	1,28

Considerando as recomendações do CEB, quanto aos valores mínimos admissíveis para as tensões média e de ruptura, respectivamente 6,8 MPa e 11,1 MPa; é permitido afirmar que apenas os traços CBBA e CBFA atendem aos requisitos mínimos da norma.

Os gráficos tensão x deslocamento dos traços CBBA (2), CBBE (2), CBFA (2), CBFE (2), CBPA (2) e CBPE (2) do programa experimental constam no Anexo B desta dissertação.

10 COMPARATIVO ENTRE PROGRAMAS EXPERIMENTAIS I E II

Este capítulo tem por intuito realizar análises comparativas entres os resultados dos programa experimentais I e II. Serão mostrados graficamente histogramas para visualização dos resultados encontrados.

Para o entendimento dos histogramas que se seguem, cumpre esclarecer que PE1 refere-se aos resultados obtidos no programa experimental I e PE2 corresponde aos resultados encontrados no programa experimental II.

10.1 COMPARATIVO DAS DENSIDADES

Os resultados das densidades dos traços obtidas nos programas experimentais I e II, encontram-se na Tabela 37 a seguir.

Tabela 37: Comparativo das densidades.

Traço	PE1	PE2
CBBA	2309,22	2323,19
CBBE	1766,45	1778,91
CBFA	1934,61	2079,74
CBFE	1676,24	1700,97
CBPA	2185,99	2190,71
CBPE	1611,32	1622,27

Não houve variação significativa nos valores das densidades entre os traços de mesma constituição em função da repetição do programa experimental, conforme pode ser observado pela Figura 49 a seguir.

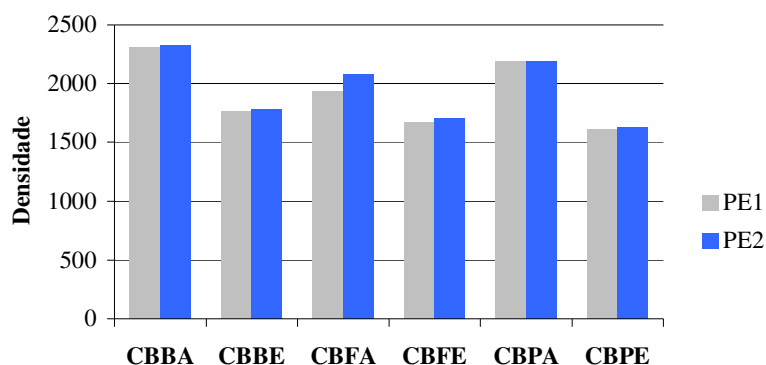


Figura 49: Histograma comparativo das densidades.

10.2 COMPARATIVO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_c

A Tabela 38 mostra os valores da resistência à compressão encontradas nos programas experimentais, onde novamente não houve variação significativa em razão da repetitividade do programa experimental. A Figura 50, mostra um histograma comparativo das resistências à compressão obtidas em PE1 e PE2.

Tabela 38: Comparativo de f_c (MPa).

Traço	PE1	PE2
CBBA	38,50	39,06
CBBE	5,70	6,57
CBFA	26,60	28,21
CBFE	3,30	4,67
CBPA	12,40	12,96
CBPE	4,00	5,17

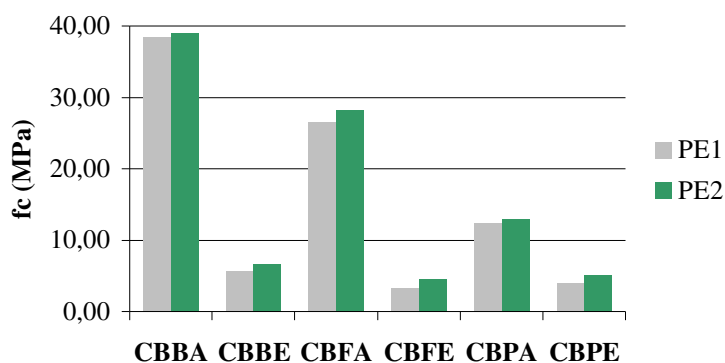


Figura 50: Histograma comparativo de f_c .

10.3 COMPARATIVO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO F_T

A Tabela 39 apresenta os valores encontrados nos ensaios de tração por compressão diametral (f_t), não havendo discrepância entre os resultados dos traços de mesma constituição. Os valores são representados na Figura 51 no histograma que se segue.

Tabela 39: Comparativo de f_t (MPa).

Traço	PE1	PE2
CBBA	3,47	3,51
CBBE	0,42	0,47
CBFA	2,68	2,72
CBFE	0,36	0,40
CBPA	1,31	1,34
CBPE	0,43	0,49

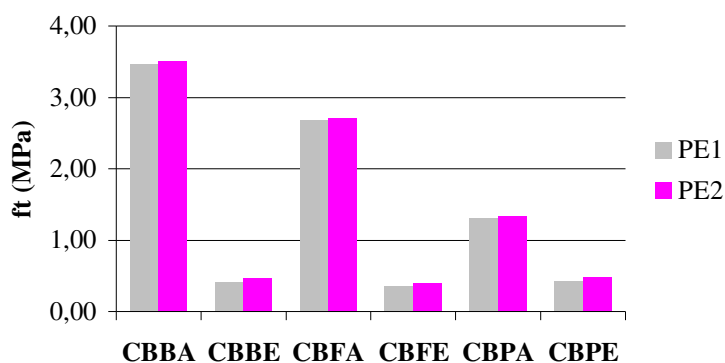


Figura 51: Histograma comparativo de f_t .

10.4 ENSAIO DE CONFORMAÇÃO SUPERFICIAL

10.4.1 Coeficiente de conformação superficial η

Na Tabela 40 a seguir constam os coeficientes de conformação superficial obtidos nos programas experimentais desta dissertação. Em seguida, a Figura 52 mostra a variação dos coeficientes de conformação superficial em função do traço.

Tabela 40: Coeficientes η .

Traço	PE1	PE2
CBBA	1,22	1,46
CBBE	1,39	1,71
CBFA	1,19	1,42
CBFE	1,55	1,96
CBPA	1,54	1,93
CBPE	1,46	1,82

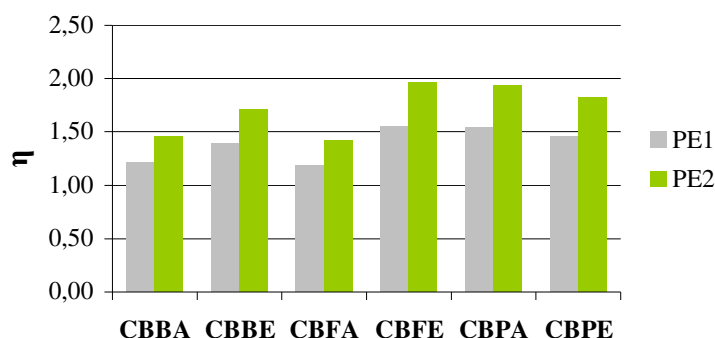


Figura 52: Histograma comparativo de η .

Cumpra esclarecer que a linha de grande que delimita o valor mínimo de $\eta = 1,5$ para barras com diâmetro de 10,0 mm, permite observar que para o referido parâmetro, os traços CBBA e CBFA dos programas experimentais encontram-se fora das especificações da NBR 7480.

10.4.2 Tensão média de aderência ($\tau_{m \text{ CASTRO}}$ em MPa)

A Tabela 41 mostram os valores das tensões de aderência segundo o modelo proposto por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA, 2001). Em seguida, é apresentado um histograma com o mesmo parâmetro, através da Figura 53, sendo notório a variação das tensões de aderência entre os traços confeccionados.

Tabela 41: Tensões médias de aderência ($\tau_{m \text{ CASTRO}}$ em MPa).

Traço	PE1	PE2
CBBA	4,60	5,45
CBBE	0,64	0,85
CBFA	3,13	4,11
CBFE	0,57	0,83
CBPA	1,92	2,75
CBPE	0,69	0,95

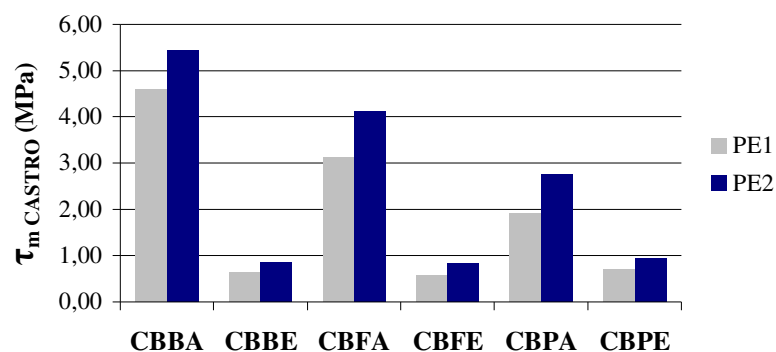


Figura 53: Histograma comparativo de τ_m CASTRO.

10.5 ENSAIO DE ARRANCAMENTO (T_{RMCEB})

As tensões médias de ruptura obtidas, são apresentadas na Tabela 42. Em seguida é mostrado um histograma com os resultados comparativos de PE1 e PE2.(Figura 54)

Tabela 42: Tensões médias de ruptura (τ_{RMCEB}).

Traço	PE1	PE2
CBBA	12,98	12,29
CBBE	1,10	0,84
CBFA	16,37	16,57
CBFE	1,27	1,17
CBPA	4,03	4,17
CBPE	1,48	1,47

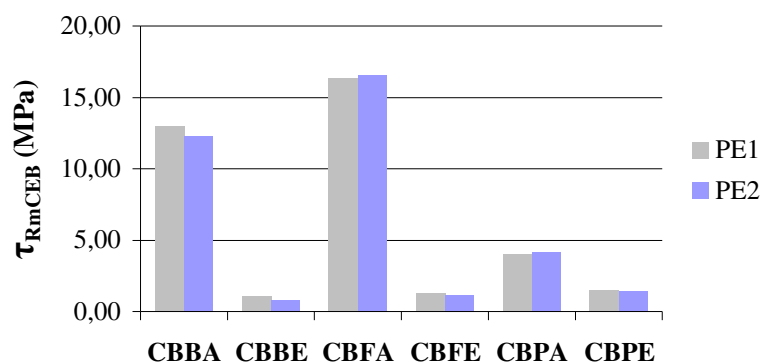


Figura 54: Histograma comparativo de τ_{RmCEB} .

10.6 TENSÃO DE ADERÊNCIA PROPOSTA PELA NBR 6118 ($T_{NBR\ 6118}$)

É também apresentado na Tabela 43, um comparativo das tensões de aderência obtidas através do modelo proposto pela NBR 6118.

Tabela 43: Tensões de aderência $\tau_{NBR\ 6118}$.

Traço	PE1	PE2
CBBA	7,81	7,90
CBBE	0,95	1,06
CBFA	6,03	6,12
CBFE	0,81	0,90
CBPA	2,95	3,02
CBPE	0,97	1,10

Em seguida, a Figura 55 mostra graficamente, os valores encontrados.

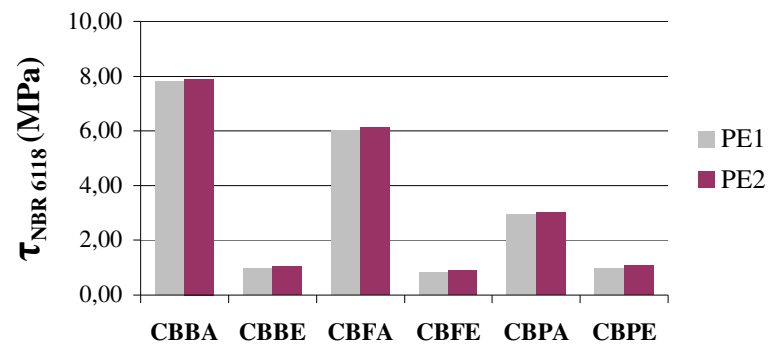


Figura 55: Histograma comparativo de $\tau_{\text{NBR 6118}}$.

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sem dúvida a aderência influencia o comportamento estrutural em muitos aspectos, desempenhando inclusive importante função no entendimento do mecanismo da fissuração no concreto.

O estudo da aderência entre o aço e o concreto é complexo, tendo em vista o número materiais envolvidos, tais como barras de armação em PRFV (plástico reforçado com fibras), concretos especiais, além de incorporação de resíduos provenientes de diversos setores da indústria, como, por exemplo, raspas de pneu, carvão vegetal, escória de aciaria, resíduos plásticos de indústria farmacêutica, utilizados em substituição total ou parcial de agregados tradicionalmente conhecidos.

No tocante ao desenvolvimento de materiais a partir de resíduos que venham a se apresentar como alternativa de utilização no mercado da construção civil, ambientalmente segura, do ponto de vista da viabilidade técnica e econômica, é importante salientar que isto demanda uma série de conhecimentos e estudos multidisciplinares. Estes devem envolver caracterizações físico-químicas dos resíduos, por meio de ensaios e métodos apropriados, fornecendo subsídios para a seleção e aproveitamento racional dos resíduos.

Existem vários estudos sobre a incorporação de resíduos ao concreto na construção civil. É um processo de pesquisa contínuo, porém, restrito até então, aos concretos tradicionais.

Este estudo, tem por finalidade contribuir para o avanço de pesquisas que envolvem a avaliação do desempenho da aderência em concretos leves, incluindo a incorporação de resíduos de raspa de pneu e resíduos plásticos oriundos da indústria farmacêutica. A seguir,

serão descritas algumas das principais conclusões obtidas, tomadas a partir dos resultados e análises estatísticas dos programas experimentais I e II desta dissertação.

11.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL I

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão (f_c), resistência à tração por compressão diametral F_t , módulo de deformação e as tensões de aderência, obtidas por meio dos ensaios de conformação superficial e arrancamento, apresentaram perdas significativas em função da adição do espumogen à mistura. Isto pode ser comprovado nos histogramas que constam no capítulo 10, bem como na análise estatística do anexo A desta dissertação.

Ao comparar os traços CBBA e CBBE, houve uma redução de 85,19% no valor da resistência à compressão em função da incorporação de espumogen à mistura. Em relação aos demais traços, ou seja, entre CBFA e CBFE ocorreu uma perda significativa de 87,59% e entre os traços CBPA e CBPE, a redução foi de 67,74% nos valores de F_c .

É importante ressaltar que o valor da resistência à compressão do traço executado com resíduo plástico de indústria farmacêutica e aditivo plastificante (CBFA), mostrou-se satisfatório, tendo em vista que em relação ao concreto bombeado (CBBA) com agregados convencionais a redução foi de 31%. Outra informação relevante é que este mesmo traço, com 20% do resíduo plástico de indústria farmacêutica em substituição à brita zero ($D_{\text{máx}} = 9,5$ mm), atende às recomendações de resistência à compressão mínima aos 28 dias estabelecidos pela NBR 6118 (20 MPa).

11.1.1 Ensaio de conformação superficial

Embora o traço CBFA apresentasse valor satisfatório quanto à resistência à compressão, o valor do coeficiente de conformação superficial η calculado foi de 1,39, que encontrou-se abaixo do mínimo estipulado pela NBR 7480 1,5 para barras de diâmetro $\Phi \geq 10,0$ mm.

Outra constatação relaciona-se com os valores das tensões de aderência, que se apresentaram inferiores nos casos onde foram utilizados espumogen e resíduos, equiparados aos traços executados com aditivo plastificante. O traço CBFE (resíduo plástico de indústria farmacêutica e espumogen), se destacou pelo menor valor apresentado, ou seja, 0,81 MPa.

11.1.2 Ensaio de arrancamento (pull out)

Em observação às recomendações do CEB RC 6, quanto aos valores mínimos de tensão de ruptura constantes no capítulo 7, item 7.3, foi observado que apenas os traços CBBA e CBFA enquadraram-se nos requisitos da norma.

Além disso, para os valores das tensões de ruptura referentes a este ensaio, todos os valores apresentaram-se superiores aos demais resultados para tensões de aderência em atenção aos modelos propostos pela NBR 6118 e CASTRO (2000, *apud* BARBOSA 2001).

Nos traços onde foram utilizados os espumogen, a tensão de ruptura do ensaio de arrancamento mostrou uma redução significativa de 91,52 % (entre CBBA e CBBE), 92,24% (entre CBFA e CBFE) e 63,27% (entre CBPA e CBPE).

11.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL II

A perda significativa nos valores das resistências à compressão F_c , dos traços envolvidos no programa experimental I foi confirmada no programa experimental II, para o caso dos concretos executados com espumogen. Além disso, não só os valores de F_c como também todos os outros parâmetros mencionados no item 11.1 (com exceção de do módulo de deformação), apresentaram redução significativa em seus valores. Com efeito, essas constatações podem ser devidamente verificadas nos histogramas do capítulo 10 e na análise estatística do anexo B.

De fato, a redução nos valores de F_c entre CBBA e CBBE foi de 83,17%, devido a adição do espumogen no segundo traço mencionado.

Dentre os traços executados com aditivo plastificante, é válido mencionar que o concreto executado com resíduo farmacêutico (CBFA – 28,21 MPa) não apresentou perda significativa na resistência à compressão (27%), em comparação ao concreto bombeado (CBBA – 39,06 MPa).

As mesmas características, porém, não foram observadas nos traços executados com resíduos de raspa de pneu e aditivo plastificante (CBPA). A redução da resistência à compressão, entre CBBA e CBPA foi de 66,82%.

11.2.1 Ensaio de conformação superficial

Embora os resultados da resistência à compressão do CBFA fossem significativos, é relevante destacar, em relação ao coeficiente de conformação superficial η , que o referido traço se apresentou fora das recomendações da NBR 7480, a qual especifica para barras de diâmetros nominais iguais ou superiores a 10,0 mm, um valor mínimo igual a 1,5. Isto pode ser justificado pelo tipo de resíduo incorporado, de natureza plástica, que poderia prejudicar a aderência.

O mesmo coeficiente η , também não se apresentou, para o traço CBBA, em conformidade com a referida norma, para barras com diâmetro $\geq 10,0$ mm, confirmando os resultados encontrados por BARBOSA (2001). Os demais traços, se apresentaram em conformidade com norma anteriormente citada.

Comparando os resultados das tensões médias de aderência obtidas no programa experimental desta dissertação, é evidente a redução da tensão de aderência nos traços executados com espumogen, independente do resíduo utilizado.

11.2.2 Ensaio de arrancamento (pull out)

As análises dos resultados obtidos experimentalmente no ensaio de arrancamento, permitiram observar que apenas CBBA e CBFA se encontram dentro das recomendações do CEB RC 6, para os valores das tensões média e de ruptura. Em contrapartida, os demais traços não atendem aos valores mínimos especificados pela referida norma.

Outra constatação seria que os valores das tensões médias de aderência do ensaio de arrancamento sobrepõe os resultados encontrados para tensões médias de aderência tanto do ensaio de conformação superficial por meio do modelo proposto por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA, 2001), como também os resultados obtidos por meio da NBR 6118.

11.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL I X PROGRAMA EXPERIMENTAL II

A repetição do programa experimental em função do número de corpos-de-prova, confirmou, mediante os resultados obtidos, redução nos valores de todos os ensaios em consequência da adição do espumogen. Com efeito, notou-se um decréscimo na resistência à compressão, resistência à tração, tensões de aderência média e de ruptura em todos os ensaios.

Para o ensaio de conformação superficial, pode ser observado que no programa experimental I, somente CBFE e CBPA se encontravam de acordo com as recomendações da NBR 7480, quanto ao valor do coeficiente η . Em contrapartida, no programa experimental II, não só foram confirmados os referidos traços, como também verificou-se que CBBE e CBPE apresentaram valores compatíveis com as determinações dessa mesma norma.

O programa experimental II, veio a sustentar o que foi afirmado no programa experimental I, à respeito dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento, haja visto que os valores apresentados foram superiores aos modelos propostos por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA, 2001) e pela NBR 6118. Outro ponto de relevância do programa experimental II foi possibilidade de serem obtidas as tensões médias de aderência.

11.4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os estudos subseqüentes necessitam focar as atenções à caracterização adequada dos resíduos sob vários aspectos, em busca de uma dosagem ideal, para uso estrutural em concretos. Vale a pena enfatizar que o fato de serem utilizados resíduos para o estudo do comportamento da aderência de concretos especiais, concorre para fortalecer as pesquisas sobre desenvolvimento sustentável na construção civil.

Ainda não é possível afirmar a viabilidade e/ou possibilidade de aplicação de concretos celulares, inclusive com adição de resíduos, para utilização estrutural. Diversas pesquisas precisam ser desenvolvidas até que se possa utilizar este tipo de concreto para esta finalidade.

Torna-se, sob este ponto de vista, necessário verificar a reprodutividade e repetitividade dos resultados obtidos e compará-los a outros resultados, onde sejam utilizadas diferentes porcentagens de resíduos. Além disso, sugere-se utilizar outros resíduos em concretos de diferentes características como também armaduras de diferentes tipos a fim de observar o comportamento dos dois materiais com relação à aderência.

Este estudo também buscou contribuir para que a normalização brasileira se engaje em normas que visem aplicação estrutural de concretos especiais, tal como o concreto celular. Os entraves são inúmeros, entretanto, as instituições de pesquisa devem ser fonte inesgotável de diversas possibilidades.

OBRAS CITADAS

AGOPYAN, Vahan. *A importância da pureza dos agregados para argamassas e concreto*. Iº Simpósio Nacional de Agregados. Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Instituto de pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1986. 273p.

ALVES, Ana Beatriz dos Santos. *Estudo do comprimento de ancoragem das barras de FRP*. Niterói, 1997. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 R – *Building code requirements for structural concrete and commentary*. 1995, 365p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 213 R – *Guide for structural lightweight aggregate concrete*. 1987, 25p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *Standard test method for comparing concretes on basis of the bond developed with reinforced steel, C 234*, philadelphia, 1986, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - *Manual Técnico Para Implementação – Habitação. Bairro Saudável. população Saudável*. São Paulo, 2002, 88p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto -procedimento*, Rio de Janeiro, 1994, 9p.

_____. *NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, 1994, 4p.

_____. *NBR 6118 –projeto de estruturas de concreto -procedimento*, Rio de Janeiro, 2003, 170p.

_____. *NBR 7211 – Agregado para Concreto - Especificação*, Rio de Janeiro, 1983. 5p.

_____. *NBR 7214 – Areia - Norma para ensaio de cimento*. Rio de Janeiro, 1982. 7p.

_____. *NBR 7222 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, 1993, 3p.

_____. *NBR 7477 – Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado – Método de ensaio*, 1982, 5p.

_____. *NBR 7480 – Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado*, Rio de Janeiro, 1996, 7p.

_____. *NBR 8522 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão- deformação*, Rio de Janeiro, 2003, 9p.

_____. *NBR 10004 – Resíduos sólidos - Classificação*, Rio de Janeiro, 1987. 48p.

_____. *EB-230 – Agregados leves para concreto estrutural*, Rio de Janeiro, 1969

ALMEIDA, Ivan Ramalho de. *Influência dos agregados na qualidade dos concretos de alto desempenho*. Ibracon, São Paulo: Ibracon, ano IV, n. 9, p.36-41, ago/set. 1994.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes. *Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência*. Rio de Janeiro, 2001. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001.

CAMPOS JÚNIOR, Eurico Elesbão Teixeira de. *Um estudo do composto de argamassa de cimento com raspa de pneu*. Niterói. 1993. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Fluminense, Niterói, 1993.

CARVALHO, Marcos Funchal Nunes de. *Comprimento de emenda por traspasse da armadura de flexão em vigas de concreto de alta resistência*. Campinas, 2002. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2002.

CASTRO, Clayton Moreira de. *Concreto de alto desempenho: Estudo da aderência com armadura sob ações repetidas*. São Carlos, 2002. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB – FIP. *Manual of Lightweight aggregate concrete, design and technology*. New York, Longman Inc New York, 1977. 168p.

_____. *CEB – FIP Model Code 1990*. Switzerland, Thomas Telford, 1993. 437p.

COMITÉ EURO- INTERNATIONAL DU BÉTON, *Recommendation RC 5: Bond Test for Reinforcing Steel – Beam Test*, 1983.

_____. *Recommendation RC 6: Bond test for reinforcement steel – Pull Out Test*, 1983.

CUNHA, Aimar G.; NEUMANN, Walter. *Impermeabilização e isolamento térmico: materiais e especificações*. 2 ed. Rio de Janeiro. 2001, 147p.

DUCATTI E AGOPYAN. *Aderência do concreto de elevado desempenho à armadura*. Florianópolis, SC. 1996.p.342-353. In:proceedings of the International Congress on High-performance Concrete, and performance and Quality of Concrete Structures, Florianópolis.

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

FERNANDES, Rejane Martins; EL DEBS, Ana Lúcia H. de Cresce. *A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto*. São Paulo, 2000. 20p. In: Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo. 2000

FRANÇA, Valério Henrique. *Aderência Aço – Concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha*. Ilha Solteira, 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual paulista: Júlio Mesquita Filho. Ilha Solteira, 2004

FREITAS, Itamar Freitas De.*produção e propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso*. Niterói, 2004, 194p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Fluminense, Rio de Janeiro, 2004.

FUSCO, Péricles Brasiliense. *Técnica de Armar as Estruturas de Concreto*. São Paulo:PINI, 2003. 378p.

GULLEURD, Karl; CRAMER, Steven. *Effects of aggregates coatings and films on concrete performance – Final Report*. WISCONSIN HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. University of Wisconsin: Department of Civil and Environmental Engineering. Madison, September 2002, 75p.

HOLM, Thomas A.; VAYSBURD, A. M. *Durability of lightweight concrete and its connections with the composition of concrete, design and construction methods*. ACI – SP 136. 1992.

HUYNH, H.; RAGHANVAN, D.. *Workability, Mechanical Properties, and chemical stability of recycled tyre rubber- filled cementitious composite*. Journal of Materials Science, n. 33, 1998, 8p.

KAYALI, O.; HAQUE, M. N. ; AL-KHAIAT, H.. *Strength and durability of lightweight concrete*. Cement & Concrete Composities nº 25 february 2003. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em 04/04/2005.

LARANJEIRAS, A C.R. *O cálculo à fadiga segundo a norma modelo CEB-FIP 1990. Tema VII do ciclo de palestras para a discussão da norma modelo CEB-FIP 1990* Rio de Janeiro, 1991.

LEONHARDT, F., MONNING E. *Construções de Concreto*. Trad.: João Merino. Rio de Janeiro. Ed. Interciência, 1979, 6v.

LO, T. Y; CUI, H. Z.. *Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete*. Materials Letters, n. 58, july 2003. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em 20/07/2005.

MATTOS, Marcos Paulo C., *Aplicação sustentável de materiais alternativos em blocos de concreto celular*. Niterói, 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.

MOURA, Washington Almeida., *Um estudo da influência de inibidores de corrosão na aderência aço-concreto*. Niterói, 1991. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1991.

NEVILLE, Adam. M. *propriedades do Concreto*. 2 ed. Ver.; PINI. Tradução: Eng.^{os} A. O. Bassoli e M.C. Bassoli. São Paulo. 1997.

NETO J. M. Al-Akhras, MOHAMMED M. Smadi. *Properties of tire rubber ash mortar*. Cement & Concrete Composites, elsevier.; accepted 5 January 2004. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em 22/07/2005.

NIRSCHIL, Gustavo Cabrelli; AKASAKI, Jorge Luís; FIORITI, César Fabiano. *Estudo da dosagem do concreto contendo fibras de borracha vulcanizada, provenientes da indústria de recauchutagem de pneus*. V CONGRESSO EM ENGENHARIA CIVIL. Anais , Juiz de Fora, 2002, 9p.

OLIVEIRA, Thais Mayra de. *Rejeitos plásticos: um estudo do potencial de aplicação na construção civil*. Niterói. 2002. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Fluminense, Niterói, 2002.

PETRUCCI, Eladio G. R. Petrucci. *Concreto de Cimento Portland*. 13 ed. São Paulo: Globo, 1995. 307p.

PIERCE, C. E.; BLACKWELL, M.C. *Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill*. Waste Management, n. 53, october 2002. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em 20/07/2005.

PIERRE-CLAUDE AITCIN. *Concreto de Alto Desempenho*. 1 ed. Ver.; PINI. Tradução: Geraldo G. Serra. São Paulo. 2000.

RIBEIRO, José Homero Mancebo. *Contribuição ao estudo do módulo de elasticidade do concreto de cimento portland*. Niterói, 2000, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2000.

SÁNCHEZ, Emil. *Nova normalização brasileira para o concreto estrutural*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1999. 331p.

SANTOS, Antônio Carlos do; BARBOZA, Aline da Silva Ramos; GOMES, Paulo César Correia; LIMA, Flávio Barboza de. *Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus para aplicação em elementos pré-moldados*. I^a CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais, São Paulo, 2004, 12p.

SOBRAL, HERNANI SÁVIO. *Concretos leves e comportamento estrutural*. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1987. 46p.

VALVERDE, Fernando Mendes. *Agregados para a construção civil*. Balanço Mineral Brasileiro, 2001. 15p.

VIEIRA, Fernanda Macedo Pereira. *Estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microssílica*. porto Alegre, 1994. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. porto Alegre, 1994.

WATSTEIN, D.. *Bond stress in concrete pull-out specimens*, ACI Journal, v 38, sept, p.37-50, 1941.

WEIGLER, HELMUT; KARL, Sieghart. *Hormigones ligeros armados*. Editorial Gustavo Gili S.A., 1974, 261p.

OBRAS CONSULTADAS

AHMED, T.; BURLEY, E.; RIGDEN S. Effect of alkali-silica reaction on tensile bond strength of reinforcement in concrete tested under static and fatigue loading. ACI materials journal, 1999.v 96, n. 4. p.419-428.

AVRAM, Constantin; FĂCĂOARU, Ioan; FILIMON, Ion; MÎRSU, Ovidiu; TERTEA, Igor. Concrete strength and strains: Developments in civil engineering. Elsevier Scientific Publishing Company, 553p, v.3. New York1981.

CASTRO, Protasio Ferreira e., Contribuição ao desenvolvimento da avaliação da resistência do concreto-nova técnica de ensaio de arrancamento. Niterói, 1981. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1981.

_____. An expandable sleeve test for assessing concrete strength. London, 1985. Doctor of Philosophy. University College London, London, 1985.

CHANG Ta-Peng.; SHIEH, Mei-Miao. Fracture properties of lightweight concrete. Cement and concrete research, 1996. v.26, n.2. p.181-188. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em 06/05/2005.

COLVILLE, James; MADE, Made M.; MILTENBERGER, M.. Tensile bond strength of polymer modified mortar. Journal of Materials in civil engineering. American Society of Civil Engineers – Materials Engineering Division, 1999. v.11. n.1. p.1-14.

HAQUE, Naseer; AL- KHAIAT, Husain. Strength and durability of lightweight and normal weight concrete. Journal of Materials in civil engineering. American society of Civil Engineers – Materials Engineering Division, 1999. v.11 n.3. p.231-235.

ICHINOSE. T.; KANYAMA Y.; INOUE Y.; JR BOLANDER, J.E.. Size effect on bond strength of deformed bars. Construction and building materials, 2004. v.18, p.549-558. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em 16/04/2005.

KHALOO, A.R.; KIM, N. Effect of curing condition on strength and elastic modulus of lightweight high- strength concrete. ACI materials journal, 1999. v.96, n.4. p.485-490

NEVILLE. A. M. Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete. ACI materials journal, 1997.v. 94. n. 1. p.71-74.

PEREIRA, Diegles Simões de Toledo. Caracterização e análise do polímero pi (tereftalato de etileno) e suas diversas aplicações na construção civil. Rio de Janeiro, 2004. Monografia. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

PIRES, Eliane C., Comportamento do concreto utilizando o rejeito do processo de jateamento de peças metálicas recém-forjadas. Niterói, 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2001.

RIBEIRO, Celma Solange C., A potencialidade do uso do rejeito de carvão vegetal em artefatos de concreto. Niterói, 2002. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2002.

TRENDE, Uwe; BÜYÜKÖZTÜRK, Oral. Size effect and influence of aggregate roughness in interface fracture of concrete composites. ACI materials journal, 1998. v 95. n. 4. p.331-338.

WALKER, P. Bond Characteristics of Earth Bolck Masonry. Journal of Materials in civil engineering. American society of Civil Engineers – Materials Engineering Division, 1999. v 11. n. 3. p.249-256.

ANEXO A: PROGRAMA EXPERIMENTAL I - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A.1 RESUMO DOS RESULTADOS

Tendo em vista os resultados encontrados no programa experimental I, segue-se um resumo dos valores dos ensaios, para melhor entendimento da análise estatística realizada.

Tabela 44: Ensaios de caracterização do concreto.

Traços	Resistência à compressão f_c (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral f_t (MPa)	Relação A/C
CBBA	38,5	3,47	0,61
CBBE	5,7	0,42	0,61
CBFA	26,6	2,68	0,61
CBFE	3,3	0,36	0,61
CBPA	12,4	1,31	0,61
CBPE	4	0,43	0,61

Tabela 45: Distância média entre fissuras (cm) e coeficientes de conformação superficial.

Traço	X1	X2	XM	Desvio Padrão	CV (%)	η
CBBA	9,01	9,38	9,2	0,262	2,85	1,22
CBBE	7,8	8,35	8,08	0,389	4,82	1,39
CBFA	10,24	8,63	9,44	1,138	12,07	1,19
CBFE	7,57	6,93	7,25	0,453	6,24	1,55
CBPA	8,14	6,47	7,31	1,181	16,17	1,54
CBPE	7,46	7,93	7,7	0,332	4,32	1,46

Tabela 46: Tensões médias de aderência segundo CASTRO (2000).

Traço	τ_m CASTRO (MPa)
CBBA	4,6
CBBE	0,64
CBFA	3,13
CBFE	0,57
CBPA	1,92
CBPE	0,69

Tabela 47: Tensão de aderência segundo a NBR 6118 (MPa).

Traço	$\tau_{NBR\ 6118}$ (MPa)
CBBA	7,81
CBBE	0,95
CBFA	6,03
CBFE	0,81
CBPA	2,95
CBPE	0,97

Tabela 48: Tensão média de ruptura pelo CEB RC 6 ($\tau_{Rm\ CEB}$).

Traço	$\tau_{Rm\ CEB}$ (MPa)
CBBA	12,98
CBBE	1,10
CBFA	16,37
CBFE	1,27
CBPA	4,03
CBPE	1,48

Tabela 49: Módulos de deformação.

Traço	E_{ENSAIO} (GPa)
CBBA	26,2
CBBE	7,20
CBFA	20,6
CBFE	4,90
CBPA	13,6
CBPE	6,50

A.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No intuito de definir qual o melhor modelo estatístico aplicável aos resultados, procedeu-se a análise estatística dos valores encontrados nos ensaios.

A.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_c ENTRE OS CONCRETOS LEVE E BOMBEADO:

Utilizando-se a ferramenta anova: fator único, objetivou-se, nesta análise, constatar a influencia do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) incorporado ao concreto nos resultados da resistência à compressão dos corpos-de-prova ensaiados aos 28 dias.

Anova: fator único.

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
ESP	3	13	4,333333	1,523333
PLAST	3	77,5	25,83333	170,7433

ANOVA.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	693,375	1	693,375	8,050019	0,046998	7,708647
Dentro dos grupos	344,5333	4	86,13333			
Total	1037,908	5				

Verificou-se a influência significativa do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) nos valores da resistência à compressão, tendo em vista que os resultados mostraram que F de observação é superior aos resultados de F crítico, conforme esperado.

A.2.2 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T ENTRE OS CONCRETOS LEVE E BOMBEADO

Utilizando-se a mesma ferramenta anova: fator único, da análise da resistência à compressão anterior buscou-se, constatar a influencia do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) incorporado ao concreto nos resultados da resistência à tração por compressão diametral em corpos-de-prova com idade de 28 dias.

Anova: fator único.

RESUMO.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
ESP	3	1,21	0,403333	0,001433
PLAS	3	7,46	2,486667	1,194433

ANOVA.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,510417		16,510417	10,8882	0,029941	7,708647
Dentro dos grupos	2,391733		40,597933			
Total	8,90215	5				

Verificou-se a influência significativa do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) nos valores da resistência à tração por compressão diametral, tendo em vista que os resultados mostraram que F de observação é superior aos resultados de $F_{crítico}$, conforme esperado.

A.2.3 ANÁLISE DA RELAÇÃO F_T/F_C

A NBR 6118 no item 8.2.5 permite que seja feita uma correlação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão do concreto, segundo a equação:

$$f_t = \frac{1}{3} f_c^{\frac{2}{3}} \quad (21)$$

Nesta relação utilizando-se o fator anova fator único, buscou-se verificar novamente a influencia do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) nos resultados.

Tabela 50: Relação f_t/f_c (%).

Tipo de agregado	Esp	Plast
Brita (100%)	7,37	9,01
Res. Farm. (20%)	10,91	10,08
Res. raspa de pneu (20%)	10,75	10,56

Anova: fator único.

RESUMO.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Esp	3	29,02751	9,675837	3,999455
Plast	3	29,65269	9,88423	0,629159

ANOVA.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,065141		10,065141	0,028147	0,874904	7,708647
Dentro dos grupos	9,257228		42,314307			
Total	9,32237	5				

Foi verificado, conforme esperado, a não influência no valor dos resultados, tendo em vista que o valor de F é menor que o valor de F crítico.

A.2.4 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE F_T E F_C

Com a correlação entre f_t e f_c sugerida pela NBR 6118 (equação (21)), foi obtida uma curva de formato polinomial que melhor ajustou-se à correlação proposta, tendo em vista o

valor de R^2 que foi o maior encontrado dentre todas as tentativas. Em seguida, procurou-se inserir os valores de f_c e f_t encontrados nos ensaios na curva, conforme mostrado a Figura 56.

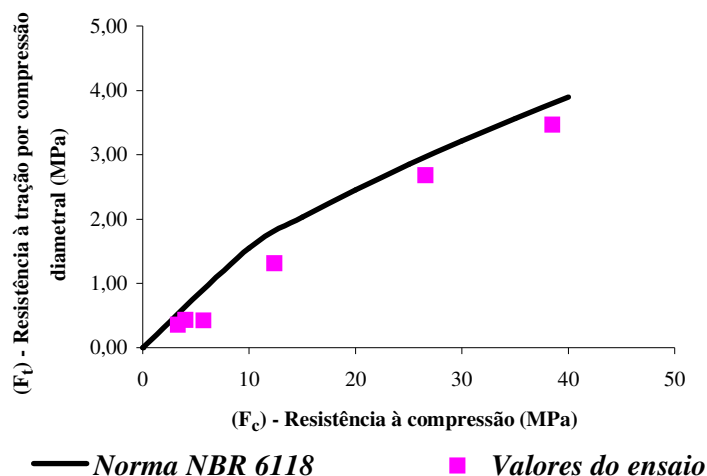


Figura 56: Correlação entre f_c e f_t .

Foi realizada uma regressão linear dos resultados encontrados, com obtenção de uma curva, que não foi obtida por mero acaso, haja visto que o valor de F de foi maior que o F crítico.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,998866
R-Quadrado	0,997734
R-quadrado ajustado	0,747168
Erro padrão	0,110178
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão		221,38174284	10,69087	880,6834	7,0113E-05
Resíduo		40,048557161	0,012139		
Total		621,4303			

A.2.5 ANÁLISE DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Procedeu-se a análise estatística dos resultados dos módulos de deformação dos concretos leve (CBBE, CBFE, CBPE) e bombeado (CBBA, CBFA, CBPA), ensaiados aos 28 dias de idade.

Procurou-se por meio da ferramenta anova: fator duplo sem repetição, verificar a influência significativa do tipo de agregado (brita e substituição parcial da brita por raspa de pneu e resíduo farmacêutico) nos valores encontrados para os módulos de deformação, bem como a influência da forma de cálculo proposta pela NBR 6118 e os valores reais encontrados no ensaio.

Tabela 51: Módulo de deformação $E_{\text{NBR 6118}}$ X E_{ENSAIO} .

Traços	$E_{\text{NBR 6118}}$ (GPa)	E_{ENSAIO} (GPa)
CBBA	34,74	26,2
CBFA	28,88	20,6
CBPA	19,72	13,6

Anova: fator duplo sem repetição.

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CBBA		260,94709	30,47354	36,52634
CBFA		249,48211	24,74105	34,29663
CBPA		233,31963	16,65982	18,72497
E (NBR 6118)		383,34883	27,78294	57,36219
E (ensaio)		360,4	20,13333	39,85333

ANOVA.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Linhas	192,6579		296,32894	108,6517	0,00912	19
Colunas	87,77477		187,77477	99,00329	0,00995	18,51282
Erro	1,773169		20,886584			
Total	282,2058	5				

Constatou-se, em ambos os casos, a influência significativa nos resultados, pois na primeira verificação (entre linhas) F é maior que F crítico. Do mesmo modo apresenta-se para

as colunas a influência significativa da forma de cálculo proposta pela NBR 6118 e os valores reais encontrados no ensaio, tendo em vista que F é maior que F crítico.

Como complementação foi verificada a influência do tipo de aditivo (espumogen e plastificante) nos resultados dos módulos de deformação, tendo-se encontrado F maior que F crítico, confirmando que de fato existe uma influencia significativa.

Tabela 52: Módulo de deformação E_{ESP} . x E_{PLAST} .

E_{ESP} (GPa)	E_{PLAST} (GPa)
7,2	26,2
4,9	20,6
6,5	13,6

Anova: fator único.

RESUMO.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Espumogen	3	18,6	6,2	1,39
Plastif	3	60,4	20,13333	39,85333

ANOVA.

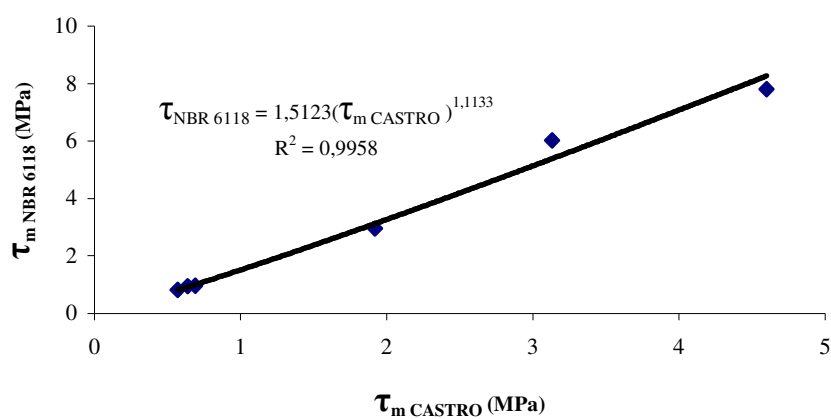
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	291,2067		1291,2067	14,12139	0,019812	7,708647
Dentro dos grupos	82,48667		420,62167			
Total	373,6933	5				

A.2.6 ANÁLISE DAS TENSÕES DE ADERÊNCIA: $T_{M \text{ CASTRO}}$ X $T_{NBR 6118}$

Realizou-se uma regressão linear no intuito de obter a melhor curva que se ajustasse aos valores encontrados para as tensões de aderência ao modelo proposto por CASTRO (2000) e ao modelo proposto pela NBR 6118, tendo sido encontrada, conforme a curva mostrada na Figura 57.

Tabela 53: $\tau_{m \text{ CASTRO}} \times \tau_{\text{NBR 6118}}$.

Traço	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)	$\tau_{\text{NBR 6118}}$ (MPa)
CBBA	4,6	7,8
CBBE	0,6	1,0
CBFA	3,1	6,0
CBFE	0,6	0,8
CBPA	1,9	3,0
CBPE	0,7	1,0

Figura 57: Tensões de aderência $\tau_{m \text{ CASTRO}} \times \tau_{\text{NBR 6118}}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,997897
R-Quadrado	0,9957984
R-quadrado ajustado	0,994748
Erro padrão	0,0317267
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	0,954252	0,954252	948,0095	6,62946E-06
Resíduo	4	0,004026	0,001007		
Total	5	0,958278			

Ressalta-se que essa curva não foi obtida por mero acaso, tendo em vista que F se mostrou superior à F crítico na estatística de regressão.

A.2.7 ANÁLISE DAS TENSÕES DE ADERÊNCIA: $T_{M \text{ CASTRO}} \times T_{NBR \ 6118} \times T_{RM \ CEB}$

A análise estatística utilizando-se o fator anova: fator único mostrou que entre os resultados das tensões de aderência encontrados de acordo com os três modelos, não há influência significativa na forma de cálculo das tensões, pois o valor do F se mostrou inferior ao valor de F crítico.

Tabela 54: $\tau_{m \text{ CASTRO}} \times \tau_{NBR \ 6118} \times \tau_{Rm \ CEB}$.

Traço	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)	$\tau_{NBR \ 6118}$ (MPa)	$\tau_{Rm \ CEB}$ (MPa)
CBBA	4,6	7,81	12,98
CBBE	0,64	0,95	1,10
CBFA	3,13	6,03	16,37
CBFE	0,57	0,81	1,27
CBPA	1,92	2,95	4,03
CBPE	0,69	0,97	1,48

Anova: fator único.

RESUMO.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	6	11,55	1,925	2,72403
Coluna 2	6	19,52	3,253333	9,010787
Coluna 3	6	37,23901	6,206502	45,33037

ANOVA.

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	57,633872	2	28,81694	1,514948	0,25161419	3,682316674
Dentro dos grupos	285,32591	15	19,02173			
Total	342,95978	17				

A.2.8 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA: $T_{m \text{ CASTRO}}$ X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_c .

Ao se estabelecer uma correlação gráfica entre os valores da resistência à compressão e os valores da tensão de aderência encontrados segundo o modelo proposto por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA 2001), verificou-se que a melhor curva é a linear.

Tabela 55: f_c x $\tau_{m \text{ CASTRO}}$.

Traço	f_c (MPa)	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)
CBBA	38,50	4,6
CBBE	5,70	0,64
CBFA	26,60	3,13
CBFE	3,30	0,57
CBPA	12,40	1,92
CBPE	4,00	0,69

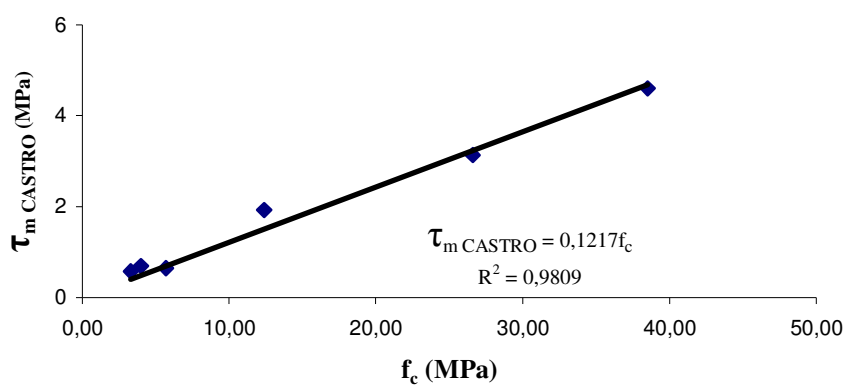


Figura 58: Resistência à compressão f_c x $\tau_{m \text{ CASTRO}}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,994496
R-Quadrado	0,989023
R-quadrado ajustado	0,986279
Erro padrão	0,193333
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
			13,4706393		
Regressão	1	13,47064	2	360,3926992	4,53532E-05
Resíduo	4	0,149511	0,03737767		
Total	5	13,62015			

Em busca de confirmação dos resultados, sobre a conveniência da curva encontrada, procedeu-se à uma regressão linear, sendo confirmado por meio dos valores de F e F crítico, que a curva não foi obtida por mero acaso, pois o primeiro valor sobrepõe-se ao segundo.

A.2.9 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA: $T_{M \text{ CASTRO}}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T

Foi estabelecida graficamente uma correlação entre os valores resistência à tração por compressão diametral e os valores da tensão de aderência encontrados segundo o modelo proposto por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA, 2001), na qual verificou-se que a melhor curva é a linear.

Tabela 56: f_t x $\tau_{m \text{ CASTRO}}$.

Traço	f_t	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)
CBBA	3,47	4,6
CBBE	0,42	0,64
CBFA	2,68	3,13
CBFE	0,36	0,57
CBPA	1,31	1,92
CBPE	0,43	0,69

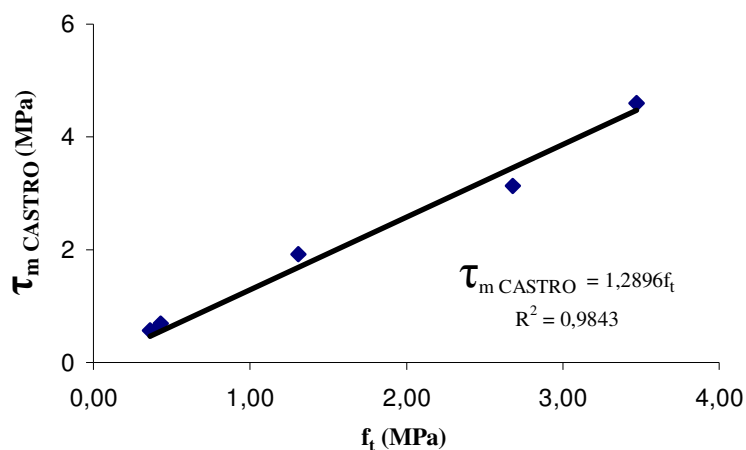


Figura 59: Resistência à tração por compressão diametral f_t x $\tau_{m \text{ CASTRO}}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,99412
R-Quadrado	0,988275
R-quadrado ajustado	0,985344
Erro padrão	0,199812
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	13,46045	13,46045134	337,1462578	5,17577E-05
Resíduo	4	0,159699	0,039924665		
Total	5	13,62015			

Observou-se que a curva obtida não foi por mero acaso, tendo em vista que o valor de F é maior que F de significação.

A.2.10 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{M \text{ CASTRO}}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_C .

Procedendo-se a uma análise estatística por regressão linear para esses três parâmetros, foi verificado que a curva obtida não foi por mero acaso, já que F se mostrou superior a F crítico.

Tabela 57: $f_c \times f_t \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$.

Traço	f_c	f_t	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)
CBBA	38,50	3,47	4,6
CBBE	5,70	0,42	0,64
CBFA	26,60	2,68	3,13
CBFE	3,30	0,36	0,57
CBPA	12,40	1,31	1,92
CBPE	4,00	0,43	0,69

A.2.11 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{NBR \ 6118}$ X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_C .

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,995524
R-Quadrado	0,991068
R-quadrado ajustado	0,985113
Erro padrão	0,201377
Observações	6

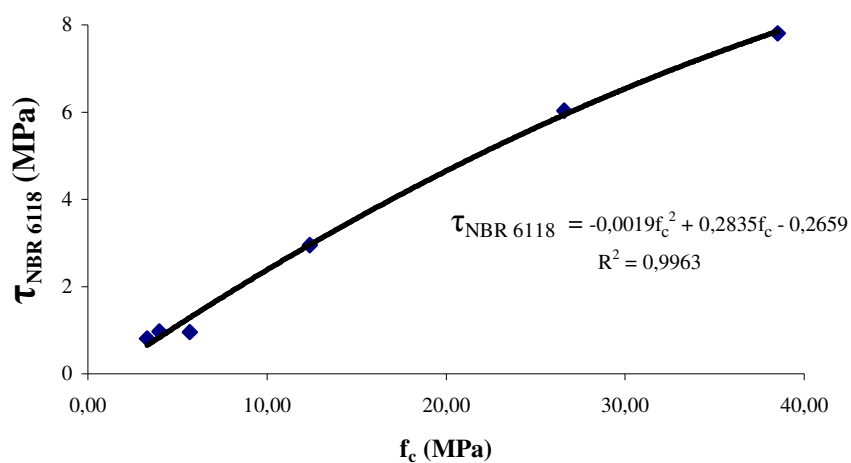
ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	13,49849	6,749246	166,4322666	0,000844181
Resíduo	3	0,121658	0,040553		
Total	5	13,62015			

Ao estabelecer uma correlação gráfica entre os valores da resistência à compressão e os valores da tensão de aderência encontrados segundo o modelo proposto pela NBR 6118, verificou-se que a melhor curva é a polinomial, conforme mostrado a seguir:

Tabela 58: $f_c \times \tau_{\text{NBR 6118}}$.

Traço	f_c (MPa)	$\tau_{\text{NBR 6118}}$
CBBA	38,50	7,81
CBBE	5,70	0,95
CBFA	26,60	6,03
CBFE	3,30	0,81
CBPA	12,40	2,95
CBPE	4,00	0,97

Figura 60: Resistência à compressão (f_c) X $\tau_{\text{NBR 6118}}$.

Em busca de confirmação dos resultados, sobre a casualidade da curva encontrada, procedeu-se à uma regressão linear, sendo confirmado por meio dos valores de F e F crítico, que a curva não foi obtida por mero acaso, pois o primeiro valor sobrepõe o segundo.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,998134
R-Quadrado	0,996271
R-quadrado ajustado	0,993785
Erro padrão	0,236641
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	44,8859422	44,44297	400,7745221	0,000227695
Resíduo	3	0,1679970	0,055999		
Total	5	45,05393			

A.2.12 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{\text{NBR 6118}}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T

Graficamente, estabeleceu-se uma correlação entre os valores resistência à tração por compressão diametral e os valores da tensão de aderência encontrados segundo o modelo proposto pela norma NBR 6118, na qual verificou-se que a melhor curva é a linear.

Tabela 59: f_t x $\tau_{\text{NBR 6118}}$.

Traço	F_t (MPa)	$\tau_{\text{NBR 6118}}$ (MPa)
CBBA	3,47	7,81
CBBE	0,42	0,95
CBFA	2,68	6,03
CBFE	0,36	0,81
CBPA	1,31	2,95
CBPE	0,43	0,97

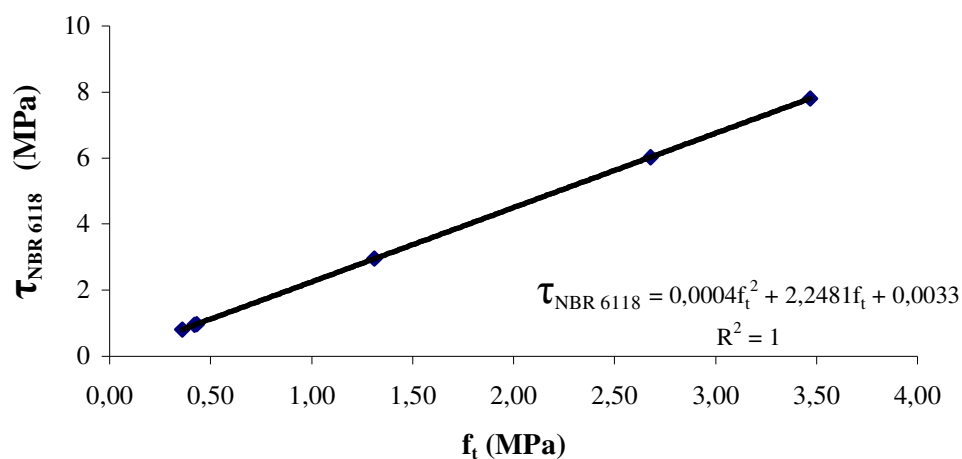


Figura 61: Resistência à tração por compressão diametral f_t x $\tau_{NBR\ 6118}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	1
R-Quadrado	1
R-quadrado ajustado	0,999999
Erro padrão	0,002307
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	45,05392	22,52696	4231141,306	2,11082E-10
Resíduo	3	1,6E-05	5,32E-06		
Total	5	45,05393			

Observou-se que a curva obtida não foi por mero acaso, tendo em vista que o valor de F é maior que f de significação.

A.2.13 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{NBR\ 6118}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_C

Realizou-se regressão linear tendo em vista estes três parâmetros, a fim de verificar a mera casualidade ou não na correlação entre eles.

Tabela 60: $f_c \times f_t \times \tau_{\text{NBR 6118}}$.

Traço	f_c (MPa)	f_t (MPa)	$\tau_{\text{NBR 6118}}$ (MPa)
CBBA	38,50	3,47	7,81
CBBE	5,70	0,42	0,95
CBFA	26,60	2,68	6,03
CBFE	3,30	0,36	0,81
CBPA	12,40	1,31	2,95
CBPE	4,00	0,43	0,97

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	1
R-Quadrado	1
R-quadrado ajustado	1
Erro padrão	0,00174
Observações	6

ANOVA.

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	45,05392	22,52696	7442999	9,04721E-11
Resíduo	3	9,08E-06	3,03E-06		
Total	5	45,05393			

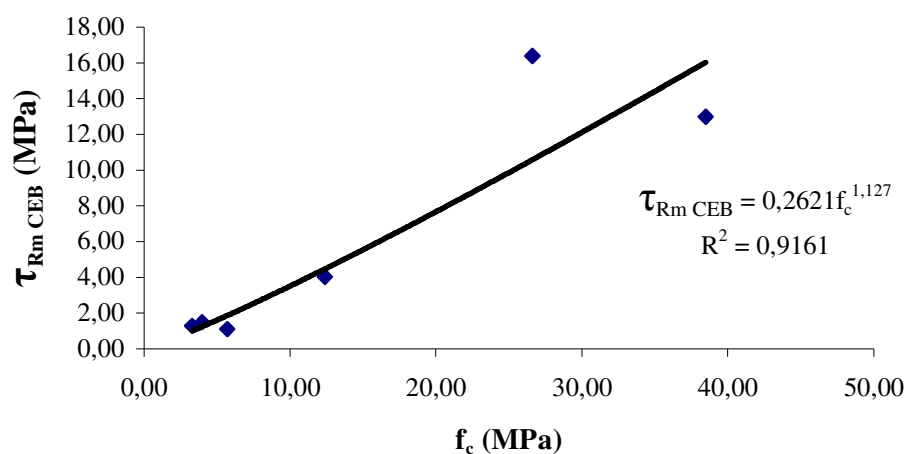
Vê-se através dos resultados de F e F crítico que a correlação entre os parâmetros anteriormente mencionados não foi obtida por mera casualidade, haja visto que o primeiro sobrepõe o valor do segundo.

A.2.14 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{\text{RM CEB}}$ X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_c

Foi estabelecida, graficamente, uma correlação entre os valores resistência à compressão e os valores da tensão de aderência encontrados segundo o modelo proposto pelo CEB, conforme mostrado a seguir:

Tabela 61: $f_c \times \tau_{Rm\ CEB}$.

Traço	f_c (MPa)	$\tau_{Rm\ CEB}$ (MPa)
CBBA	38,50	12,98
CBBE	5,70	1,10
CBFA	26,60	16,37
CBFE	3,30	1,27
CBPA	12,40	4,03
CBPE	4,00	1,48

Figura 62: Resistência à compressão $f_c \times \tau_{Rm\ CEB}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,957131
R-Quadrado	0,916099
R-quadrado ajustado	0,895124
Erro padrão	0,168963
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de</i> <i>significação</i>
Regressão	1	1,246864	1,246864	43,67522	0,002717
Resíduo	4	0,114194	0,028549		
Total	5	1,361058			

Tendo em vista que o valor de F é superior ao valor de F de significação, tem-se que a curva não foi obtida por mero acaso.

A.2.15 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $\tau_{RM\ CEB}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL f_t

Estabeleceu-se, graficamente, uma correlação entre os valores resistência à compressão e os valores da tensão de aderência encontrados segundo o modelo proposto pelo CEB, conforme mostrado a seguir:

Tabela 62: f_t x $\tau_{RM\ CEB}$.

Traço	f_t (MPa)	$\tau_{RM\ CEB}$ (MPa)
CBBA	3,47	12,98
CBBE	0,42	1,10
CBFA	2,68	16,37
CBFE	0,36	1,27
CBPA	1,31	4,03
CBPE	0,43	1,48

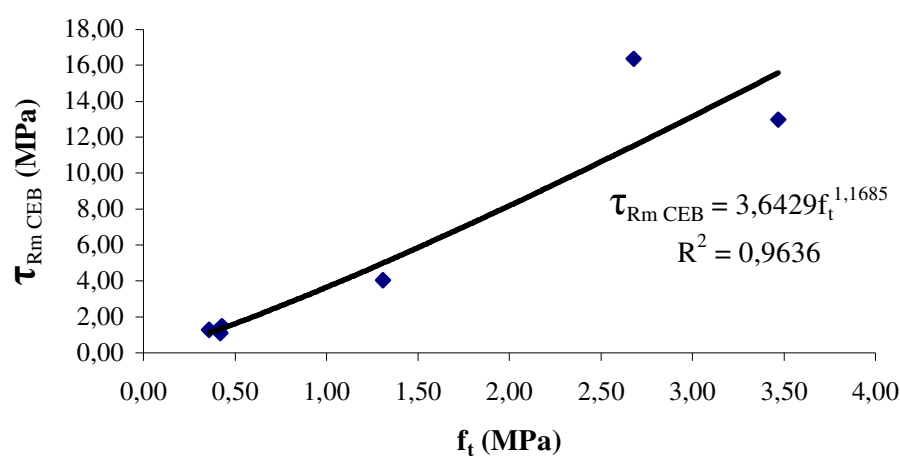


Figura 63: Resistência à tração por compressão diametral f_t x $\tau_{RM\ CEB}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,981628
R-Quadrado	0,963593
R-quadrado ajustado	0,954491
Erro padrão	0,111302
Observações	6

ANOVA.

	<i>glSQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	11,311506	1,311506	105,8684	0,000503215
Resíduo	40,049552	0,012388		
Total	51,361058			

A curva não foi obtida por mero acaso, tendo em vista que o valor de F é maior que o valor de F crítico.

A.2.16 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{RM\ CEB}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_C

Procedeu-se, graficamente, a uma correlação entre os valores resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão e os valores da tensão de aderência encontrados segundo o modelo proposto pelo CEB, conforme mostrado a seguir:

Tabela 63: $f_c \times f_t \times \tau_{RM\ CEB}$.

Traço	f_c (MPa)	f_t (MPa)	$\tau_{RM\ CEB}$ (MPa)
CBBA	38,50	3,47	12,98
CBBE	5,70	0,42	1,10
CBFA	26,60	2,68	16,37
CBFE	3,30	0,36	1,27
CBPA	12,40	1,31	4,03
CBPE	4,00	0,43	1,48

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,981628
R-Quadrado	0,963593
R-quadrado ajustado	0,954491
Erro padrão	0,111302
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão		11,311506	1,311506	105,8684	0,000503215
Resíduo		40,049552	0,012388		
Total		51,361058			

A correlação entre os três parâmetros não foi obtida por mero acaso, pois o valor de F é superior a F crítico.

A.3 GRÁFICOS TENSÃO $\bar{T}$ X DESLOCAMENTO s

A.3.1 Gráfico CBBA

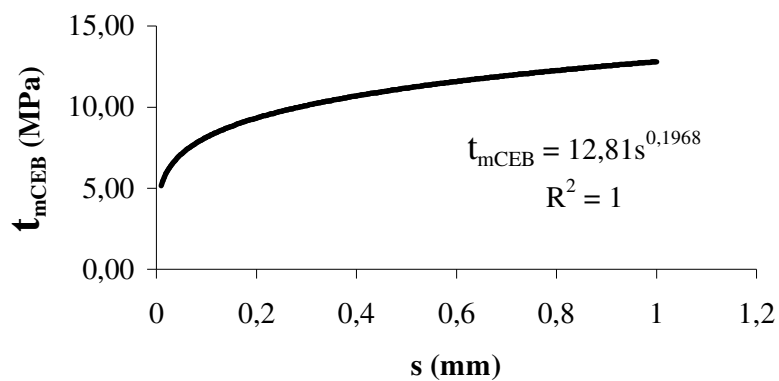


Figura 64: Gráfico tensão x deslocamento de CBBA.

A.3.2 GRÁFICO CBBE

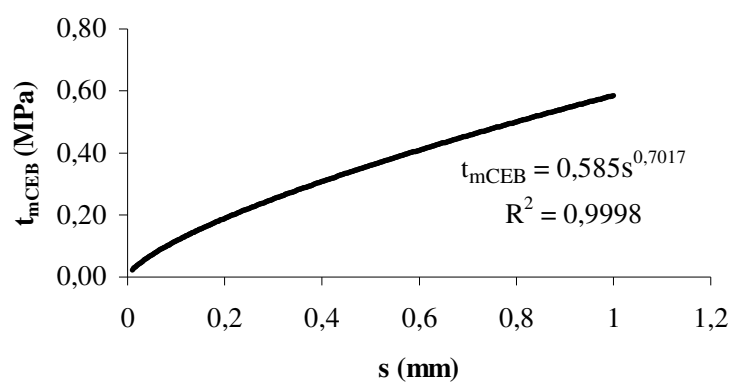


Figura 65: Gráfico tensão x deslocamento de CBBE.

A.3.3 GRÁFICO CBFA

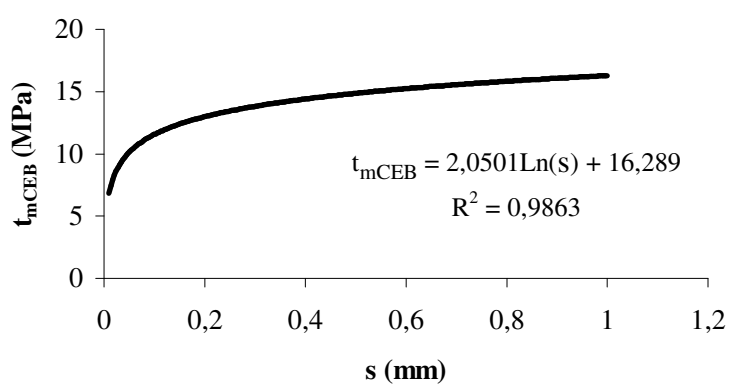


Figura 66: Gráfico tensão x deslocamento de CBFA.

A.3.4 GRÁFICO CBFE

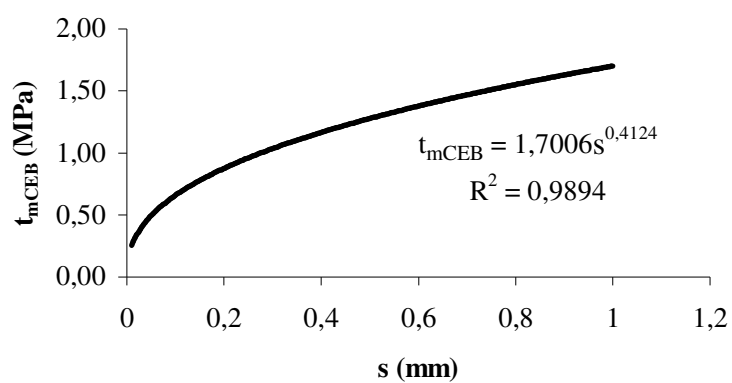


Figura 67: Gráfico tensão x deslocamento de CBFE.

Devido ao número limitado de pontos, referentes aos deslocamentos s , os gráficos tensão x deslocamento que correspondem aos traços CBPA e CBPE não foram apresentados.

ANEXO B: PROGRAMA EXPERIMENTAL II - ANÁLISE DOS RESULTADOS

B.1 RESUMO DOS RESULTADOS

Considerando os resultados encontrados no programa experimental II desta dissertação, realizou-se um resumo dos valores dos ensaios que se sucederam, para melhor entendimento da análise estatística que se segue.

Tabela 64: Ensaios de caracterização do concreto.

Traços	Resistência à compressão f_c (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral f_t (MPa)	Relação A/C
CBBA	39,06	3,51	0,61
CBBE	6,57	0,47	0,61
CBFA	28,21	2,72	0,61
CBFE	4,67	0,40	0,61
CBPA	12,96	1,34	0,61
CBPE	5,17	0,49	0,61

Tabela 65: Distância entre fissuras (cm) e Coeficiente de variação (%).

Traço	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	XM	CV
CBBA	7,52	7,73	7,77	7,49	7,90	7,93	7,68	7,64	7,55	7,69	2,06
CBBE	6,02	6,80	7,20	6,39	6,47	6,10	5,04	7,25	7,86	6,57	12,60
CBFA	9,31	8,04	8,30	7,60	7,05	6,90	7,23	9,13	7,63	7,91	10,96
CBFE	5,28	6,43	5,70	7,30	5,04	6,60	5,25	4,69	5,37	5,74	14,87
CBPA	5,49	6,84	6,91	5,13	5,18	6,23	4,88	4,97	6,75	5,82	14,71
CBPE	6,85	5,93	5,53	4,69	7,12	6,91	6,20	5,98	6,41	6,18	12,35

Tabela 66: Tensões médias de aderência segundo CASTRO (2000).

Traço	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)
CBBA	5,45
CBBE	0,85
CBFA	4,11
CBFE	0,83
CBPA	2,75
CBPE	0,95

Tabela 67: Tensões médias de aderência pelo CEB RC6.

Traço	$\tau_{m \text{ CEB}}$ (MPa)
CBBA	7,73
CBBE	0,40
CBFA	11,54
CBFE	0,76
CBPA	3,35
CBPE	1,28

Tabela 68: Tensão de aderência pela NBR 6118.

Traço	$\tau_{\text{NBR 6118}}$ (MPa)
CBBA	7,90
CBBE	1,06
CBFA	6,12
CBFE	0,90
CBPA	3,02
CBPE	1,10

B.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os itens subsequentes se referem à análise estatística dos valores encontrados durante a realização dos ensaios, a fim de que seja observado o melhor modelo estatístico aplicável.

B.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_C ENTRE OS CONCRETOS LEVE E BOMBEADO

A ferramenta anova: fator único, utilizada nesta análise, permitiu constatar a influência do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) incorporado ao concreto nos resultados da resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados aos 28 dias.

Anova: fator único

RESUMO.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1		316,41	5,47	0,97
Coluna 2		380,23	26,74333	171,9158

ANOVA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	678,8321		1678,8321	7,852952	0,048697	7,70865
Dentro dos grupos	345,7717		486,44292			
Total	1024,604		5			

Verificou-se a influência significativa do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) nos valores da resistência à compressão, tendo em vista que os resultados demonstram que F de observação é superior aos resultados de $F_{crítico}$, conforme esperado.

B.2.2 ANÁLISE DE F_T ENTRE OS CONCRETOS LEVE E BOMBEADO

Utilizando a mesma ferramenta anova: fator único, da análise da resistência à compressão anterior objetivou-se, constatar a influencia do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) incorporado ao concreto nos resultados da resistência à tração indireta por compressão diametral em corpos de prova com idade de 28 dias.

Anova: fator único

RESUMO.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	3	1,360,453333	0,002233	
Coluna 2	3	7,572,523333	1,206233	

ANOVA.

Fonte da variação	SQ	glMQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,42735	16,42735	10,6372	0,031038	7,70865
Dentro dos grupos	2,416933	40,604233			
Total	8,844283	5			

Vê-se pelo que precede, a influência significativa do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) nos valores da resistência à tração indireta por compressão diametral, tendo em vista que os resultados demonstram que F de observação é superior aos resultados de F_{crítico}, conforme esperado.

B.2.3 ANÁLISE DA RELAÇÃO F_T/F_C

A NBR 6118, no item 8.2.5, permite que seja feita uma correlação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão do concreto, segundo mostrado na equação (21):

$$f_t = \frac{1}{3} f_c^{\frac{2}{3}} \quad (21)$$

Nesta relação, utilizando o fator anova fator único, buscou-se observar novamente a influência do tipo de aditivo (espumogen ou plastificante) nos resultados.

Tabela 69: Relação f_t/f_c (%).

Tipo de agregado	Esp	Plastif
Brita (100%)	7,15	8,99
Res. Farm. (20%)	8,57	9,64
Res. raspa de pneu (20%)	9,48	10,34

Anova: fator único.

RESUMO.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	3	25,19688,398932	1,371037	
Coluna 2	3	28,967659,655884	0,458021	

ANOVA.

Fonte da variação	SQ	glMQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,369893	12,369893	2,59138	0,182733	7,70865
Dentro dos grupos	3,658117	40,914529			
Total	6,02801	5			

Foi verificado, que não há influencia significativa no valor dos resultados tendo em vista que o valor de F é menor que o valor de F crítico, conforme esperado.

B.2.4 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE F_T E F_C

Com a correlação entre f_t e f_c sugerida pela NBR 6118, por meio da equação 21, foi obtida uma curva de formato polinomial que melhor ajustou-se à correlação proposta, tendo em vista o valor de R^2 que foi o maior encontrado dentre todas as tentativas. Em seguida, procurou-se inserir os valores encontrados nos ensaios à curva, conforme mostrado no gráfico a seguir:

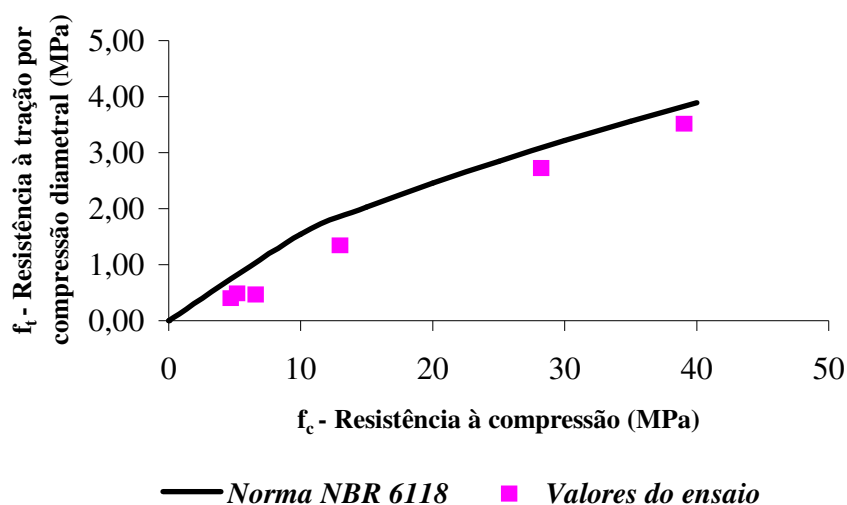


Figura 68: Correlação entre f_c e f_t .

Foi realizada uma regressão linear dos resultados encontrados, com obtenção de uma curva, a qual demonstrou que não foi obtida por mero acaso, haja visto que o valor de F de foi maior que o F crítico.

RESUMO DOS RESULTADOS.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,998796
R-Quadrado	0,997593
R-quadrado ajustado	0,995988
Erro padrão	0,084243
Observações	6

ANOVA.

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão		28,822993	4,411496	621,6101	0,000118111
Resíduo		30,021291	0,007097		
Total		58,844283			

B.2.5 ANÁLISE DAS TENSÕES DE ADERÊNCIA: $T_{M\text{ CASTRO}} \times T_{NBR\ 6118}$

Foi realizada a regressão linear dos resultados encontrados segundo o modelos de CASTRO (2000) e a NBR 6118, objetivando encontrar a melhor curva que pudesse ser ajustada aos valores encontrados para as tensões de aderência. A Tabela 60 a seguir, mostra os valores obtidos, segundo os modelos propostos.

Tabela 70: $\tau_{m\text{ CASTRO}} \times \tau_{NBR\ 6118}$.

Traço	$\tau_{m\text{ CASTRO}}$ (MPa)	$\tau_{NBR\ 6118}$ (MPa)
CBBA	5,45	7,90
CBBE	0,85	1,06
CBFA	4,11	6,12
CBFE	0,83	0,90
CBPA	2,75	3,02
CBPE	0,95	1,10

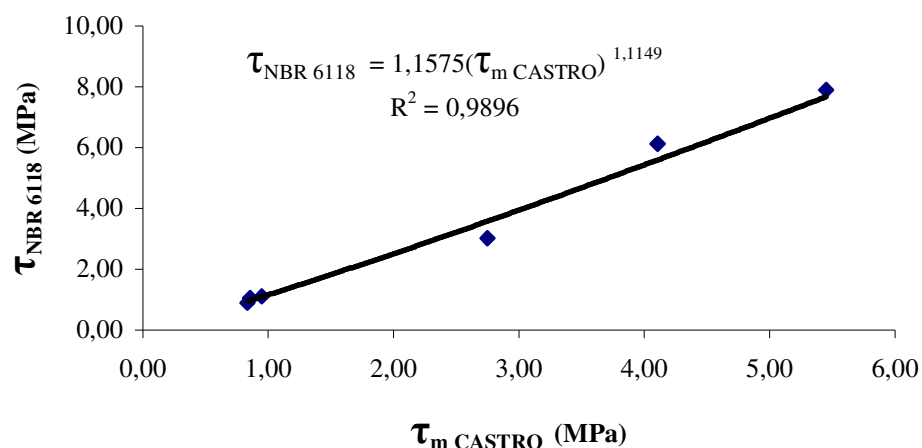


Figura 69: Tensões de aderência $\tau_{\text{m CASTRO}}$ X $\tau_{\text{NBR 6118}}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,99478
R-Quadrado	0,989587
R-quadrado ajustado	0,986984
Erro padrão	0,047409
Observações	6

ANOVA.

	gLSQ	MQ	F	F de significação
Regressão	10,854382	0,854382	380,1291	4,08047E-05
Resíduo	40,00899	0,002248		
Total	50,863372			

A estatística de regressão, demonstra que a curva não foi obtida por mero acaso, haja visto que o valor de F encontrado é superior a F de significação.

B.2.6 ANÁLISE DAS TENSÕES DE ADERÊNCIA: $T_{\text{M CASTRO}}$ X $T_{\text{NBR 6118}}$ X $T_{\text{M CEB RC6}}$.

Diante dos valores encontrados na realização dos ensaios para a determinação das tensões médias de aderência, utilizando-se a ferramenta anova: fator único, procurou-se verificar a influência na forma de cálculo das tensões, conforme a seguir.

Tabela 71: τ_m CASTRO x $\tau_{\text{NBR 6118}}$ x τ_m CEB.

Traço	τ_m CASTRO (MPa)	$\tau_{\text{NBR 6118}}$ (MPa)	τ_m CEB RC6 (MPa)
CBBA	5,45	7,90	7,73
CBBE	0,85	1,06	0,40
CBFA	4,11	6,12	11,54
CBFE	0,83	0,90	0,76
CBPA	2,75	3,02	3,35
CBPE	0,95	1,10	1,28

Anova: fator único.

RESUMO.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CASTRO (2000)		614,94098	2,490163	3,850764
NBR 6118		620,0925	3,34875	8,954837
CEB RC6		625,0625	4,177083	20,38085

ANOVA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,538019		24,26901	0,385911	0,686388967	3,682317
Dentro dos grupos	165,9323		1511,06215			
Total	174,4703		17			

A análise estatística mostrou que não há influência significativa na forma de cálculo das tensões médias de aderência proposta pelos modelos de CASTRO (2000, *apud* BARBOSA 2001), NBR 6118 e CEB RC6, pois constatou-se que F é maior que F crítico.

B.2.7 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA: $T_{M \text{ CASTRO}}$ X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_c

Neste item procurou-se estabelecer uma correlação entre os valores da tensão de aderência de acordo com o modelo proposto por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA 2001) e a resistência à compressão referente aos traços do programa experimental. Em seguida,

realizou-se uma regressão linear dos resultados obtidos, no intuito de observar ou não a mera casualidade da curva obtida.

Tabela 72: $f_c \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$.

Traço	f_c (MPa)	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)
CBBA	39,06	5,45
CBBE	6,57	0,85
CBFA	28,21	4,11
CBFE	4,67	0,83
CBPA	12,96	2,75
CBPE	5,17	0,95

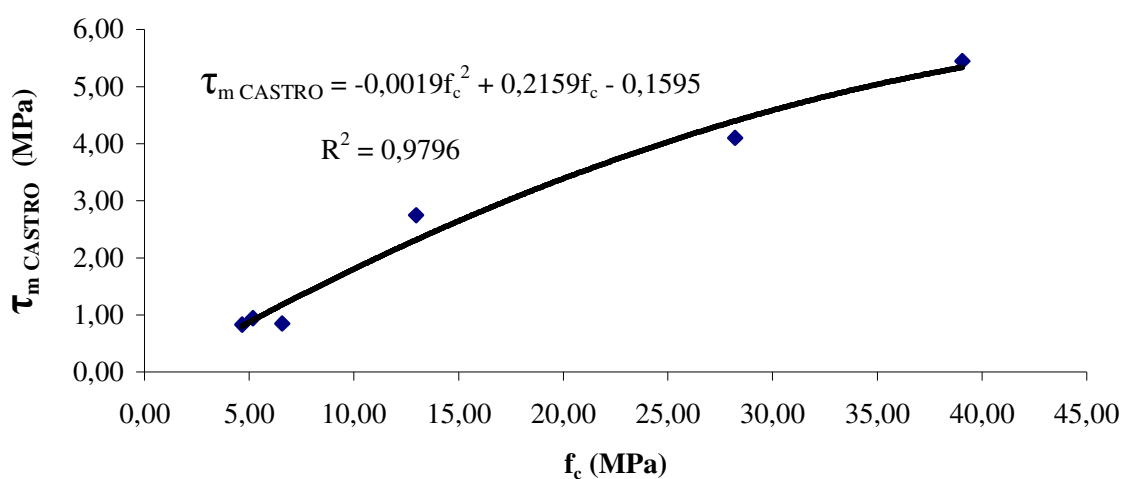


Figura 70: Resistência à compressão $f_c \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,989739
R-Quadrado	0,979583
R-quadrado ajustado	0,965971
Erro padrão	0,36199
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	18,86070812	9,430354	71,96727047	0,0029174
Resíduo	3	0,393110118	0,131037		
Total	5	19,25381824			

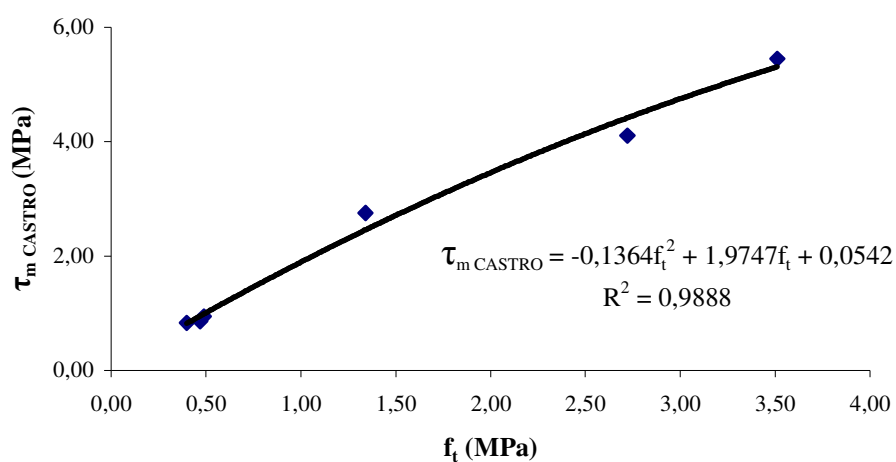
Analizando os valores encontrados na estatística de regressão, é permitido concluir que a curva de correlação entre o modelo de cálculo da tensão de aderência proposto por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA 2001) e a resistência à compressão não foi obtida por acaso.

B.2.8 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA: $T_{M \text{ CASTRO}}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T

Procurou-se, neste item, estabelecer uma correlação entre os valores encontrados para a tensão de aderência segundo o modelo de CASTRO (2000, *apud* BARBOSA 2001) e a resistência à tração por compressão diametral. Em seguida, realizou-se uma regressão linear dos valores encontrados, a fim de verificar ou não a mera casualidade da curva.

Tabela 73: $f_t \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$.

Traço	f_t (MPa)	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)
CBBA	3,51	5,45
CBBE	0,47	0,85
CBFA	2,72	4,11
CBFE	0,40	0,83
CBPA	1,34	2,75
CBPE	0,49	0,95

Figura 71: Resistência à tração por compressão diametral $f_t \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)

RESUMO DOS RESULTADOS.

Estatística de regressão

R múltiplo	0,994395
R-Quadrado	0,988821
R-quadrado ajustado	0,981369
Erro padrão	0,267851
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	19,0385857	9,519292852	132,6838348	0,001181916
Resíduo	3	0,215232538	0,071744179		
Total	5	19,25381824			

A análise de regressão dos resultados mostra que a curva não foi obtida por mera casualidade, pois F se apresentou superior a F de significação.

B.2.9 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{M \text{ CASTRO}}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_C

Para estes três parâmetros, procedeu-se uma regressão linear a fim de verificar ou não a mera casualidade da curva.

Tabela 74: $f_c \times f_t \times \tau_{m \text{ CASTRO}}$.

Traço	f_t (MPa)	f_c (MPa)	$\tau_{m \text{ CASTRO}}$ (MPa)
CBBA	3,51	39,06	5,45
CBBE	0,47	6,57	0,85
CBFA	2,72	28,21	4,11
CBFE	0,40	4,67	0,83
CBPA	1,34	12,96	2,75
CBPE	0,49	5,17	0,95

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,994255
R-Quadrado	0,988543
R-quadrado ajustado	0,980905
Erro padrão	0,271168
Observações	6

ANOVA.

	<i>glSQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	219,0332225	9,516611249	129,4215069	0,001226367
Resíduo	30,220595745	0,073531915		
Total	519,25381824			

Como o valor de F é maior do que o F de significação, conclui-se que a correlação estabelecida entre a tensão de aderência pelo modelo proposto por CASTRO (2000, *apud* BARBOSA 2001), a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral não foi obtida por mero acaso.

B.2.10 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $\tau_{NBR\ 6118}$ X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO f_c

Procurou-se estabelecer uma correlação entre os valores da tensão de aderência de acordo com o modelo proposto pela NBR 6118 e a resistência à compressão para os traços do programa experimental. Em seguida, realizou-se uma regressão linear dos resultados obtidos, no intuito de observar ou não a mera casualidade da curva obtida.

Tabela 75: f_c x $\tau_{NBR\ 6118}$

Traço	f_c (MPa)	$\tau_{NBR\ 6118}$ (MPa)
CBBA	39,06	7,90
CBBE	6,57	1,06
CBFA	28,21	6,12
CBFE	4,67	0,90
CBPA	12,96	3,02
CBPE	5,17	1,10

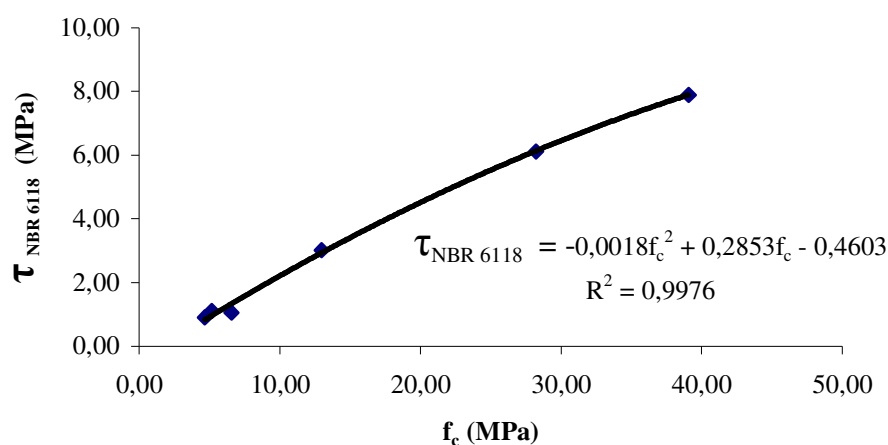


Figura 72: Resistência à compressão f_c x $\tau_{NBR\ 6118}$.

A análise de regressão, mostrou que a curva não foi obtida por mera casualidade tendo em vista que F é maior que F crítico.

B.2.11 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{NBR\ 6118}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T

Com os valores obtidos para a tensão de aderência conforme o modelo proposto pela NBR 6118 e a resistência à tração por compressão diametral, realizou-se uma regressão linear dos valores encontrados no programa experimental.

Tabela 76: f_t x $\tau_{NBR\ 6118}$

Traço	f_t (MPa)	$\tau_{NBR\ 6118}$ (MPa)
CBBA	3,51	7,90
CBBE	0,47	1,06
CBFA	2,72	6,12
CBFE	0,40	0,90
CBPA	1,34	3,02
CBPE	0,49	1,10

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,998796
R-Quadrado	0,997593
R-quadrado ajustado	0,995988
Erro padrão	0,189547
Observações	6

ANOVA.

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	44,6664004	22,3332002	621,6100583	1,181E-04
Resíduo	3	0,107783971	0,03592799		
Total	5	44,77418438			

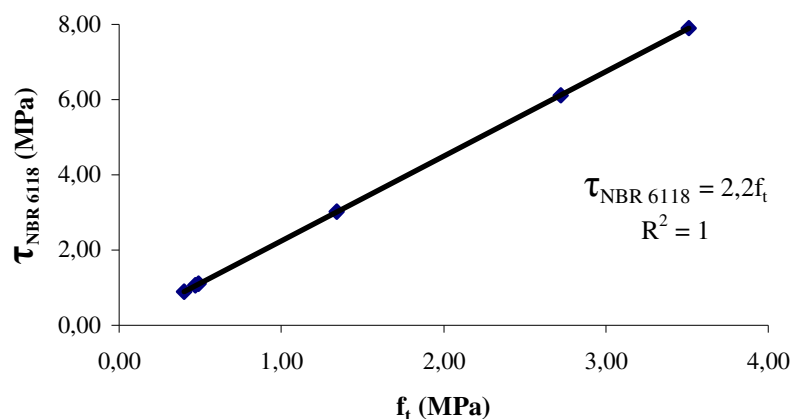


Figura 73: Resistência à tração por compressão diametral f_t x $\tau_{\text{NBR 6118}}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

Estatística de regressão

R múltiplo	1
R-Quadrado	1
R-quadrado ajustado	1
Erro padrão	1,88E-15
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F</i> <i>significação</i>	<i>de</i>
Regressão	1	44,77418438	44,77418438	1,26458E+31	3,75195E-62	
Resíduo	4	1,41625E-29	3,54063E-30			
Total	5	44,77418438				

A análise dos resultados permite concluir que a curva estabelecida entre a tensão de aderência pelo modelo proposto pela NBR 6118 e a resistência à tração por compressão diametral, não foi obtida por mero acaso, pois F se mostrou superior à F crítico.

B.2.12 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{NBR\ 6118}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_C

Tabela 77: f_c x f_t x $\tau_{NBR\ 6118}$.

Traço	f_t (MPa)	f_c (MPa)	$\tau_{NBR\ 6118}$ (MPa)
CBBA	3,51	39,06	7,90
CBBE	0,47	6,57	1,06
CBFA	2,72	28,21	6,12
CBFE	0,40	4,67	0,90
CBPA	1,34	12,96	3,02
CBPE	0,49	5,17	1,10

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	1
R-Quadrado	1
R-quadrado ajustado	1
Erro padrão	1,41E-14
Observações	6

ANOVA.

	<i>glSQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	244,77418438	22,38709	1,11903E+29	4,90767E-44
Resíduo	36,00175E-28	2E-28		
Total	544,77418438			

A análise dos resultados permite concluir que a correlação estabelecida entre a tensão de aderência pelo modelo proposto pela NBR 6118, a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral, não foi obtida por mero acaso, pois F se mostrou superior à F crítico.

B.2.13 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{M\ CEB}$ X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_c

Estabeleceu-se uma correlação entre os valores da tensão de aderência obtida segundo o modelo proposto pelo CEB RC6 e a resistência à compressão, verificando-se que a melhor curva é a do formato polinomial, conforme o gráfico que se segue.

Tabela 78: f_c x $\tau_{m\ CEB}$

Traço	f_c (MPa)	$\tau_{m\ CEB}$ (MPa)
CBBA	39,06	7,73
CBBE	6,57	0,40
CBFA	28,21	11,54
CBFE	4,67	0,76
CBPA	12,96	3,35
CBPE	5,17	1,28

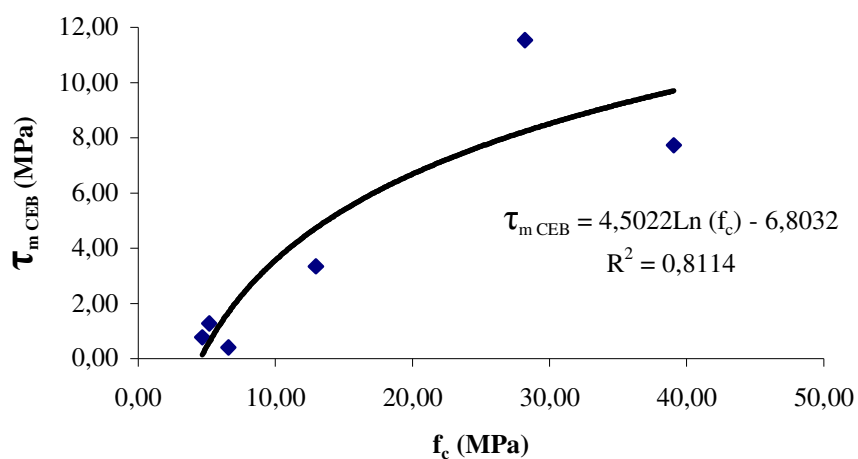


Figura 74: Resistência à compressão f_c x $\tau_{m\ CEB}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,947983
R-Quadrado	0,898671
R-quadrado ajustado	0,831119
Erro padrão	1,855246
Observações	6

ANOVA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão		291,57844969	45,78922484	13,30333201	0,032255046
Resíduo		310,32580969	3,441936563		
Total		5101,9042594			

Como F é superior a F de significação, conclui-se que a curva não foi obtida por mero acaso.

B.2.14 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{M\ CEB}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T

Através da correlação entre os valores da tensão de aderência obtida segundo o modelo proposto pelo CEB RC6 e a resistência à tração por compressão diametral, constatou-se que a melhor curva é a do formato potencial, conforme o gráfico que se segue.

Tabela 79: f_t x $\tau_{m\ CEB}$.

Traço	F_t (MPa)	$\tau_{m\ CEB}$ (MPa)
CBBA	3,51	7,73
CBBE	0,47	0,40
CBFA	2,72	11,54
CBFE	0,40	0,76
CBPA	1,34	3,35
CBPE	0,49	1,28

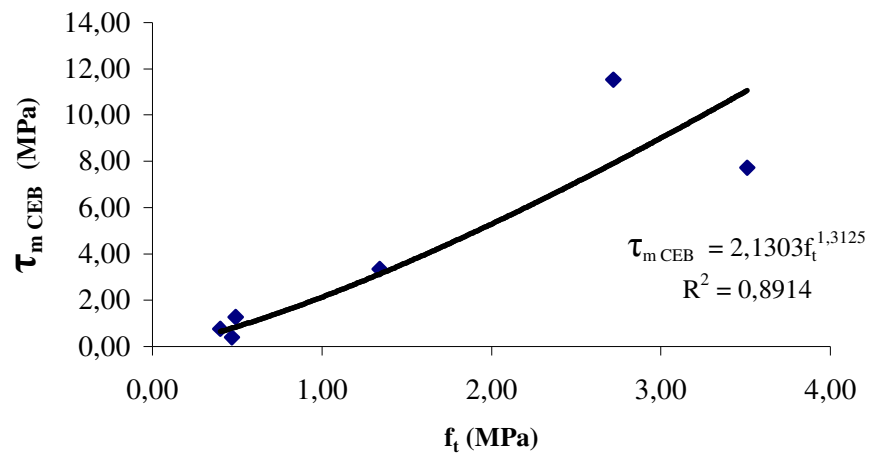


Figura 75: Resistência à tração por compressão f_t x $\tau_{m \text{ CEB}}$.

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,944144
R-Quadrado	0,891408
R-quadrado ajustado	0,86426
Erro padrão	0,212833
Observações	6

ANOVA.

	<i>glSQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	11,487367697	1,487367697	32,83523184	0,004592671
Resíduo	40,181191679	0,04529792		
Total	51,668559376			

A análise de regressão entre a resistência à compressão diametral f_t e o modelo proposto pelo CEB RC6, mostrou que a curva não foi obtida por acaso, pois F sobrepõe o valor de F crítico.

B.2.15 ANÁLISE DA TENSÃO DE ADERÊNCIA $T_{M\ CEB}$ X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL F_T X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO F_C

Tabela 80: f_c x f_t x $\tau_{m\ CEB}$

Traço	f_t (MPa)	f_c (MPa)	$\tau_{m\ CEB}$ (MPa)
CBBA	3,51	39,06	7,73
CBBE	0,47	6,57	0,40
CBFA	2,72	28,21	11,54
CBFE	0,40	4,67	0,76
CBPA	1,34	12,96	3,35
CBPE	0,49	5,17	1,28

RESUMO DOS RESULTADOS.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,937742
R-Quadrado	0,87936
R-quadrado ajustado	0,798933
Erro padrão	2,024329
Observações	6

ANOVA.

	<i>glSQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	289,61053406	44,80526703	10,93369159	0,041902193
Resíduo	312,29372531	4,097908437		
Total	5101,9042594			

A análise dos resultados permite concluir que a correlação estabelecida entre a tensão de aderência conforme o modelo proposto pelo CEB RC 6, a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral, não foi obtida por mero acaso, já que F é superior à F de significação.

B.3 GRÁFICOS TENSÃO τ x DESLOCAMENTO s

B.3.1 GRÁFICO CBBA

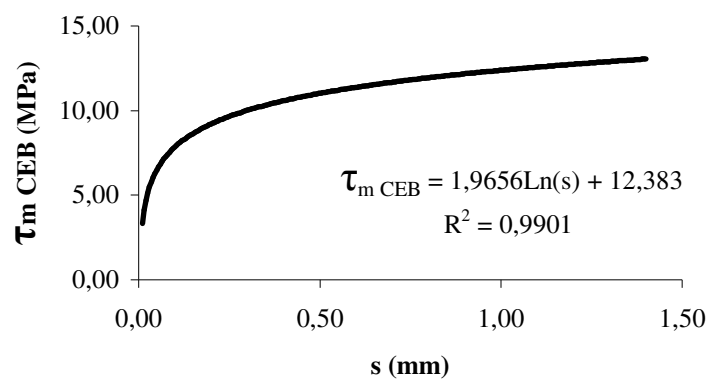


Figura 76: Gráfico tensão x deslocamento de CBBA.

B.3.2 GRÁFICO CBBE

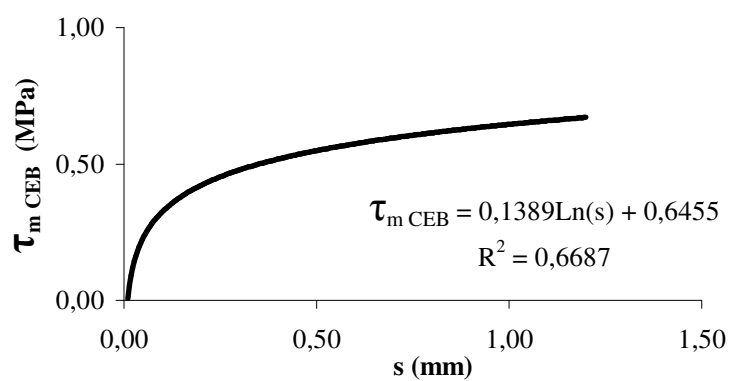


Figura 77: Gráfico tensão x deslocamento de CBBE.

B.3.3 GRÁFICO CBFA

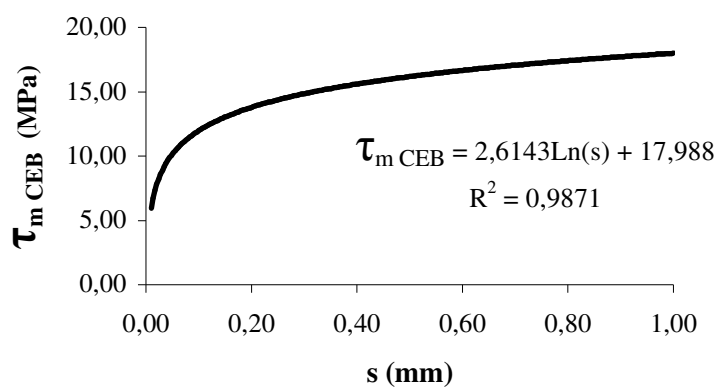


Figura 78: Gráfico tensão x deslocamento de CBFA.

B.3.4 GRÁFICO CBFE

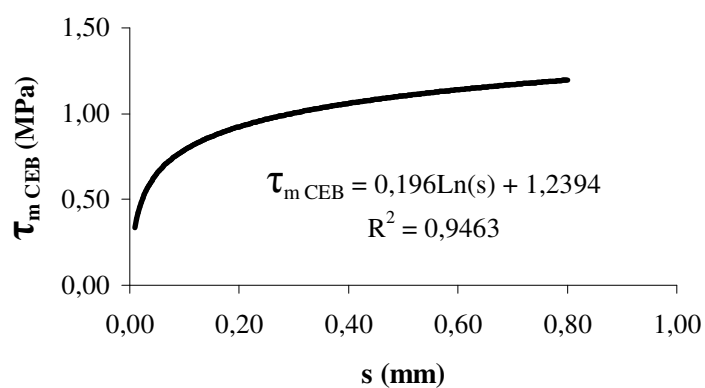


Figura 79: Gráfico tensão x deslocamento de CBFA.

B.3.5 GRÁFICO CBPA

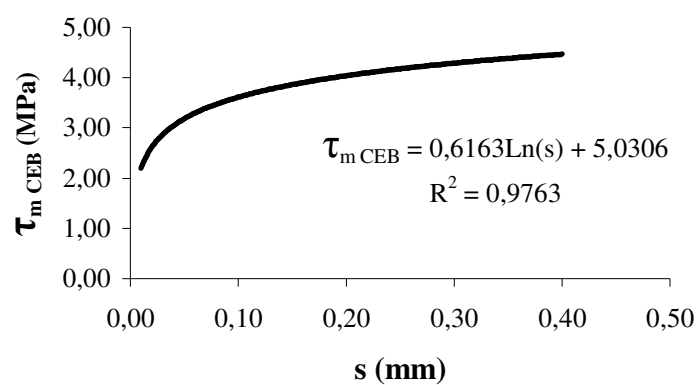


Figura 80: Gráfico tensão x deslocamento de CBPA.

B.3.6 GRÁFICO CBPE

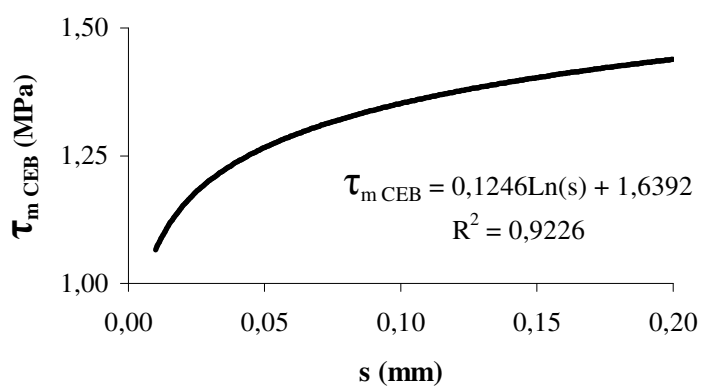


Figura 81: Gráfico tensão x deslocamento de CBPE.

ANEXO C: RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Tabela 81: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBBA.

Dados para ensaio									
Datas			Condições de Cura		Faceamento		Precisão Equipamento		Condição Ensaio
04 out-05	23-ago-05	42	Tanque		Enxofre		mm / 1000		Saturado
Ø CP mm	Resistência à Compressão		Prensa		Equipamento				
	CP1 Kgf	CP2 Kgf	Fc (MPa)	Subdivisão (Kgf)	Nº de Base de Medida		Comprimento Inicial		
150	67500	68500	38,5	250	3		140		
Ensaio									
Leitura	Tensão Compressão (Mpa)	Deformação (mm x 1000)				Ecs= Módulo de Deformação (GPa)			
		CP 03	CP 04	CP 05	Média	CP 03	CP 04	CP 05	Média
L0	0,6	1	2	2	2	-	-	-	-
L2	7,6	36	38	37	37	28,3	27,8	28,0	28,0
L3	11,6	58	59	59	59	26,9	26,9	26,9	26,9
L4	15,4	80	81	82	81	26,3	26,2	26,1	26,2
L5	19,2	102	106	105	104	25,9	25,2	25,4	25,5
L6	23,1	127	133	131	130	24,9	24,1	24,4	24,5
L7	26,9	155	162	161	159	24,0	23,0	23,2	23,4
L8	30,8	190	202	196	196	22,5	21,2	21,9	21,8
Fc efetiva (MPa)		39,2	38,8	40,0	39,3	Para 40 % de Fc, σ _b =		15,4	MPa
						Módulo de Deformação Secante =		26,2	GPa

Tabela 82: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBBE.

Dados para ensaio									
Datas			Condições de Cura	Faceamento	Precisão Equipamento	Condição Ensaio			
Ensaio	Moldagem	Idade							
04-out-05	24-ago-05	42	Tanque	Enxofre	mm / 1000	Saturado			
Ø CP mm	Resistência à Compressão			Prensa	Equipamento				
	CP1 Kgf	CP2 Kgf	Fc (MPa)	Subdivisão (Kgf)	Nº de Base de Medida		Comprimento Inicial		
150	10000	10000	5,7	250	3		140		
Ensaio									
Leitura	Tensão Compressão (MPa)	Deformação (mm x 1000)				Ecs= Módulo de Deformação (GPa)			
		CP 03	CP 04	CP 05	Média	CP 03	CP 04	CP 05	Média
L0	0,6	5	9	7	7	-	-	-	-
L2	1,1	15	22	17	18	7,9	6,3	8,2	7,5
L3	1,7	23	38	27	30	8,6	5,5	7,8	7,3
L4	2,3	31	52	38	40	8,9	5,6	7,6	7,4
L5	2,8	42	67	49	53	8,4	5,5	7,5	7,1
L6	3,4	53	81	62	65	8,3	5,6	7,2	7,0
L7	4,0	64	97	77	79	8,1	5,4	6,8	6,8
L8	4,5	84		97	91	7,0		6,2	6,6
Fc efetiva (MPa)		4,5	4,5	5,1	4,7	Para 40 % de Fc, σb=		2,3	MPa
						Módulo de Deformação Secante =		7,2	GPa

Tabela 83: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBFA.

Dados para ensaio									
Datas			Condições de Cura	Faceamento	Precisão Equipamento	Condição Ensaio			
03-out-05	24-ago-05	42	Tanque	Enxofre	mm / 1000	Saturado			
Ø CP mm	Resistência à Compressão		Prensa		Equipamento				
	CP1 Kgf	CP2 Kgf	Fc (MPa)	Subdivisão (Kgf)	N° de Base de Medida		Comprimento Inicial		
150	46750	47250	26,6	250	3		140		
Ensaio									
Leitura	Tensão Compressão (Mpa)	Deformação (mm x 1000)				Ecs= Módulo de Deformação (GPa)			
		CP 03	CP 04	CP 05	Média	CP 03	CP 04	CP 05	Média
L0	0,6	2	2	2	2	-	-	-	-
L2	5,4	33	32	33	33	22,2	22,2	21,5	22,0
L3	7,9	50	50	51	51	21,5	21,3	20,9	21,2
L4	10,6	70	69	72	70	20,9	20,9	20,2	20,7
L5	13,3	91	90	93	91	20,2	20,3	19,7	20,1
L6	16,0	114	112	117	114	19,3	19,6	18,8	19,2
L7	18,7	142	136	147	142	18,2	18,9	17,5	18,2
L8	21,2	172	163	182	173	17,0	17,9	16,1	17,0
Fc efetiva (MPa)		27,0	28,0	26,5	27,2	Para 40 % de Fc, σb=		10,6	MPa
						Módulo de Deformação Secante =		20,6	GPa

Tabela 84: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBFE.

Dados para ensaio									
Datas			Condições de Cura		Faceamento	Precisão Equipamento	Condição Ensaio		
05-out-05	30-ago-05	36	Tanque		Enxofre	mm / 1000			Saturado
Ø CP mm	Resistência à Compressão			Prensa		Equipamento			
	CP1 Kgf	CP2 Kgf	Fc (MPa)	Subdivisão (Kgf)		Nº de Base de Medida		Comprimento Inicial	
150	5500	6000	3,3	250		3		140	
Ensaio									
Leitura	Tensão Compressão (Mpa)	Deformação (mm x 1000)				Ecs= Módulo de Deformação (GPa)			
		CP 03	CP 04	CP 05	Média	CP 03	CP 04	CP 05	Média
L0	0,6	10	8	10	9	-	-	-	-
L2	0,7	16	15	14	15	3,1	3,1	5,0	3,7
L3	1,0	22	22	20	21	5,0	4,3	5,9	5,1
L4	1,3	30	29	26	28	5,0	4,8	5,9	5,3
L5	1,7	39	39	37	38	5,5	5,1	5,9	5,5
L6	2,0	48	47	45	47	5,3	5,1	5,6	5,3
L7	2,3	55	56	53	55	5,3	5,0	5,5	5,3
L8	2,5	66	68	64	66	5,0	4,6	5,1	4,9
Fc efetiva (MPa)		3,3	3,0	3,3	3,2	Para 40 % de Fc, σ _b =		1,3	MPa
						Módulo de Deformação Secante =		4,9	GPa

Tabela 85: Resultado do ensaio do módulo de deformação secante para CBPA.

Dados para ensaio									
Datas			Condições de Cura		Faceamento	Precisão Equipamento	Condição Ensaio		
05-out-05	01-set-05	34							
Ø CP mm	Resistência à Compressão			Prensa		Equipamento			
	CP1 Kgf	CP2 Kgf	Fc (MPa)	Subdivisão (Kgf)		Nº de Base de Medida		Comprimento Inicial	
150	21500	22500	12,4	250		3		140	
Ensaio									
Leitura	Tensão	Deformação (mm x 1000)				Ecs= Módulo de Deformação (GPa)			
	Compressão (Mpa)	CP 03	CP 04	CP 05	Média	CP 03	CP 04	CP 05	Média
L0	0,6	3	4	2	3	-	-	-	-
L2	2,5	22	24	22	23	14,6	13,9	14,3	14,3
L3	3,7	33	36	32	34	14,5	13,5	14,7	14,2
L4	5,0	47	52	46	48	14,2	12,7	14,2	13,7
L5	6,2	61	68	60	63	13,7	12,3	13,7	13,2
L6	7,5	75	86	76	79	13,5	11,8	13,2	12,8
L7	8,8	92	104	97	98	13,0	11,4	12,1	12,2
L8	9,9	110	129	122	121	12,2	10,4	10,9	11,2
Fc efetiva (MPa)		12,2	12,2	12,0	12,1	Para 40 % de Fc, σ=		5,0	MPa
						Módulo de Deformação Secante =		13,6	GPa

Tabela 86: Resultado ensaio do módulo de deformação secante para CBPE.

Dados para ensaio									
Datas			Condições de Cura	Faceamento	Precisão Equipamento	Condição Ensaio			
06-out-05	01-set-05	35					Tanque	Enxofre	mm / 1000
Ø CP mm	Resistência à Compressão			Prensa	Equipamento				
	CP1 Kgf	CP2 Kgf	Fc (MPa)	Subdivisão (Kgf)	Nº de Base de Medida	Comprimento Inicial			
150	7000	7000	4,0	250	3	140			
Ensaio									
Leitura	Tensão Compressão (MPa)	Deformação (mm x 1000)				Ecs= Módulo de Deformação (GPa)			
		CP 03	CP 04	CP 05	Média	CP 03	CP 04	CP 05	Média
L0	0,6	6	7	6	6	-	-	-	-
L2	0,8	12	15	13	13	6,3	5,2	5,4	5,6
L3	1,1	17	20	19	19	7,0	6,1	6,1	6,4
L4	1,6	25	28	27	27	7,3	6,6	6,5	6,8
L5	2,0	32	35	36	34	7,7	7,0	6,6	7,1
L6	2,4	39	43	45	42	7,8	7,2	6,7	7,2
L7	2,8	48	52	54	51	7,6	7,0	6,6	7,1
L8	3,1	55	60	62	59	7,3	6,7	6,3	6,8
Fc efetiva (MPa)		3,8	3,8	4,0	3,9	Para 40 % de Fc, σ _b =		1,6	MPa
						Módulo de Deformação Secante =		6,5	GPa