

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DOSAGEM DE ARGAMASSA PARA ESTACA RAIZ

POLLYANA BENEVIDES FREITAS VENÂNCIO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

DOSAGEM DE ARGAMASSA PARA ESTACA RAIZ

POLLYANA BENEVIDES FREITAS VENÂNCIO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

**Prof. ELTON BAUER, DSc (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof^ª. NEUSA MARIA BEZERRA MOTA, DSc (ENC-UnB)
(Co-orientadora)**

**Prof. ANTÔNIO ALBERTO NEPOMUCENO, Dr. Ing (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. ALEXANDRE DUARTE GUSMÃO, DSc (UPE)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 03 DE DEZEMBRO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

VENÂNCIO, POLLYANA BENEVIDES FREITAS	
Dosagem de Argamassa para Estaca Raiz [Distrito Federal] 2008.	
xvii, 173p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2008).	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1.Argamassa	2.Estaca Raiz
3.Reologia	4.Estado Fresco e Endurecido
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VENÂNCIO, P. B. F. (2008). Dosagem de Argamassa para Estaca Raiz. Dissertação de Mestrado em Estrutura e Construção Civil, Publicação E.DM - 013A/ 08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 175p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Pollyana Benevides Freitas Venâncio.

TÍTULO: Dosagem de Argamassas para Estacas Raiz.

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Pollyana Benevides Freitas Venâncio
Rua 06, Quadra 02, Bloco G, apartamento 201.
75123-230 Anápolis – GO – Brasil.

DEDICATÓRIA

‘Não sei como o mundo me vê; mas eu me sinto como um garoto brincando na praia, contente em achar aqui e ali uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita, tendo sempre diante de mim, ainda por descobrir, o grande oceano da verdade.’

Isaac Newton (1643-1727)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Elton Bauer, pela imprescindível orientação e pelas sempre proveitosas discussões e esclarecimentos. À Professora Neusa Mota pela co-orientação, pela força nos momentos mais difíceis e por ter me proporcionado este tema.

Aos Professores do programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil pelo apoio e amizade.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais - LEM da Universidade de Brasília, onde foram realizados os ensaios e ao Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico – CDT da Universidade de Brasília.

Aos técnicos e amigos Severino e Xavier pela colaboração indispensável à realização deste trabalho.

À WRJ – Engenharia de Solos e Materiais, na pessoa do engenheiro Renato Sales Cortopassi pelo apoio na realização das estacas em campo, fornecendo o equipamento para perfuração e equipe técnica para suporte dos trabalhos, bem como apoio financeiro.

À EMBRE – Empresa Brasileira de Engenharia e Fundações, na pessoa do engenheiro Carlos Medeiros Silva, pelo apoio financeiro.

Aos colegas e amigos do mestrado, em especial a Carla, Paula, Cláudio, Giana, Nelson, pela convivência sempre alegre e pelo apoio dispensado a mim nos momentos mais difíceis.

A minha amiga Lady e o River, que me apoiaram e ajudaram em todos os momentos desta caminhada.

Ao grande amor da minha vida: meu esposo Amaro, cujo amor, paciência e apoio foram essenciais no decorrer destes anos de intenso estudo. À minha família pelos momentos de alegria, amizade, paciência e companheirismo, fundamentais para mais esta conquista.

RESUMO

O presente trabalho avalia experimentalmente as propriedades das argamassas utilizadas no processo de preenchimento de estacas raiz, tendo-se em vista obter parâmetros de mistura capazes de caracterizar as propriedades no estado fresco e estado endurecido. Como ferramentas, foi utilizado o ensaio do *Vane Test*, Perda de água sob sucção, Compressão axial, Resistência à tração e o Módulo de elasticidade. Os parâmetros fornecidos pelos métodos foram maximizados e minimizados (em faixas de argamassas trabalháveis e não trabalháveis) a partir de variações na granulometria, relação água/ cimento e consumo de aglomerante.

Primeiramente fez-se o acompanhamento do processo executivo da estaca raiz em algumas obras, onde foram identificados os parâmetros iniciais a serem utilizados no estudo de dosagem experimental, em laboratório. Para a dosagem foram utilizadas três séries com granulometrias distintas. Os melhores resultados foram obtidos pela série que tinha a melhor distribuição granulométrica, obtida pelo proporcionamento de duas areias classificadas como fina e média.

No estado fresco analisou-se a consistência através da tensão de escoamento, obtendo os resultados variando de 0,196 kPa até 0,220 kPa. A relação água/ materiais secos variou de 21% até 32%. Os resultados de resistência à compressão axial, para as argamassas, em média estavam acima do valor requerido pela norma de fundação (NBR 6122/ 1996). Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade variaram de 1,3 GPa até 2,2 GPa.

A partir do diagrama de dosagem foram escolhidos seis traços segundo os critérios que a NBR 6122/ 1996 especifica, consumo de cimento e resistência de dosagem, e assim executadas seis estacas raiz no campo experimental. Depois de 28 dias, as estacas foram exumadas para avaliação do comportamento da argamassa no processo executivo, onde se observou diferenças no comportamento da argamassa ao longo do fuste, ponta e topo das estacas. Em algumas estacas verifica-se o enraizamento da argamassa no solo, já em outras não se verificou este comportamento. Em alguns casos na ponta (extremidade inferior) pôde se observar a ferragem exposta, não havendo o envolvimento pela argamassa, mostrando que o comportamento previsto na teoria da estaca raiz, nem sempre ocorre no processo executivo em uma obra.

ABSTRACT

The present work experimentally evaluates the properties of mortar used in the process of fulfilling of root piles, having itself in sight to get parameters of mixture capable to characterize the properties in the fresh state and hard state. As tools, the assay of the vane test was used, loss of water under suction, axial compression, tensile strength and the modulus of elasticity. The parameters supplied for the methods had been maximized and minimized (in bands of mortar you worked and you did not work) from variations in the granulometry, relation water cement and cement content.

First the accompaniment of the executive proceeding of the prop became root pile in some build, where the initial parameters had been identified to be used in the study of experimental dosage, in laboratory. For the dosage three series with distinct granulometry had been used. The best ones resulted had been gotten by the series that had the best grain sized distribution, gotten for the mixed of two classified sands as fine and average.

In the fresh state it was analyzed consistency through the yield stress, varying results of the 0,196 kPa up to 0,220 kPa. The relation water/ material dry varied of 21% up to 32%. The results of axial compressive strength, for mortars, on average were above of the value required for the foundation norm (NBR 6122/1996). The results gotten for the modulus of elasticity had varied of 1,3 GPa up to 2,2 GPa.

From the dosage diagram criteria had been chosen six traces according to that NBR 6122/1996 specifies, cement consumption and resistance of dosage, and thus executed six root piles in the experimental field. After 28 days, the root piles had been exhumed for evaluation of the behavior of the mortar in the executive proceeding, where if it observed differences in the behavior of the mortar throughout the shaft, tip and top of the root piles. In some root piles the rooted of the mortar in the ground is verified, already in others this behavior was not verified. In some cases in the tip (inferior extremity) the displayed hardware could be observed, not having the involvement for the mortar, showing that the behavior foreseen in the theory of the root piles, nor always occurs in the executive proceeding in a builds.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.1	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	1
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	2
1.3	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	ESTACA RAIZ.....	5
2.1.1	DEFINIÇÃO.....	5
2.1.2	PROJETO DE FUNDAÇÃO DO TIPO ESTACA RAIZ E NORMALIZAÇÃO	6
2.1.2.1	Capacidade de Carga.....	6
2.1.2.2	Dimensionamento Estrutural.....	9
2.1.3	EXEMPLOS DE OBRAS.....	12
2.1.4	PROCESSO CONVENCIONAL DE EXECUÇÃO DA ESTACA RAIZ.....	14
2.1.4.1	Locação das estacas.....	14
2.1.4.2	Perfuração	15
2.1.4.3	Armadura	17
2.1.4.4	Preenchimento com argamassa	18
2.1.4.5	Preparo da cabeça da estaca	19
2.2	ARGAMASSAS	21
2.2.1	REOLOGIA.....	22
2.2.2	CLASSIFICAÇÃO DO MODELO REOLÓGICO.....	26
2.2.2.1	Fluidos Newtonianos.....	26
2.2.2.2	Fluidos Não-Newtonianos.....	27
2.2.3	COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA ARGAMASSA.....	28
2.2.3.1	Modelo de Herschell-Buckley.....	29
2.2.3.2	Modelo de Bingham.....	29
2.3	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	30
2.3.1	INFLUÊNCIA DA PASTA E DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO..	30
2.3.2	PROPRIEDADES FÍSICAS QUE CARACTERIZAM O PROCESSO DE INJEÇÃO DE ARGAMASSA PARA ESTACAS RAIZ	33
2.3.2.1	Parâmetros de mistura.....	33
2.3.2.2	Propriedades que interferem no processo de bombeamento das argamassas.....	38
2.4	ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	45
2.4.1	VANE TEST	46
2.4.1	FUNIL V (V FUNNEL)	49
2.4.1	CONE DE MARSH.....	50
2.4.2	MESA DE CONSISTÊNCIA.....	51
2.4.3	PENETRAÇÃO ESTÁTICA DO CONE	53
2.5	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	55
2.5.1	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	55
2.5.2	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.....	58
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E ENSAIOS UTILIZADOS	63
3.1.1	CIMENTO.....	64
3.1.2	AGREGADO.....	66
3.1.3	DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS UTILIZADOS	68
3.1.3.1	Procedimento de preparo e mistura das argamassas.....	68
3.1.4	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	71
3.1.4.1	Método do Vane Teste	71
3.1.4.2	Ensaio de perda de água sob sucção.....	72
3.1.4.3	Funil V (V Funnel).....	74
3.1.5	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	76
3.1.5.1	Resistência à compressão axial	77
3.1.5.2	Resistência à compressão diametral.....	78
3.1.5.3	Resistência à tração por flexão.....	79
3.1.5.4	Módulo de elasticidade	80
3.2	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	83
3.2.1	PILOTO 01 - AVALIAÇÕES PRELIMINARES EM LABORATÓRIO	83
3.2.2	PILOTO 02 - MONITORAMENTO EM CANTEIRO DE OBRA	87
3.3	PROJETO EXPERIMENTAL I E II - CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	88

3.3.1	PROJETO EXPERIMENTAL I - DEFINIÇÃO DO TRAÇO PARA CADA COMPOSIÇÃO DE AREIA UTILIZADA	89
3.3.2	PROJETO EXPERIMENTAL II – DIAGRAMA DE DOSAGEM.....	91
3.4	<i>ESTUDO DE CAMPO – EXECUÇÃO E EXUMAÇÃO DE ESTACA RAIZ</i>	92
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	96
4.1	<i>PROJETO EXPERIMENTAL I – DEFINIÇÃO DO TRAÇO PARA CADA COMPOSIÇÃO</i>	96
4.2	<i>PROJETO EXPERIMENTAL II – DIGRAMA DE DOSAGEM</i>	97
4.2.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	97
4.2.1.1	Comportamento dos Parâmetros de Mistura	97
4.2.1.2	Exsudação	102
4.2.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO	104
4.2.2.1	Análise do Método do Ensaio de Resistência.....	104
4.2.2.1.1	Resistência à Compressão Axial (f_c)	104
4.2.2.1.2	Resistência à Tração.....	106
4.2.2.2	Análise em Função dos Parâmetros de Mistura.....	108
4.2.2.2.1	Resistência à Compressão Axial	108
4.2.2.2.2	Resistência à Tração.....	110
4.2.2.3	Módulo de deformação estático (E_{ci}).....	112
4.3	<i>ESTUDO DE CAMPO – DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS A SEREM EXECUTADOS</i>	115
4.3.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ESTACAS NO ESTADO FRESCO.....	115
4.3.2	EXECUÇÃO DE ESTACAS RAIZ NO CAMPO EXPERIMENTAL	118
4.3.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO	124
4.3.3.1	Resistência à compressão axial	124
4.3.3.2	Resistência à tração na flexão	125
4.3.3.3	Módulo de deformação estático	125
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
5.1	<i>CONCLUSÕES</i>	127
5.2	<i>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</i>	130
6.	BIBLIOGRAFIA PRINCIPAL.....	131
	ANEXOS.....	136
	ANEXO A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	137
	ANEXO B – RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	141
	(PROJETO EXPERIMENTAL I E II)	141
	ANEXO C- ESTUDO DE CAMPO.....	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ponte estaiada sobre o Rio das Ostras no Rio de Janeiro (GRISOLLI, 2007)	12
Figura 2.2 – Fachada do Shopping Bourbon Pompéia em São Paulo. (07. JPG, 2008)	13
Figura 2.3 – Execução de estaca raiz no reforço de um pilar, ponte sobre o Rio Paraguai. (09.JPG, 2008).....	13
Figura 2.4 - Base de concreto armado construída para fixação dos tanques de armazenamento na COPAPE, Ilha do Barnabé.	14
Figura 2.5 - Perfuração da estaca raiz: (a) lateral esquerda do equipamento, (b) lateral direita do equipamento, onde fica o painel de comando, (c) circulação de água no interior do tubo, (d) alguns tipos de coroas de perfuração e extremidades rosqueadas dos tubos metálicos.	15
Figura 2.6 – (a) modelo de ferragem usualmente utilizada para estaca raiz, (b) Colocação da armação após a perfuração, (c) a armação abrange todo o comprimento do fuste	17
Figura 2.7 – (a) Preenchimento do furo com argamassa, (b) desrosqueamento e retirada dos tubos.	19
Figura 2.8 – Fluxograma executivo da estaca raiz (ABEF, 2007).	21
Figura 2.9 - Fluido viscoso entre placas, cisalhado por uma força aplicada na placa superior.	24
Figura 2.10 - Comportamento de fluidos: (1) – Fluido newtoniano, (2) – Fluido de Bingham, (3) – Fluido pseudoplástico e (4) – Fluido Dilatante (MACHADO, 2002)	25
Figura 2.11 – Representação esquemática dos fluidos não - newtonianos.	27
Figura 2.12 – Gráfico de tensão versus deformação	30
Figura 2.13 - Relação a/c x fc para cimentos brasileiros (HELENE e TERZIAN, 1992).	34
Figura 2.14 – Concretos de mesma trabalhabilidade, constância do teor água/ materiais secos com variação do traço. (PETTRUCCI, 1993).	37
Figura 2.15 - Modelo de deformação do fluxo sob conduto forçado, para pastas de cimento (POPOVICS, 1982).....	44
Figura 2.16 – Comportamento reológico dos materiais (FERRARIS, 1999).	45
Figura 2.17- Relação entre as dimensões da palheta e do recipiente (BAUER, et al, 2007) ...	47
Figura 2.18 – O equipamento utilizado no ensaio do Vane Test.	48
Figura 2.19 – Ilustração do Funil V (<i>V - Funnel</i>).	50
Figura 2.20 - Ensaio com o Cone de Marsh (AMARAL e GOMES, 2005).	51
Figura 2.21 – Ensaio da mesa de consistência: (a) Equipamento, (b) Moldagem da argamassa; (c) Aplicação dos golpes; (d) Medida do Espalhamento (ARAÚJO, 2004).	52
Figura 2.22 – (a) Equipamento utilizado no ensaio de Penetração Estática do Cone, (b) argamassa no porta amostra, (c) posicionamento da amostra, (d) leitura de penetração (FILHO et. al., 2006 e PEREIRA, 2007).	54
Figura 2.23 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão	55
Figura 2.24 – Caracterização dos módulos de deformação.....	60
Figura 2.25 - Fatores que interferem no resultado do Módulo de Deformação (BATTAGIN, 2007).....	60
Figura 2.26 - Influência da relação a/c sobre o módulo de elasticidade (NUNES, 2005)	62
Figura 2.27 - Influência da resistência à compressão sobre o módulo de elasticidade em argamassas (ARAÚJO, 2004)	62
Figura 3.1 – Distribuições granulométricas das areias utilizadas.	66
Figura 3.2- Misturador utilizado no preparo das argamassas.....	69
Figura 3.3 - a) Mesa vibratória para adensamento dos prismas; b) Molde utilizado para execução dos cps.	70

Figura 3.4- Equipamento utilizado no ensaio de retenção de água com o funil de Büchner modificado.....	72
Figura 3.5 - Sequência da execução do ensaio de retenção de água (Araújo, 2004).	73
Figura 3.6 – Funil V utilizado nos ensaios realizados.....	75
Figura 3.7 Ensaio de compressão axial em corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos.	78
Figura 3.8 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral segundo a NBR 7222/ 94.....	78
Figura 3.9 - Ensaio de resistência à tração na flexão	80
Figura 3.10 - Ciclos de carregamento do concreto para determinação de E_{ci} (NBR 8522/2003).	81
Figura 3.11 – Ensaio do módulo de elasticidade e disposição das pastilhas nos corpos-de-prova 5x10cm.	82
Figura 3.12 – Relação entre a Tensão de escoamento e a relação água/ materiais secos.	86
Figura 3.13 – Fluxograma do Piloto 01.....	86
Figura 3.14 – Fluxograma do Piloto 02.....	88
Figura 3.15 - Etapas de desenvolvimento da pesquisa.....	89
Figura 3.16 – Fluxograma descrevendo as variáveis do Programa Experimental I.....	90
Figura 3.17 – Fluxograma descrevendo as variáveis do Programa Experimental II.....	92
Figura 4.1 – Representação gráfica da quantidade de agregado x a/c obtida no Projeto Experimental II.....	99
Figura 4.2 – Representação gráfica do A% x a/c, obtidos no Projeto Experimental II.....	99
Figura 4.3 - Representação da variação do Índice de Pasta mantendo-se a consistência constante.....	101
Figura 4.4 - Representação do volume de vazios da areia x consumo de cimento.	101
Figura 4.5 – Representação da tensão de escoamento x consumo de cimento.	102
Figura 4.6 – Perda de água após 15 minutos de sucção em relação ao teor de água contido nos traços.	103
Figura 4.7 - Comportamento da resistência à compressão axial versus C_c , cps prismáticos (4x4x16 cm)	109
Figura 4.8 – Resistência à compressão axial dos cps prismáticos (4x4x16 cm) x relação a/c.	109
Figura 4.9 - Resistência à compressão diametral x C_c , para cps cilíndricos (5x10 cm).....	110
Figura 4.10 - Representação gráfica da resistência à compressão diametral dos cps cilíndricos (5x10 cm).	111
Figura 4.11 - Resistência à tração na flexão x C_c , para cps prismáticos (4x4x16 cm).....	111
Figura 4.12 - Representação gráfica da resistência à tração na flexão dos cps prismáticos (4x4x16 cm).	112
Figura 4.13 - Comportamento do módulo de elasticidade em relação a resistência à compressão de cps prismáticos (4x4x16 cm).....	113
Figura 4.14 – Diagrama de Dosagem obtido através do programa experimental.....	114
Figura 4.15 – Argamassadeira utilizada nas misturas.....	118
Figura 4.16 – Momento de retirada das estacas do solo. (a) – içamento da estaca através da ferragem, (b) a estaca após a retirada do solo.	119
Figura 4.17 – Estacas após a exumação, mostrando o comportamento da argamassa injetada ao longo do fuste.	120
Figura 4.18 - Estacas após a retirada do excesso de solo para melhor analisar a superfície do fuste.	120
Figura 4.19 – Detalhes das pontas e topo das estacas moldadas para a série dosada com a areia fina.....	121

Figura 4.20 – Detalhes das pontas e topo das estacas moldadas para a série dosada com a areia grossa.....	122
Figura 4.21 – Detalhes das pontas e topo das estacas moldadas para a série dosada com a areia fina e grossa.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficientes KAV e αAV utilizados na expressão de Aoki e Velloso (1975).	7
Tabela 2.2 – Coeficientes β1 e β2 utilizados na expressão de Cabral (1986).	9
Tabela 2.3 - Características da estaca raiz (Alonso, 1996).	12
Tabela 2.4 - Relação entre o diâmetro final da estaca raiz e o tubo utilizado na perfuração (ALONSO, 1996).	17
Tabela 2.5 - Carga admissível relacionado com os diâmetros (Brasfond, 2007).	20
Tabela 2.6 - Fatores que influenciam a trabalhabilidade do concreto no estado fresco (PETRUCCI, 1987).	40
Tabela 2.7 - Desvio padrão a ser adotado de acordo com a condição de preparo do concreto (NBR 12655/ 2006).	57
Tabela 3.1 - Ensaio químicos realizados no cimento (CP IV-RS-32).	64
Tabela 3.2 - Ensaio físicos realizados no cimento (CP IV-RS-32).	65
Tabela 3.3 – Ensaio de resistência mecânica realizada no cimento (CP IV-RS-32).	65
Tabela 3.4 - Composição dos agregados utilizados na pesquisa.	66
Tabela 3.5 – Caracterização física dos agregados utilizados na pesquisa.	68
Tabela 3.6 - Composição dos agregados utilizados na pesquisa.	84
Tabela 3.7 - Dosagens realizadas, onde varia a curva granulométrica do agregado e relação a/c.	85
Tabela 3.8 – Traços encontrados na obra e resultados da tensão de escoamento.	88
Tabela 3.9 – Dosagem realizada no Projeto Experimental I.	90
Tabela 3.10 – Traços sugeridos para a execução das estacas raiz, considerando o $C_c = 600 \text{ kg/m}^3$	93
Tabela 3.11 - Traços sugeridos para a execução das estacas raiz, considerando o $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$	94
Tabela 3.12 – Traços dosados na execução das estacas raiz.	94
Tabela 4.1 – Traços adotados para cada tipo de agregado a partir da Tabela 3.9.	97
Tabela 4.2 – Traços dosados no Projeto Experimental II.	98
Tabela 4.3 – Traços realizados para a concepção do Diagrama de Dosagem.	98
Tabela 4.4 – Proporção dos componentes no volume total da argamassa no estado fresco. .	100
Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de Retenção de água para as argamassas.	103
Tabela 4.6 – Resultados da resistência à compressão axial aos 28 dias.	105
Tabela 4.7 – Resultados da resistência à compressão axial aos 28 dias.	105
Tabela 4.8 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral (fct, sp).	107
Tabela 4.9 – Resultados de resistência à tração na flexão.	108
Tabela 4.10 – Resultados do módulo de elasticidade para c.p.s cilíndricos.	112
Tabela 4.11 – Traços extraídos do Diagrama de Dosagem, definido segundo o $C_c = 600 \text{ kg/m}^3$	116
Tabela 4.12 – Traços extraídos do Diagrama de Dosagem, definido segundo o $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$	116
Tabela 4.13 – Dosagem realizada no Estudo de Campo, definido pelo $C_c = 600 \text{ kg/m}^3$	117
Tabela 4.14 – Dosagem realizada no Estudo de Campo, definido pelo $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$	117
Tabela 4.15 – Resultados da resistência à compressão axial para c.p.s prismáticos cortados.	125
Tabela 4.16 – Resultados de resistência à tração na flexão para c.p.s prismáticos cortados.	125
Tabela 4.17 – Resultados do módulo de elasticidade para c.p.s cilíndricos.	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF1 - série composta apenas por areia classificada como fina;
AF1_C600 - traço dosado no Projeto Experimental II e executado no Estudo de Campo;
AF1_F30 - traço dosado no Projeto Experimental II e executado no Estudo de Campo;
AG1 - série composta apenas por areia classificada como grossa;
AG1_C600 - traço dosado no Projeto Experimental II e executado no Estudo de Campo;
AG1_F30 - traço dosado no Projeto Experimental II e executado no Estudo de Campo;
AGF1 - série composta por 65% de areia grossa e 35% de areia fina;
AGF1_C600 - traço dosado no Projeto Experimental II e executado no Estudo de Campo;
AGF1_F30 - traço dosado no Projeto Experimental II e executado no Estudo de Campo;
AM1 - série utilizada no Piloto 01, contendo;
AM2 - série utilizada no Piloto 01, contendo;
CV - coeficiente de variação (%);
F_T01 - traço dosado no Projeto Experimental I;
F_T02 - traço dosado no Projeto Experimental I;
F_T03 - traço dosado no Projeto Experimental I;
G_T01 - traço dosado no Projeto Experimental I;
G_T02 - traço dosado no Projeto Experimental I;
G_T03 - traço dosado no Projeto Experimental I;
GF_T01 - traço dosado no Projeto Experimental I;
GF_T02 - traço dosado no Projeto Experimental I;
GF_T03 - traço dosado no Projeto Experimental I;
LEM - laboratório de ensaio de materiais;
Sd - desvio-padrão (MPa);
T01 - traço dosado no Piloto 01;
T02 - traço dosado no Piloto 01;
T03 - traço dosado no Piloto 01;
T04 - traço dosado no Piloto 01.

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_P - carga resistida pela ponta;

Q_L - carga resistida por atrito lateral;

S - área da base ou ponta da estaca;

K_{AV} e α_{AV} - coeficientes que dependem do tipo de solo;

F_1 e F_2 - coeficientes corretivos de escala que procuram levar em conta a diferença de comportamento entre a estaca e o cone holandês;

N - número de golpes do SPT (médio das camadas);

U - perímetro da estaca;

Δl = trecho da estaca ao qual se aplica a resistência lateral (unitária);

β_1 e β_2 - coeficientes que variam em função do tipo de solo;

D - é o diâmetro nominal da estaca (cm);

δ - é o acréscimo de pressão no intervalo (kgf/cm²);

R_d - Esforço resistente de cálculo;

A_c - área de seção transversal de concreto;

A'_s - área da seção da armadura longitudinal de compressão;

f_{yk} - área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão (inferior a 6% da seção da estaca);

N - carga de compressão;

f_{ck} - resistência característica da argamassa (20 MPa) ou da nata de cimento (25 MPa);

f_{yk} - resistência característica do aço (para o aço CA 50A, $f_{yk} = 500$ MPa);

F - força aplicada na direção do escoamento;

S - área da superfície exposta ao cisalhamento;

Δv - diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes;

Δy - distância entre duas camadas de fluido adjacentes;

τ_0 - é a tensão cisalhante necessária para o fluido iniciar seu escoamento;

η - é a viscosidade do fluido, definida como a derivada da função $\tau(\dot{\gamma})$, isto é, $\eta = \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}}$;

n - é um expoente relacionado ao comportamento do fluido;

F = força de cisalhamento (N);

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

η = coeficiente de viscosidade (Pa.s);

$\frac{dv}{dx}$ = variação da velocidade ao longo da camada do fluido;

γ = taxa de cisalhamento ou gradiente de velocidade (s-1);
 τ - é a tensão de cisalhamento aplicada;
 γ - é o gradiente de deformação;
 τ_e - é a tensão inicial de escoamento;
 K e n - são parâmetros que caracterizam o comportamento do material;
 f_{cj} - resistência à compressão (MPa) em j dias de idade;
 k_1 e k_2 - constantes que dependem da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura;
 a/c - relação água cimento;
 a - quantidade de água por metro cúbico;
 C_c ou c - quantidade de cimento por metro cúbico;
 $A\%$ - relação água/ materiais secos (%);
 x - relação água/ cimento (g);
 a - areia (g);
 p - brita (g);
 γ_m - massa específica do agregado (t/ m³);
 γ_c - massa específica do cimento (t/ m³);
 D = diâmetro da palheta (m);
 H = altura da palheta (m);
 τ_m = Torque máximo (N.m);
 f_{cj} - é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias (MPa);
 f_{ck} - é a resistência característica do concreto à compressão (MPa);
 S_d - é o desvio-padrão da dosagem (MPa);
 E_{cs} - módulo de elasticidade secante;
 E_{ci} - módulo de deformação tangente inicial;
 E = módulo de deformação à flexão em MPa;
 F = carga aplicada no meio do vão (N);
 l = distância entre apoios (mm);
 b = base do corpo-de-prova (mm);
 d = espessura do corpo-de-prova (mm);
 δ = deslocamento (flecha) no meio do corpo-de-prova (mm);
 I_V - índice de vazios;
 γ - massa unitária da areia (g/ cm³);

δ – massa específica da areia (g/ cm³);
 V_V – volume de vazios da areia (dm³);
 V_a – volume de areia (dm³);
 C_{un} – coeficiente de uniformidade;
 D_{60} – abertura da malha da peneira na qual passa 60% do material (mm);
 D_{10} – abertura de malha da peneira na qual passa 10% do material (mm);
 Ra = retenção de água (%);
 M_{fv} = massa do funil vazio e filtro (g);
 M_{fc} = massa do funil cheio e filtro (g);
 M_{fi} = massa do funil para o tempo “i” de exposição à sucção (g);
 $\frac{a}{af}$ = relação água/argamassa fresca;
 M_w = massa total de água utilizada na argamassa (g);
 M = soma das massas dos componentes anidros da argamassa (cimento cal e areia);
 $f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);
 F = carga máxima obtida no ensaio (kN);
 D = diâmetro do corpo-de-prova (mm);
 L = altura do corpo-de-prova (mm);
 f – resistência à tração na flexão (MPa);
 F – força aplicada (N);
 l – distância entre apoios igual a 100 mm para ensaios em prismas e 160 mm para ensaios em placas isoladas;
 b – largura do corpo-de-prova (mm);
 d – altura do corpo-de-prova (mm);
 σ_i = tensão igual a “i” % da tensão de ruptura (MPa);
 ε_i = deformação longitudinal específica (mm/mm) no corpo-de-prova correspondente à tensão igual a “i” % da tensão de ruptura;
 $f_{ct,sp}$ - resistência à tração indireta (MPa);
 $f_{ct,f}$ - resistência à tração na flexão (MPa);
 f_{ct} – resistência à tração direta (MPa);
 $f_{ct,m}$ – valor médio ou característico da resistência à tração direta (MPa);
 f_{ck} – resistência característica do concreto (MPa);
 $f_{ctk,inf}$ - valor característico inferior da resistência à tração direta (MPa);
 $f_{ctk,sup}$ - valor característico superior da resistência à tração direta (MPa).

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A presente dissertação se insere na linha de pesquisa referente à “Sistemas Construtivos e Desempenho de Materiais e Componentes”, do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC/ UnB). No projeto “Durabilidade, desempenho e inovação nos materiais e técnicas construtivas no Distrito Federal” desenvolvido junto ao Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Universidade de Brasília.

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

O desenvolvimento e utilização da estaca raiz deram-se a partir da década de 50, quando o Professor Fernando Lizzi requereu na Itália as primeiras patentes, nº 497.736 em 11/03/52 e nº 502.416 em 29/12/52, sob a denominação de “Pali Radice” (ALONSO, 1996).

Em 1960 essa técnica construtiva que originalmente foi desenvolvida para reforço de fundações e melhoramento do solo foi difundida pela Europa. Já em 1970, por ocasião do X Convegno di Geotecnica realizado em Bari, na Itália, foi apresentada internacionalmente.

A partir de então, já expiradas as patentes, em vários países foi introduzida essa tecnologia, conhecida por estacas de pequeno diâmetro ($D < 20$ cm) ou microestacas.

Com o passar dos anos houve uma tendência a se utilizar diâmetros cada vez maiores, chegando-se atualmente a até 50 cm, para cargas de 1600kN; substituindo a denominação de pequenos diâmetros por “estacas escavadas com injeção” ou “estacas escavadas injetadas”. A partir de então seu uso deu-se não só como estaca para reforço de fundação, mas também como estaca de uso corrente, utilizável em qualquer condição de obra.

Para garantir a resistência e eficiência da estaca raiz, a NBR 6122/96 apresenta em seu contexto duas orientações de dimensionamento estrutural da estaca dependendo do percentual de aço utilizado. Quando o percentual de aço for menor ou igual a 6%, a peça deve ser dimensionada como pilar de concreto armado, levando-se em conta a verificação de

flambagem, considerando-se a resistência obtida pela argamassa e atingida pela armação. A segunda recomendação é quando for utilizado um percentual de aço superior a 6%, devendo-se considerar que toda a carga será resistida apenas pelo aço, desprezando-se a resistência da argamassa.

A referida norma exige para a argamassa de preenchimento o consumo mínimo de cimento igual a 600 kg/m^3 , com f_{ck} compatível com as técnicas executivas e de controle não superior a 20 MPa, uma vez que a qualidade da argamassa terá grande influência na integridade da estaca e transferência da carga estrutural para o solo.

Apesar da NBR 6122/96 condicionar a eficiência da argamassa de preenchimento ao consumo mínimo de cimento e resistência a compressão, atualmente não se tem como prática, em obras correntes, o controle tecnológico dessas argamassas para o conhecimento das propriedades no estado fresco e endurecido.

Em visitas realizadas em obras localizadas em Brasília e no entorno, foram observadas grandes diferenças nos traços utilizados, constatando-se a existência de exsudação e segregação, bem como a falta de controle durante os procedimentos de dosagem da argamassa, situação também observada por AMARAL e GOMES (2005).

Nesse contexto, há uma desconfiança quanto à eficiência da fundação, sua integridade e capacidade de carga devido à falta de controle das propriedades da argamassa de preenchimento utilizada no processo. É importante ressaltar que o desempenho da estaca raiz depende das propriedades da argamassa, dosagem e o processo executivo.

1.2 **OBJETIVOS DA PESQUISA**

O objetivo geral desta pesquisa é contribuir no estudo e definição de parâmetros aplicáveis às argamassas utilizadas no preenchimento de fundação do tipo estaca raiz, enfatizando principalmente o estudo da dosagem e critérios relacionados à reologia das argamassas, além dos fatores relacionados à bombeabilidade.

Como objetivos específicos, podem ser listados:

- Estudo comportamental no estado fresco;
- Definição de critérios no estado fresco para a produção das argamassas;
- Discussão dos parâmetros definidos pela norma NBR 6122/ 1996 pertinentes à execução de estacas raiz e recomendações;
- Aplicação e adaptação de metodologia experimental para dosagem e estudo das argamassas;
- Discussão da relação entre o material e o processo executivo;
- Proposição e aplicação da avaliação do módulo de elasticidade das argamassas utilizadas no preenchimento de estacas raiz.

Por fim esta pesquisa visa contribuir para a solução de problemas relacionados com as argamassas utilizadas no preenchimento de estacas raiz, através do estudo da influência do agregado miúdo nas características destas argamassas, pois são grandes as variações regionais das areias utilizadas e também das diferenças nas composições granulométricas especificadas para esse material.

1.3 ***ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO***

Este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos, sendo este a introdução que tem um caráter geral de apresentação do tema, indicando não só os motivos que levaram à pesquisa, mas também a importância, as delimitações e os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2 apresentam-se definições sobre a estaca raiz, método de cálculo, processo executivo e normas pertinentes. De posse destes dados, analisam-se as propriedades das argamassas que devem ser investigadas tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Apresentam-se as definições pertinentes às características granulométricas de agregado miúdo, bem como as diversas formas de expressão destas características.

No capítulo 3, descreve-se o procedimento adotado na realização do programa experimental. Inicia-se com a caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa, descrevendo como foram obtidas as diversas areias estudadas. Com as areias definidas, são apresentadas as etapas do programa experimental, indicando-se as variáveis do estudo, os ensaios de caracterização dos materiais e os procedimentos de ensaio empregados na avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

A apresentação e discussão dos resultados é abordada no capítulo 4. Os resultados são normalmente apresentados em formas de tabelas com os valores médios obtidos, enquanto os resultados de todos os corpos-de-prova ensaiados são apresentados nos anexos. Apresenta-se também uma análise comparativa das diversas especificações analisadas.

No capítulo 5 as diversas correlações obtidas são resumidas e apresentadas as conclusões do presente estudo, levando-se em consideração as diversas distribuições granulométricas analisadas. Apresenta-se ainda neste capítulo sugestões de novas pesquisas visando o desenvolvimento das argamassas utilizadas no preenchimento de estacas do tipo raiz.

Nos Anexos são apresentados os resultados de caracterização dos materiais utilizados e os resultados individuais para cada série do estudo, avaliadas na pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTACA RAIZ

2.1.1 DEFINIÇÃO

As estacas raiz são fundações moldadas “in loco”, executadas através de perfuratrizes rotativas e/ou percussivas, utilizando-se revestimento ao longo do furo visando garantir a integridade de seu fuste. Após a sua perfuração, a estaca é armada e preenchida com argamassa fluida (JOPPERT, 2007).

Este tipo de fundação pode ser considerado, de fato, um dos processos mais difundidos no campo das obras para o reforço de fundações, consolidação de taludes e de fundações normais ou do tipo especial.

As principais características típicas de estaca estão relacionadas à alta capacidade de carga, com recalques muito reduzidos. A estaca raiz tem uma capacidade de carga dimensionada em função da resistência lateral, respondendo imediatamente a qualquer movimento da estrutura quando empregada como reforço de fundação, substituindo no todo ou em parte a fundação inicial dependendo da opção técnica do projeto de reforço. Também resiste a cargas de tração elevadas, o que a torna ideal no caso de fundação para torres de linha de transmissão, entre outras.

O processo de perfuração não provoca vibrações e em conjunto com o reduzido tamanho do equipamento (altura de aproximadamente 2m) consegue trabalhar em áreas restritas e com pé-direito reduzido, tornando-se um tipo de fundação particularmente indicada em casos especiais como: reforço de fundações, fundações de obras com vizinhanças sensíveis a vibrações ou poluição sonora, ou em terrenos com presença de matacões e para obras de contenção de talude.

2.1.2 PROJETO DE FUNDAÇÃO DO TIPO ESTACA RAIZ E NORMALIZAÇÃO

As estacas usuais podem ser classificadas em duas categorias: estacas de deslocamento que são introduzidas no terreno através de algum processo que não promova a retirada do solo, e estacas escavadas que são executadas “in situ” através da perfuração do terreno por um processo qualquer, com remoção do material, com ou sem revestimento, com ou sem utilização de fluido estabilizante.

Nessa última categoria enquadram-se as estacas injetadas do tipo raiz que são executadas através de perfuração rotativa ou roto-percussiva, tendo-se uma ferramenta de perfuração conhecida como bits (material de aço-wídea ou diamante) que é capaz de perfurar praticamente qualquer tipo de material (rochas, concreto armado, solos, matações) em qualquer direção.

2.1.2.1 Capacidade de Carga

Uma estaca submetida a um carregamento vertical irá resistir a essa solicitação parcialmente pela resistência ao cisalhamento gerada ao longo de seu fuste e parcialmente pelas tensões normais geradas no nível de sua ponta. Devido ao processo de injeção do fuste considera-se que a estaca raiz transfere a carga predominantemente por atrito ou aderência lateral, pois se considera que, de uma maneira geral, a parcela de ponta atinge somente entre 15 e 20% da parcela lateral (BERBERIAN, 1999).

De acordo com Saes et al (1998) a carga de ruptura em estacas escavadas corresponde a um deslocamento do topo da estaca de 10% de seu diâmetro para argilas e de 30% de seu diâmetro, para solos granulares.

O método de Aoki e Velloso (1975) pode ser utilizado para calcular a capacidade de carga de diversos tipos de estacas submetidos a carregamento por compressão, baseando-se nos resultados das sondagens à percussão (SPT). Neste método, a carga de ruptura do solo (Q_R), que dá suporte a uma estaca isolada, é calculada a partir da soma das parcelas de ponta (Q_P) e de atrito lateral (Q_L). As parcelas de ponta e de atrito na ruptura são dadas, respectivamente, pelas seguintes expressões:

$$Q_p = S \times \frac{K_{AV} \times N}{F_1} \quad \text{Equação 2-1}$$

$$Q_L = \sum U \times \Delta l \times \frac{\alpha_{AV} \times K_{AV} \times N}{F_2} \quad \text{Equação 2-2}$$

Onde:

Q_p - carga resistida pela ponta,

Q_L - carga resistida por atrito lateral,

S - área da base ou ponta da estaca,

K_{AV} e α_{AV} - coeficientes que dependem do tipo de solo,

F_1 e F_2 - coeficientes corretivos de escala que procuram levar em conta a diferença de comportamento entre a estaca e o cone holandês,

N - número de golpes do SPT (médio das camadas),

U - perímetro da estaca,

Δl = trecho da estaca ao qual se aplica a resistência lateral (unitária).

O fator de segurança (FS) recomendado para o emprego desse método é igual a 2,0. O valor de F_1 é igual a 1,75 e F_2 igual a 3,5 para a estaca padrão. A Tabela 2.1 apresenta os valores de K_{AV} e α_{AV} propostos originalmente pelo método Aoki e Velloso.

Tabela 2.1 – Coeficientes K_{AV} e α_{AV} utilizados na expressão de Aoki e Velloso (1975).

Tipo de Solo	K_{AV} (kPa)	α_{AV} (%)
Areia	1000	1,4
Areia siltosa	800	2,0
Areia silto argilosa	700	2,4
Areia argilosa	600	3,0
Areia argilo siltosa	500	2,8
Silte	400	3,0
Silte arenoso	550	2,2
Silte areno argiloso	450	2,8
Silte argiloso	230	3,4
Silte argilo arenoso	250	3,0
Argila	200	6,0
Argila arenosa	350	2,4
Argila areno argilosa	300	2,8
Argila siltosa	220	4,0
Argila silto arenosa	330	3,0

O método proposto por Cabral (1986) é o único desenvolvido especificamente para o cálculo da capacidade de carga de estacas do tipo raiz. Utiliza o coeficiente β_0 , que considera a influência tanto direta, por meio da pressão de injeção, como indireta, por meio do eventual aumento do diâmetro da estaca. O fator de segurança recomendado para a parcela de ponta (FS_P) é de 3,0 e para o atrito lateral (FS_L) é de 2,0 (CARDOSO e MOURA, 2007).

O autor propõe as seguintes expressões para o cálculo das resistências de ponta (Q_P) e lateral (Q_L):

$$\beta_0 = 1 + 0,11 \times \delta - 0,01 \times D \quad \text{Equação 2-3}$$

$$Q_P = \beta_0 \times \beta_2 \times N \leq 50Kgf/cm^2 \quad \text{Equação 2-4}$$

$$Q_L = \beta_0 \times \beta_1 \times N \leq 2Kgf/cm^2 \quad \text{Equação 2-5}$$

Onde:

Q_P - é a carga resistida pela ponta,

Q_L - é a carga resistida por atrito lateral,

N - é o número de golpes do SPT,

β_1 e β_2 - coeficientes que variam em função do tipo de solo,

D - é o diâmetro nominal da estaca (cm),

δ - é o acréscimo de pressão no intervalo (Kgf/cm²).

O valor a ser adotado para δ deve ser analisado em conjunto com a empresa que irá executar as estacas. O valor dos coeficientes β_1 e β_2 utilizados na Equação 2-3 estão apresentados na Tabela 2.2.

Na experiência local de Brasília, utilizam-se os métodos anteriormente citados fazendo-se ajustes nos respectivos coeficientes, obtidos através de provas de carga estáticas em fundações executadas.

Tabela 2.2 – Coeficientes β_1 e β_2 utilizados na expressão de Cabral (1986).

Tipo de Solo	β_1	β_2
Areia	0,070	3,0
Areia muito pouco Siltosa	0,070	2,9
Areia pouco Siltosa	0,075	2,8
Areia Siltosa	0,080	2,7
Areia muito Siltosa	0,080	2,7
Areia muito pouco Argilosa	0,070	2,5
Areia pouco Argilosa	0,075	2,5
Areia Argilosa	0,080	2,3
Areia muito Argilosa	0,080	2,2
Silte	0,050	1,8
Areia muito pouco Arenoso	0,050	1,8
Areia pouco Arenoso	0,055	1,9
Areia Arenoso	0,060	2,0
Areia muito Arenoso	0,060	2,2
Areia muito pouco Argiloso	0,040	1,6
Areia pouco Argiloso	0,040	1,4
Areia Argiloso	0,035	1,2
Areia muito Argiloso	0,035	1,1
Argila	0,050	1,0
Areia muito pouco Arenosa	0,050	1,3
Areia pouco Arenosa	0,050	1,6
Areia Arenosa	0,050	2,0
Areia muito Arenosa	0,060	2,2
Areia muito pouco Siltosa	0,040	1,3
Areia pouco Siltosa	0,040	1,4
Areia Siltosa	0,040	1,5
Areia muito Siltosa	0,040	1,6

2.1.2.2 Dimensionamento Estrutural

De acordo com Alonso (1996) a carga admissível máxima estrutural das estacas escavadas injetadas é resultante da resistência estrutural dos materiais que a compõem, de modo a garantir um coeficiente de segurança global à ruptura mínimo de 2. Esta carga é a máxima possível a adotar para a estaca, devendo a carga admissível final ser calculada pelos métodos de transferência de carga para o solo.

Para o cálculo da capacidade de carga estrutural à compressão o atual texto da NBR 6122/1996 divide as estacas escavadas injetadas em dois grupos:

- A. Estacas que utilizam aço com resistência característica de até 500 MPa e percentagem de aço inferior a 6%. Neste caso o dimensionamento será feito como pilar de concreto armado levando-se em conta a flambagem e considerando para seção transversal da argamassa a área da estaca reduzida da área da armadura;
- B. Estacas que utilizam aço com resistência característica superior a 500MPa ou percentagem de aço superior a 6%. Neste caso despreza-se a contribuição da capacidade de carga da argamassa sendo toda a carga resistida pela armadura.

Com base na formulação proposta por Alonso (1993), o cálculo das cargas admissíveis estruturais máximas para as estacas raiz para o CASO (A) está descrita a seguir:

$$R_d = 2 \times N = A_c \times 0,85 \times f_{ck} + A'_s \times f_{yk} \quad \text{Equação 2-6}$$

$$A_c = \frac{\pi \times D^2}{4} - A'_s \quad \text{Equação 2-7}$$

Temos que:

$$A'_s = \frac{2 \times N - 0,6 \times D^2 \times f_{ck}}{0,9 \times f_{yk} - 0,765 \times f_{ck}} \quad \text{Equação 2-8}$$

Onde:

R_d - Esforço resistente de cálculo,

A_c - área de seção transversal de concreto,

A'_s - área da seção da armadura longitudinal de compressão,

f_{yk} - área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão (inferior a 6% da seção da estaca),

N - carga de compressão,

f_{ck} - resistência característica da argamassa (20 MPa) ou da nata de cimento (25 MPa),

f_{yk} - resistência característica do aço (para o aço CA 50A, $f_{yk} = 500$ MPa).

A NBR 6122/ 1996 no item 7.8.10.3.1 especifica que o consumo de cimento da argamassa não seja inferior a 600 kg/ m³. Ainda neste item, recomenda-se considerar, no cálculo acima,

para a resistência da argamassa um valor de f_{ck} compatível com as técnicas executivas e de controle, não superior a 20 MPa.

A norma não recomenda um traço a ser utilizado, pois cada região deve ter uma dosagem específica aos materiais locais, mas quando recomenda um consumo de cimento maior ou igual a 600 kg/ m³, assegura que a argamassa a ser utilizada tenha elevada resistência à compressão. Entretanto, apesar do alto consumo de cimento a norma deixa clara a falta de controle no processo executivo, pois limita o valor da resistência da argamassa (f_{ck}) no cálculo a apenas 20 MPa, minorando a possível contribuição da mesma no funcionamento estrutural da peça.

Quando as estacas escavadas injetadas utilizam aço com resistência característica superior a 500 MPa ou percentagem de aço superior a 6%, *CASO (B)*, é desprezada a contribuição da argamassa e neste caso a Equação 2-9 passa a ser:

$$A'_s = \frac{2 \times N}{0,9 \times f_{yk}} \quad \text{Equação 2-9}$$

Onde:

A'_s - área da seção da armadura longitudinal de compressão,

N - carga de compressão,

f_{yk} - resistência característica do aço (para o aço CA 50A, $f_{yk} = 500$ MPa).

A NBR 6118/ 2007 recomenda que o diâmetro dos estribos não deve ser inferior a 5 mm nem a 1/ 4 do diâmetro da barra isolada. O espaçamento longitudinal deve ser igual ou inferior ao menor dos seguintes valores:

- 200 mm,
- Menor dimensão da seção,
- $12 \times \emptyset$ para aço CA-50,

O cálculo da armadura para uma estaca submetida a uma força de tração ' T ' é obtida pela Equação 2-9 substituindo-se o ' N ' por ' T ' (carga de tração) e adotando-se para A'_s a área útil das barras calculada com diâmetro 2 mm inferior ao diâmetro real da barra.

A NBR 6122/ 1996 não faz recomendação quanto ao espaçamento mínimo entre as estacas, sendo comum adotar as distâncias indicadas na Tabela 2.3, de acordo com Alonso (1996).

Tabela 2.3 - Características da estaca raiz (Alonso, 1996).

Diâmetro final da estaca	(mm)	100	120	150	160	200	250	310	410
Área da seção transversal da estaca	(cm ²)	79	113	177	201	380	491	755	1320
Momento de inércia	(cm ⁴)	491	1018	2485	3217	7854	19175	45333	138709
Perímetro da estaca	(cm)	31	38	47	50	63	79	98	126
Distância mínima entre eixos	(cm)	60	60	60	60	70	80	100	130
Distância do eixo à divisa	(cm)	30	30	30	30	30	30	30	30

2.1.3 EXEMPLOS DE OBRAS

Desde maio de 2005 até dezembro de 2006 foi realizada a construção da nova ponte sobre o Rio das Ostras. A antiga ponte sobre o Rio das Ostras não atendia à nova demanda de transporte. Suas duas pistas de rolamento em apenas um sentido e as calçadas com 50 cm de largura eram, de fato, insuficientes. A nova ponte teve que ser formatada para atender ao crescente fluxo de veículos e permitir a travessia segura de pedestres e ciclistas, além de estabelecer-se como referência urbana para a cidade (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Ponte estaiada sobre o Rio das Ostras no Rio de Janeiro (GRISOLLI, 2007)

A ponte estaiada é formada por uma estrutura mista, na qual os mastros de concreto encontram um tabuleiro com vigas longitudinais metálicas e laje em concreto. O comprimento total do tabuleiro é de 66 m e compreende quatro pistas de rolamento e calçadas em ambos os lados, com uma largura total de 22 m. Cada mastro está disposto sobre fundações do tipo estaca raiz, de 41cm de diâmetro e comprimento médio de 24 m cada (SAYEGH, 2007).

Outra obra foi a construção do Shopping Bourbon Pompéia, com 210 lojas e dez salas de cinema, situado no cruzamento da Avenida Francisco Matarazzo com a Avenida Pompéia, em São Paulo (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Fachada do Shopping Bourbon Pompéia em São Paulo. (07. JPG, 2008)

Uma obra de reforço estrutural que se pode citar foi a Ponte sobre o Rio Paraguai, no km 733 da BR-070, em Cáceres, estado do Mato Grosso, onde foram realizadas fundações do tipo estacas raiz (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Execução de estaca raiz no reforço de um pilar, ponte sobre o Rio Paraguai. (09.JPG, 2008).

Por último, será exemplificada a obra do Terminal Marítimo COPAPE, na Ilha do Barnabé em Cubatão, onde as fundações dos tanques de armazenamento (devido o solo ser muito diversificado) tiveram vários tipos de fundações. Em um desses tanques foi especificado a utilização de estacas raiz, tendo 20m de comprimento em solo e 4m avançados em rocha. A Figura 2.4 mostra a base de concreto armado executada para a instalação do tanque de armazenamento.



Figura 2.4 - Base de concreto armado construída para fixação dos tanques de armazenamento na COPAPE, Ilha do Barnabé.

2.1.4 PROCESSO CONVENCIONAL DE EXECUÇÃO DA ESTACA RAIZ

A execução de uma estaca raiz compreende as seguintes etapas executivas: locação, perfuração, armação, concretagem, extração do revestimento e injeção de ar comprimido.

2.1.4.1 Locação das estacas

Primeiramente deve-se realizar a locação dos pontos onde serão executadas as estacas. Locação é o processo de transferência, do projeto para o terreno, de todas as referências necessárias à construção da obra. Todas as etapas de locação devem ser acompanhadas pelo engenheiro responsável, para que não haja desvios e excentricidades não previstas no projeto.

2.1.4.2 Perfuração

A escavação das estacas é executada através de uma perfuratriz rotativa hidráulica ou roto percussiva. A Figura 2.5 mostra um modelo de perfuratriz.



Figura 2.5 - Perfuração da estaca raiz: (a) lateral esquerda do equipamento, (b) lateral direita do equipamento, onde fica o painel de comando, (c) circulação de água no interior do tubo, (d) alguns tipos de coroas de perfuração e extremidades rosqueadas dos tubos metálicos.

A perfuração em solo é realizada por rotação de tubos com auxílio de circulação de água, que é injetada pelo interior deles e retorna à superfície entre a face externa do tubo e o solo. Na extremidade inferior do tubo de revestimento é acoplada a coroa de perfuração, ou de haste de perfuração para facilitar a penetração, e à medida que a perfuração avança devem ser instalados os tubos de revestimentos metálicos, emendados por rosca, até a profundidade previamente estabelecida no projeto. Os tubos metálicos são posteriormente recuperados após a instalação da armadura e preenchimento do furo com argamassa.

Este tipo de estaca pode ser utilizada em qualquer tipo de terreno; podendo atravessar vários tipos de obstáculos e ter diferentes inclinações. Quando a execução da estaca raiz é realizada em camadas de solo de pouca resistência sobrejacentes ao topo rochoso, é necessário o embutimento da estaca em rocha, utilizando-se um sistema de perfuração a roto-percussão com martelo de fundo (down-the-hole) e bits de vídia, internamente ao tubo de revestimento no trecho em solo, com diâmetro reduzido em rocha. A perfuração em terrenos arenosos, constituídos de pedregulhos, com presença de matações, com nível d'água elevado, é praticamente impossível pelos métodos de perfuração convencionais. Para solucionar o problema, a FUNDESP (Fundações Especiais) dispõe de martelo down-the-hole tipo Tubex que reveste o furo simultaneamente à perfuração.

O revestimento deve ser instalado preferencialmente em toda a extensão da perfuração, caso as características do terreno o permitam, ou pode ser parcial, mas com comprimento que permita aplicar, com garantia de não ser arrancado, golpes de ar comprimido após o preenchimento do furo com argamassa. Neste caso a perfuração abaixo da cota dos tubos é feita também por rotação, com auxílio de circulação d'água, utilizando-se uma ferramenta cortante denominada tricône.

Os resíduos da escavação serão transportados para a superfície pela água de circulação que é injetada sob pressão, de cima para baixo no interior do tubo de revestimento. O retorno de água juntamente com o resíduo da escavação dar-se-á entre o revestimento e a parede do furo, a qual poderá ser coletada em um tanque de decantação, evitando-se o espalhamento da água e podendo-se reutilizá-la no próximo furo.

A movimentação da água no interior do furo determina que o diâmetro acabado da estaca seja sempre maior que o diâmetro nominal do instrumento de perfuração. A Tabela 2.4 mostra a relação entre o diâmetro final da estaca raiz e o diâmetro externo do tubo de revestimento.

Tabela 2.4 - Relação entre o diâmetro final da estaca raiz e o tubo utilizado na perfuração (ALONSO, 1996).

Diâmetro nominal da estaca raiz	(mm)	100	120	150	160	200	250	310	400
Diâmetro externo do tubo de revestimento	(mm)	89	102	127	141	168	220	273	356

É permitida a reutilização da água de circulação proveniente do decantador durante a perfuração. Entretanto, após atingir a profundidade do projeto, a limpeza final do furo deverá ser executada com o emprego de água limpa. A limpeza final do furo dar-se-á por concluída quando a água de circulação retornar à superfície, limpa ou com pouca turbidez. Durante a fase final de limpeza do furo, a haste de perfuração deverá permanecer paralisada.

2.1.4.3 Armadura

Concluída a perfuração da estaca com a inclinação e profundidade previstas (cota de projeto) deve-se continuar a injetar água, sem avançar a perfuração, a fim de promover a limpeza do furo. A seguir deve ser introduzida na parte interna da tubulação a armação da estaca, de acordo com o especificado pelo projetista. Observa-se na Figura 2.6 o momento de colocação da armação ao longo do tubo, com o auxílio de um guindaste para o posicionamento no furo.



Figura 2.6 – (a) modelo de ferragem usualmente utilizada para estaca raiz, (b) Colocação da armação após a perfuração, (c) a armação abrange todo o comprimento do fuste .

A armação deve ser implantada ao longo de toda a estaca, podendo ter quantidade de aço transversal variável de acordo com os esforços atuantes. Nas estacas que tem funcionamento à compressão as emendas das barras podem ser feitas por simples transpasse, devidamente fretado, porém nas estacas que tem funcionamento à tração, as emendas devem ser feitas por solda, luvas rosqueadas, ou luvas prensadas.

A armadura pode ser constituída por monobarra ou feixe de aço (várias barras de aço) com estribo helicoidal formando uma “gaiola”, no formato de um tubo metálico, ou ainda uma mescla dessas alternativas. O cobrimento deve ser de mínimo de 2 cm.

2.1.4.4 Preenchimento com argamassa

Concluída a limpeza do furo e a colocação da armadura necessária ao longo da estaca, coloca-se o tubo (de aço galvanizado, ou PVC rígido) de concretagem até o fundo da perfuração lançando a argamassa de baixo para cima, garantindo que a água seja deslocada para fora sendo simultaneamente substituída pela própria argamassa.

A concretagem é efetuada sob pressão, rigorosamente controlada, dependendo do tipo do solo, profundidade do furo, consistência do solo, maior ou menor obstrução lateral, etc.

Concluída a injeção da argamassa em toda a seção e extensão da estaca, deve-se iniciar a retirada dos segmentos de tubos através do auxílio de macacos extratores hidráulicos. Nessa etapa concomitantemente executa-se a injeção de ar comprimido sobre o topo do revestimento metálico garantindo a integridade do fuste e também a perfeita aderência da estaca com terreno.

A retirada do revestimento poderá ser executada também com o próprio equipamento de perfuração através do desrosqueamento dos segmentos de tubos superiores. Conforme se observa na Figura 2.7.

Essas operações são repetitivas, e deve-se adicionar argamassa para o completo preenchimento do tubo, mantendo-se o seu nível sempre acima da coroa de perfuração.



(a)



(b)

Figura 2.7 – (a) Preenchimento do furo com argamassa, (b) desrosqueamento e retirada dos tubos.

A pressão de ar comprimido aplicada, pode variar de 0,3 MPa até 0,5 MPa, é determinada pela absorção do terreno e serve também para evitar a descontinuidade da argamassa injetada.

2.1.4.5 Preparo da cabeça da estaca

O excesso de argamassa gerado pelo processo de preenchimento até a superfície do terreno deverá ser demolido, no mínimo um dia após a execução da estaca, utilizando-se marreta e talhadeira com pequenas inclinações em relação à horizontal, porém mantendo a seção da estaca perpendicular ao seu eixo.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (ABEF) a cabeça da estaca deve ser embutida no mínimo 5,0 cm dentro do bloco, e acima do lastro de concreto, assegurando que a estaca ficará devidamente ancorada ao bloco de fundação (ABEF, 2007).

O uso de estacas raiz é uma solução interessante principalmente nas seguintes situações: (1) substituição ou acréscimo das instalações existentes por novos equipamentos de maior

potência com novos carregamentos. Geralmente estas substituições são executadas nas proximidades ou no interior de estruturas existentes e não se deve interromper a produção fabril. (2) estabilização de grandes máquinas com peças de movimento rápido que apresentam vibrações elevadas. O uso de estacas raiz, executadas através do bloco das fundações existentes, modifica a inércia das fundações e elimina as vibrações danosas.

A existência de modernos equipamentos que permitem a execução de estacas raiz com altas médias de produtividade e o uso de cargas de trabalho de até 1600 KN (160 tf), aumentaram muito a competitividade da estaca raiz em obras normais. Além disso, esta estaca possui a vantagem de resistir a cargas de tração muito elevadas, sendo ideal para as fundações de várias obras especiais, desde torres de linha de transmissão até plataformas de petróleo. Atualmente podemos afirmar que em vários casos da prática corrente da engenharia de fundações, esse tipo de estaca constitui a melhor opção técnico-comercial.

Os diâmetros e cargas de trabalho normalmente utilizados estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Carga admissível relacionado com os diâmetros (Brasfond, 2007).

Diâmetro (mm)		Carga de Trabalho (kN)
Perfuração	Acabado	
82	100	100
101	120	150
114	140	200
127	150	250
140	160	350
168	200	500
220	250	700
275	310	1000
355	400	1300
406	500	1600

Por fim a Figura 2.8 apresenta um fluxograma que descreve as etapas executivas, de acordo com o tipo de solo, para a execução de estacas tipo raiz:

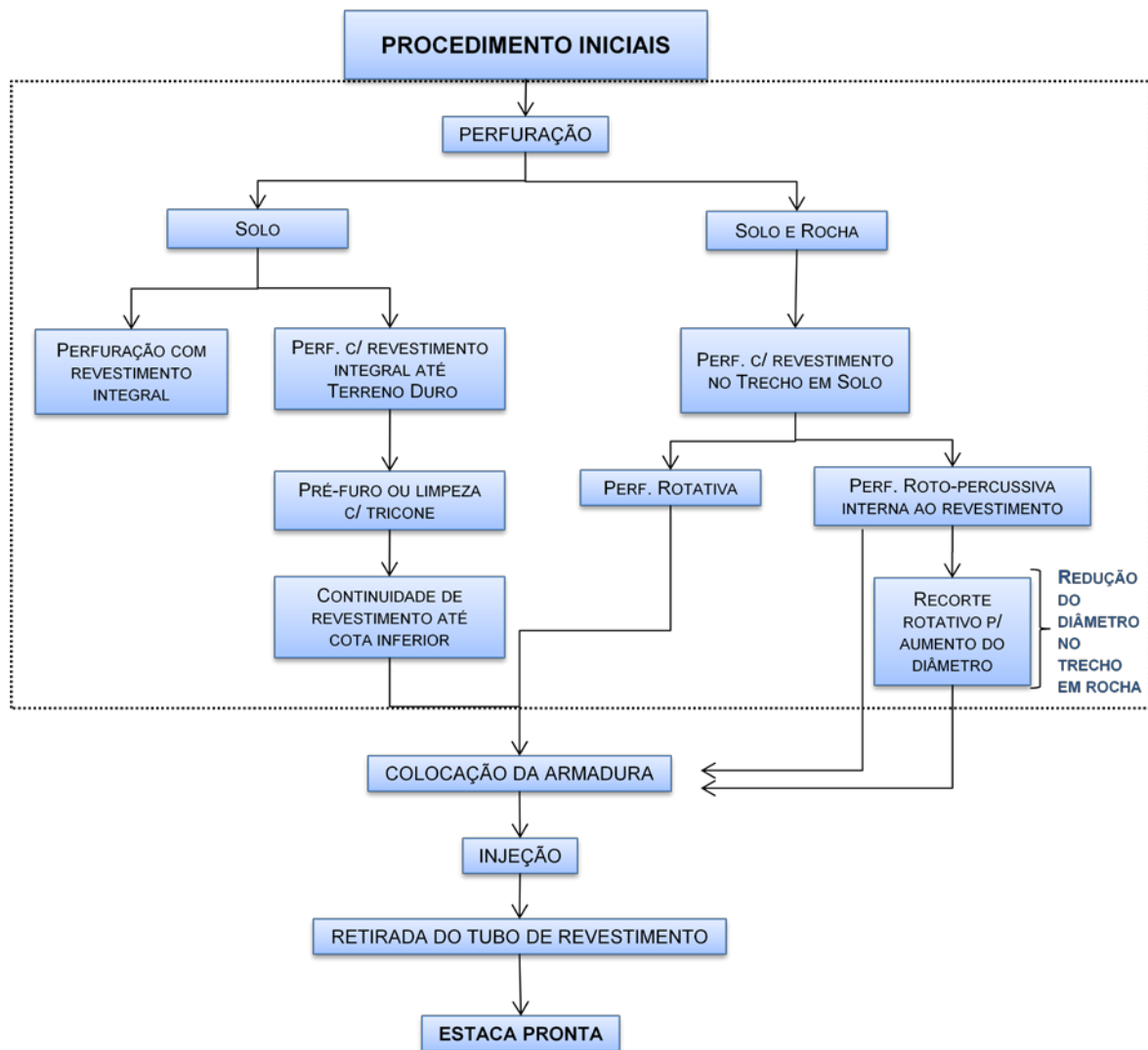


Figura 2.8 – Fluxograma executivo da estaca raiz (ABEF, 2007).

2.2 ARGAMASSAS

A argamassa no estado fresco pode ser considerada uma suspensão aquosa concentrada composta de partículas sólidas (agregados) imersos em um fluido viscoso (pasta cimentícia ou matriz). A pasta é um fluido heterogêneo composto de cimento, e água. Essas partículas interagem quando em meio aquoso e essas interações exercem influência nas propriedades da composição, tanto em repouso quanto sob fluxo, as quais podem apresentar diferentes comportamentos reológicos possíveis, na qual estão relacionadas a tensão de escoamento e a viscosidade com a taxa de cisalhamento.

As argamassas devem cumprir diversas funções específicas, possuindo na sua composição materiais de diversas formas. Tanto as características dos materiais que são utilizados, quanto as suas proporções, exercem influências sobre as propriedades das argamassas, sejam no estado fresco como no estado endurecido. Normalmente depara-se com problemas regionais de variação dos materiais, uso de traços com proporções variáveis, inclusive dentro de uma mesma região.

Atualmente, é cada vez mais discutida, no meio científico, a necessidade de uma avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco, a partir de modelos de natureza quantitativa, que possibilitem uma caracterização menos empírica de seu comportamento.

A capacidade de uma pasta recentemente misturada de fluir ou ser deformada plasticamente é uma importante propriedade para a tecnologia do concreto. Os termos usuais para estas propriedades são: consistência, trabalhabilidade e plasticidade. A trabalhabilidade não pode ser medida adequadamente de uma maneira quantitativa, pois resulta da combinação de diversas propriedades intrínsecas e extrínsecas da mistura fresca. Algumas dessas propriedades podem ser medidas e expressadas numericamente, mas outras não (POPOVICS, 1982).

No estado fresco a mistura deve apresentar trabalhabilidade adequada de acordo com os meios disponíveis para o transporte, lançamento e adensamento, enquanto que, no estado endurecido, a argamassa deve possuir as características especificadas no projeto (resistência, durabilidade, rigidez, retração, fluência, calor de hidratação, permeabilidade, etc.) compatíveis com as solicitações impostas. Todas essas propriedades exigidas devem ser conseguidas com o menor custo possível, para que a obra seja economicamente viável.

2.2.1 REOLOGIA

Machado (2002) define reologia como sendo a ciência que estuda como a matéria se deforma ou escoar, quando está submetida a esforços originados por forças externas. Neste contexto, considerando que a matéria pode ser classificada como sólida, líquida ou gasosa, a deformação de um sólido pode ser caracterizada por leis que descrevem a alteração de seu volume, tamanho ou forma, enquanto o escoamento de um fluido, líquido ou gás, é

caracterizado por leis que descrevem a variação contínua da taxa ou grau de deformação em função das forças ou tensões aplicadas.

O comportamento reológico no estado fresco é descrito através de relações matemáticas entre a tensão cisalhante aplicada (τ) e sua respectiva deformação (γ), além de variações em função do tempo no caso do concreto no estado fresco. Para simular situações reais de seu comportamento, são utilizadas formulações teóricas baseadas em métodos empíricos que, no entanto, nem sempre fornecem boa aproximação com os resultados experimentais. Para minimizar possíveis erros destas formulações, é necessário primeiro entender os mecanismos que controlam a reologia dos concretos. Em seguida, usá-los adequadamente na elaboração destas formulações teóricas (SILVA, 2004).

A deformação de um corpo pode ser dividida em dois tipos:

- deformação espontânea e reversível, conhecida também como elasticidade que ocorre em sólidos;
- deformação irreversível, conhecida como fluxo ou escoamento que ocorre em líquidos ou gases.

O trabalho usado na deformação de um corpo perfeitamente elástico é recuperado quando o corpo retorna ao seu estado original não deformado, enquanto que o trabalho usado para manter o escoamento é dissipado como calor e não é mecanicamente recuperado. A elasticidade corresponde à energia mecanicamente recuperável, e a viscosidade ou resistência friccional corresponde à energia mecânica convertida em calor (MACHADO, 2002).

Navarro (1997) afirma que nos fluidos todas as deformações envolvem algum tipo de escoamento, o que torna seus efeitos totalmente irreversíveis, salvo nos casos dos fluidos viscoelásticos onde parte da deformação pode ser recuperada.

A Figura 2.9 mostra um esquema representativo para a deformação por cisalhamento simples, o qual foi utilizado por Newton para a elaboração e sua lei para a viscosidade. Assim como o módulo σ é para os sólidos, a viscosidade é uma propriedade determinante para usos e aplicações dos materiais fluidos.

Estando o fluido confinado entre as duas placas paralelas e planas, este estará submetido ao movimento da placa superior em relação à inferior que se encontra parada. Este movimento friccional produz um gradiente para a velocidade do fluido, a qual vai desde zero na interface com a placa inferior até o valor máximo representado pela velocidade da placa superior.

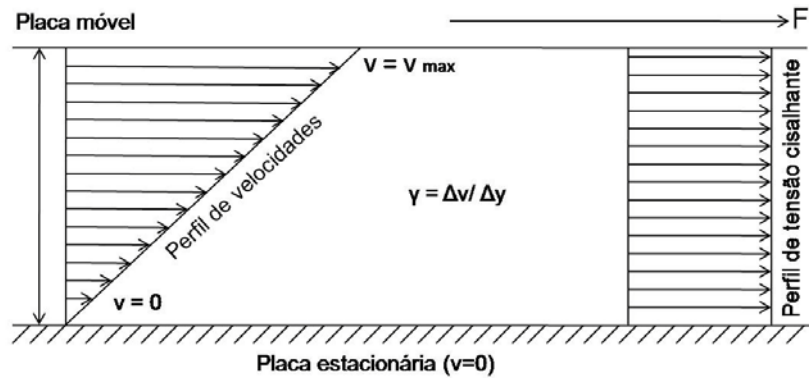


Figura 2.9 - Fluido viscoso entre placas, cisalhado por uma força aplicada na placa superior.

Tensão de cisalhamento (τ) é a força por unidade de área cisalhante, necessária para manter o escoamento do fluido. A resistência ao escoamento é quem solicita esta tensão, que pode ser expressa por:

$$\tau = \frac{F}{S} \quad \text{Equação 2-10}$$

Onde:

F – força na direção do escoamento;

S – área da superfície exposta ao cisalhamento;

Taxa de cisalhamento (γ) é o deslocamento relativo das partículas ou planos de fluido, sendo definida através de uma expressão matemática que relacione a diferença das velocidades entre duas partículas ou planos vizinhos com a distância entre eles.

$$\gamma = \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad \text{Equação 2-11}$$

Onde:

Δv - diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes;

Δy - distância entre duas camadas de fluido adjacentes;

Pode-se escrever a seguinte equação constitutiva que caracteriza, de forma geral, o comportamento dos fluidos:

$$\tau = \tau_0 + \eta(\dot{\gamma})^n \quad \text{Equação 2-12}$$

Onde:

τ_0 - é a tensão cisalhante necessária para o fluido iniciar seu escoamento;

η - é a viscosidade do fluido, definida como a derivada da função $\tau(\dot{\gamma})$, isto é, $\eta = \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}}$;

n - é um expoente relacionado ao comportamento do fluido: $n < 1$ (comportamento pseudoplástico); $n = 1$ (comportamento newtoniano) e $n > 1$ (comportamento dilatante).

A viscosidade (η) expressa a resistência do fluido ao escoamento (em situação de fluxo), podendo ser considerada como o atrito interno, que resulta quando uma película do fluido é forçada a mover-se em relação à outra adjacente (SOUZA e LARA, 2005).

É conveniente descrever o comportamento reológico de um material graficamente, em um sistema de coordenadas onde o eixo vertical representa a taxa de fluidez, a taxa de cisalhamento, ou outras características relacionadas à fluidez, onde o eixo horizontal representa a força motora, ou a tensão de cisalhamento, ou outra característica relacionada à causa da fluidez, como pode ser observado pela Figura 2.10, a qual descreve o comportamento dos fluidos.

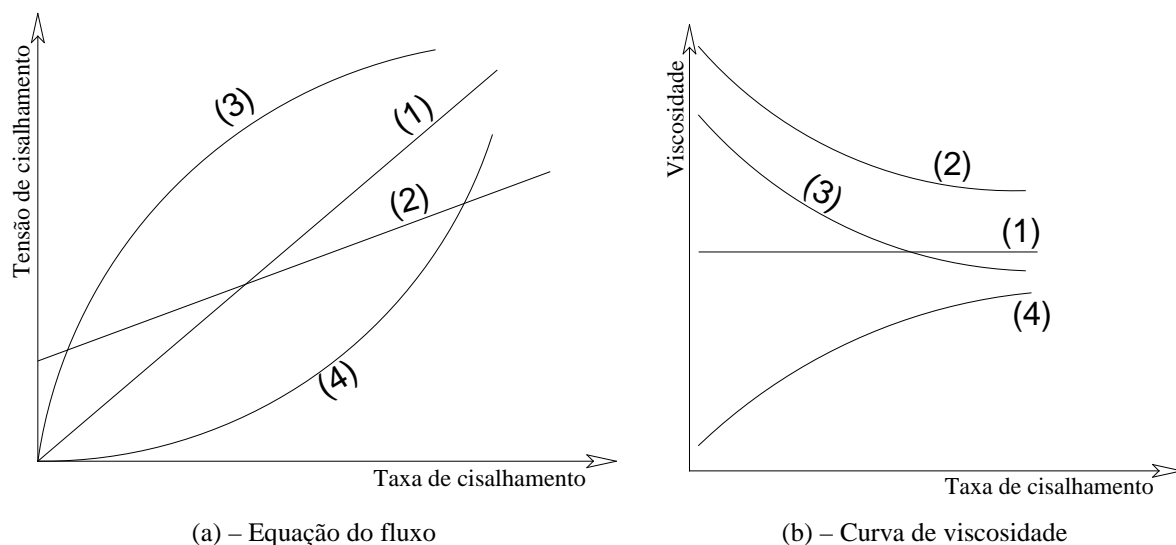


Figura 2.10 - Comportamento de fluidos: (1) - Fluido newtoniano, (2) - Fluido de Bingham, (3) - Fluido pseudoplástico e (4) - Fluido Dilatante (MACHADO, 2002)

2.2.2 CLASSIFICAÇÃO DO MODELO REOLÓGICO

2.2.2.1 Fluidos Newtonianos

São denominados Fluidos Newtonianos todos os materiais que exibem uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento (também denominada de gradiente de velocidade), que está demonstrado pela reta “1” na Figura 2.10. Esse tipo de fluido é conhecido como corpo viscoso ideal. Um material de comportamento newtoniano não pode sustentar deformações prolongadas, pois essas são aliviadas pelo escoamento.

A inclinação da reta representa a fluidez e o valor recíproco da reta é o coeficiente de viscosidade (η). Que é definido por:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} = \eta \gamma \quad \text{Equação 2-13}$$

Onde:

F = força de cisalhamento (N);

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

η = coeficiente de viscosidade (Pa.s);

$\frac{dv}{dx}$ = variação da velocidade ao longo da camada do fluido;

γ = taxa de cisalhamento ou gradiente de velocidade (s⁻¹).

A Lei de Newton representa um importante passo para o entendimento do comportamento de um fluido sob escoamento ocasionado por cisalhamento. Tal modelo impõe que a viscosidade seja apenas mutável mediante a variação de temperatura e pressão.

Segundo BARNES *et al.* (1989) a viscosidade expressa a resistência do fluido ao escoamento devido à fricção interna que resulta quando uma película do fluido é forçada a mover-se em relação à outra adjacente. Materiais altamente viscosos possuem um elevado atrito interno, fluindo com maior dificuldade do que materiais menos viscosos.

Muitos fluidos são newtonianos, como por exemplo, a água, solventes, soluções muito diluídas, óleos minerais e fluidos de silicone.

2.2.2.2 Fluidos Não-Newtonianos

A maioria dos fluidos não obedece ao modelo de Newton, possuindo viscosidade que depende ou do cisalhamento aplicado ou do tempo de sua aplicação, sendo então denominada de '*viscosidade aparente*'. A viscosidade aparente é obtida através da curva gerada pelo gráfico tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento (não-lineares), traçando-se uma reta que liga um ponto particular da curva com a origem, tem-se a inclinação desta reta igual a viscosidade aparente.

Os fluidos não-newtonianos podem ser divididos em três grandes classes: os independentes do tempo, os dependentes do tempo e os viscoelásticos, conforme mostra a Figura 2.11.

Os fluidos independentes do tempo são aqueles cujas propriedades reológicas não dependem do tempo de sua agitação ou repouso. A taxa de deformação em qualquer ponto é somente função da tensão naquele ponto. Os fluidos desta classe estão enquadrados em três grupos: fluidos pseudoplásticos e fluidos dilatantes e fluidos de Bingham (ou plásticos).

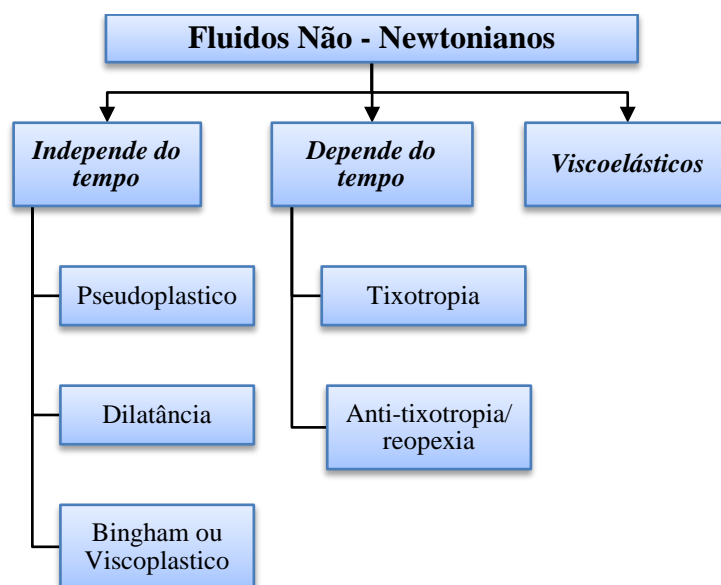


Figura 2.11 – Representação esquemática dos fluidos não - newtonianos.

No comportamento ***Pseudoplástico*** a viscosidade (η) do fluido diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, conforme pode ser observado na Figura 2.10 pela curva (3). Em repouso, estes materiais matêm uma certa ordem interna irregular, sendo caracterizados, portanto, por uma alta resistência interna contra o fluxo, isto é, a sua alta viscosidade. Com o aumento da taxa de cisalhamento, muitas partículas dispersas, lineares ou laminares alinham-se na direção do fluxo, isto é, paralelamente na direção da força que o sustenta. Este alinhamento entre partículas facilitam o deslizamento em fluxo, reduzindo a viscosidade (MACHADO, 2002).

O comportamento de ***Dilatância***, ao contrário da pseudoplasticidade, é marcado pelo aumento da viscosidade (η) do fluido à medida que se eleva a taxa de cisalhamento. O comportamento é típico de fluidos com alta concentração de sólidos, onde as partículas estão densamente empacotadas e a quantidade de dispersante é suficiente, apenas, para preencher os espaços vazios entre as partículas. Sob baixas taxas de cisalhamento o dispersante lubrifica as superfícies das partículas e permite uma fácil mudança posicional. Então, a pasta comporta-se como um líquido viscoso. Em altas taxas de cisalhamento, o fluxo do líquido entre os grãos é dificultado pelo aumento do número de colisões entre as partículas causando um ligeiro acréscimo de volume. Neste caso, a quantidade de pasta é insuficiente para ser distribuído entre todas as partículas dispersas. Uma vez que a quantidade de pasta não é suficiente para preencher todos os espaços interpartículas e mantê-las lubrificadas, então o sistema se torna mais viscoso (MACHADO, 2002).

Os fluidos viscoelásticos são sistemas que apresentam características de fluxo viscoso com comportamento elástico.

Os modelos mais utilizados para reproduzir o comportamento reológico da argamassa são: de ***Herschell-Buckley e de Bingham*** (POPOVICS, 1982).

2.2.3 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA ARGAMASSA

As argamassas no estado fresco podem ser consideradas um material intermediário entre um fluido e partículas úmidas empacotadas. É um fluido homogêneo e incompressível que pode ser estudado pela ciência da reologia desde que obedeça aos seguintes critérios:

- Não segregue durante o escoamento;
- Seu volume permaneça constante durante o processo de cisalhamento, isto é, seja incompressível;
- Tenha trabalhabilidade desejada.

2.2.3.1 Modelo de Herschell-Buckley

O concreto no estado fresco se adapta muito bem ao modelo de *Herschell-Buckley*, também conhecido como fluido de potência com limite de escoamento. O modelo assume a relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de deformação é descrito segundo a Equação 2-14:

$$\tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad \text{Equação 2-14}$$

Onde:

τ - é a tensão de cisalhamento aplicada;

$\dot{\gamma}$ - é o gradiente de deformação;

τ_0 - é a tensão inicial de escoamento;

K e n - são parâmetros que caracterizam o comportamento do material.

Quando uma força externa é aplicada sobre o sistema for menor do que a força equivalente que forma a estrutura molecular da argamassa, ocorre apenas uma deformação elástica. Somente quando a força externa for maior do que a força da rede é que esta se desfaz e provoca uma mudança de posição irreversível num elemento de volume. A tensão que ultrapassa este ponto é denominada de ‘limite de escoamento real’ (τ_0) (MACHADO, 2002).

2.2.3.2 Modelo de Bingham

O modelo de Bingham, ou fluido Viscoplastico, é uma particularização do modelo de *Herschell-Buckley*, onde se considera o parâmetro n da Equação 2-14 igual a 1, sendo que o parâmetro K passa a ser escrito como μ (viscosidade plástica medida em Pa.s).

Desta forma, o fluido de *Bingham* (Figura 2.12) é caracterizado por dois parâmetros físicos: tensão inicial de escoamento (τ_0) e viscosidade plástica (μ), podendo ser escrito conforme a Equação 2-15:

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \dot{\gamma} \quad \text{Equação 2-15}$$

Onde:

τ - é a tensão de cisalhamento aplicada;

$\dot{\gamma}$ - é o gradiente de deformação;

τ_0 - é a tensão inicial de escoamento;

μ - coeficiente de viscosidade.

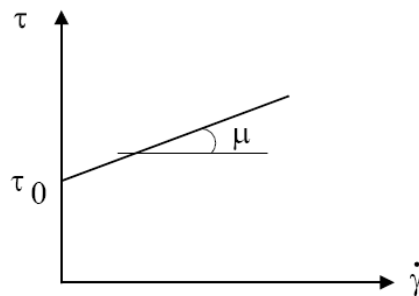


Figura 2.12 – Gráfico de tensão versus deformação

2.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

2.3.1 INFLUÊNCIA DA PASTA E DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

Os concretos e as argamassas são tratados como suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (pasta). Por sua vez, sabe-se que a pasta não é um fluido homogêneo e sim composto de partículas em um líquido, no caso a água.

A influência da distribuição granulométrica do agregado (areia) nas propriedades das argamassas pode ser observada no estado fresco e endurecido. Assim, partindo-se da idéia de que a argamassa é composta por materiais considerados ativos e inertes, a interação desses denomina-se de efeito sinérgico, onde cada componente da argamassa contribui para o desempenho do conjunto com ação sinérgica. A composição granulométrica tem importante

influência sobre a qualidade das argamassas, agindo diretamente na trabalhabilidade e resistência. (CARNEIRO e CINCOTTO, 1999).

A matriz tem um duplo papel na trabalhabilidade da argamassa. Separa as partículas de agregado entre si, evitando o seu contato, mas as mantém juntas em seu estado disperso, e atua como um material lubrificante entre as partículas do agregado, melhorando a capacidade da argamassa em sofrer deformações plásticas.

É claro que o fenômeno de atrito em suspensões concentradas (como solos e argamassa) é um processo mais complexo se diferenciando, principalmente, pelo fato de envolver um grande número de partículas, podendo ocorrer situações onde fica caracterizado um deslizamento ou uma simples rolagem, umas sobre as outras, acomodando-se em vazios encontrados no percurso. Existe também uma diferença entre as forças transmitidas nos contatos entre os grãos de areia (partículas maiores) e os grãos de argila (partículas menores), destacando-se (SOUZA, 2005):

- Contatos entre grãos de areia, geralmente as forças transmitidas são suficientemente grandes para expulsar a água da superfície, de tal forma que os contatos ocorrem realmente entre partículas;
- Caso de argilas, o número de grãos é muitíssimo maior, sendo a força transmitida em um único contato, extremamente reduzida. Cabe lembrar, ainda, que as partículas de argila são envolvidas por moléculas de água quimicamente adsorvidas. Essas moléculas não são removidas simplesmente pelas forças de contato atuantes (como no caso das partículas de areia). Nesta configuração, as moléculas de água adsorvidas são as principais responsáveis pela transmissão das forças.

Quanto mais bem distribuída granulometricamente é uma areia, melhor o entrosamento entre as partículas e, conseqüentemente, maior o ângulo de atrito. É interessante notar que o papel dos grãos grossos é diferente do desempenhado pelos finos. Em areias onde se predomina a fração fina em relação à fração grossa, as mesmas ficam envolvidas pela massa de partículas finas, identificando pouca colaboração no entrosamento. Do contrário, areias onde predomina a fração grossa em relação à fração fina, identificam-se um maior entrosamento, uma vez que

a fração fina é suficiente para preencher os vazios localizados entre as partículas maiores, tendo como consequência o aumento do ângulo de atrito (PINTO, 2000).

SOUZA (2005) e outros autores afirmam que a concentração volumétrica e a distribuição granulométrica das partículas finas (cimento, cal, microssílica, pozolanas, dentre outras) influenciam as propriedades reológicas de concretos e argamassas. A quantidade de partículas finas influencia diretamente a fluidez, gerando comportamentos distintos (FERRARIS e DE LARRARD, 1998; OLIVEIRA et al., 2000; DE LARRARD e SEDRAN, 2002), dentre os quais destacam-se:

- teores reduzidos de pasta levam ao predomínio dos contatos de alta fricção entre os agregados, resultando em baixa fluidez;
- à medida que se eleva o teor de pasta, a suspensão escoar com maior facilidade, pois diminuem os contatos entre os agregados e a fluidez passa a ser governada pela viscosidade da pasta.
- apesar da ausência de partículas finas dificultar a movimentação dos agregados, sua presença em excesso pode até diminuir a fluidez, pois a quantidade de água disponível para o afastamento das partículas no sistema (água livre) se reduz com o aumento da área superficial volumétrica da composição.

A influência das partículas maiores no comportamento reológico das argamassas e concretos está relacionada com a dificuldade de movimentação entre as mesmas, o que é reflexo da existência de certo coeficiente de atrito entre as partículas. Tal comportamento característico é afetado mais ainda pelo efeito de massa do agregado (agregados maiores), área superficial, proporção entre pasta e agregado e pelo atrito interno entre as partículas maiores. Este último é reflexo da rugosidade superficial da partícula do agregado, bem como da distribuição granulométrica. A existência de um coeficiente de atrito interno nas argamassas e concretos contribui para formação de um “esqueleto”, que pode enrijecer o conjunto, dificultando a fluidez do sistema. Nesse caso, ao se analisar o comportamento do concreto e das argamassas em situação de fluxo, é conveniente imaginar que, apenas quando a tensão de cisalhamento for suficiente para vencer simultaneamente os efeitos de superfície dos grãos finos

(responsáveis pela tensão de escoamento) e o atrito interno provocado pelos grãos maiores do agregado, é que o material entra em escoamento (SOBRAL, citado em SOUZA, 2005).

2.3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS QUE CARACTERIZAM O PROCESSO DE INJEÇÃO DE ARGAMASSA PARA ESTACAS RAIZ

As argamassas utilizadas em estacas raiz são bombeadas, e para isso, é necessário o conhecimento de algumas propriedades reológicas que interferem no processo.

As variações de características dos materiais, em muitos casos, podem ser compensadas com ajustes nas proporções da mistura, a fim de se obter as propriedades desejadas no estado fresco e endurecido.

O texto que se segue é baseado no encarte nº 039 publicado na revista A Construção pela editora PINI, escrito pelo Eng. Salvador E. Giammusso.

2.3.2.1 Parâmetros de mistura

As proporções da mistura, ou traço, são determinadas a partir de certos fatores, relações ou índices que são conhecidos como parâmetros da mistura, estes conceitos até então aplicados para o concreto devem ser analisados para a argamassa em questão. Os principais parâmetros são:

- **Relação água/ cimento (a/c ou x)**

Sabe-se que a relação água/ cimento é definida pela relação entre as massas de água e de cimento. É um dos parâmetros mais importantes na dosagem do concreto, pois dela dependem a resistência e a permeabilidade do concreto, cuja durabilidade depende desta última.

A resistência de dosagem (f_{cj}) para concretos pode ser expressa em função de a/c através da Lei de Abrams (1918):

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$$

Equação 2-16

Onde:

f_{cj} - resistência à compressão (MPa) em j dias de idade,

k_1 e k_2 - constantes que dependem da natureza dos materiais, idade e das condições de cura,

a/c - relação água cimento

Através da Equação 2-16 verifica-se que a resistência e a relação a/c são inversamente proporcionais, conforme pode ser verificado na Figura 2.13.

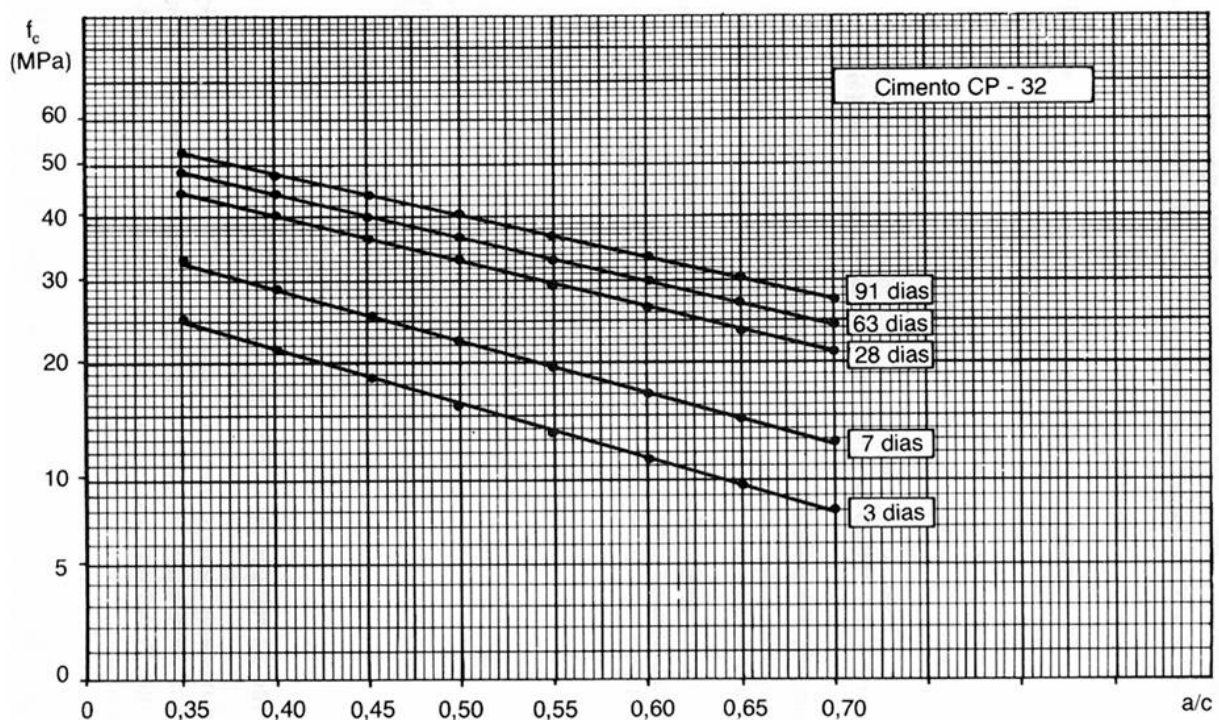


Figura 2.13 - Relação a/c x f_c para cimentos brasileiros (HELENE e TERZIAN, 1992).

▪ **Quantidade de água por metro cúbico (a)**

Este parâmetro, cuja definição é evidente, está relacionado com a fluidez ou consistência, ou ainda, trabalhabilidade da mistura. É evidente que quanto maior a quantidade de água no concreto, mais fluída será a mistura.

No entanto, é fácil imaginar que a adição indiscriminada da água pode chegar a desagregar a mistura, isto é, pode fazer com que a mistura não se mantenha coesa.

A forma e textura superficial dos agregados têm grande influência na quantidade de água necessária para uma determinada consistência do concreto. Quanto mais irregulares as partículas e quanto mais áspera a sua superfície, maior é a quantidade de água necessária para uma mesma consistência.

A área específica dos materiais sólidos (agregados, cimentos e outros componentes) também tem influência sobre a quantidade de água, pois todas as partículas devem ser envolvidas pela água contida na pasta.

Embora os parâmetros não devam ser considerados como valores rígidos que precisam ser obedecidos incondicionalmente, o seu uso criterioso pode ser um valioso instrumento de controle das propriedades do concreto.

- **Consumo ou teor de cimento (Cc ou c)**

Desde que esteja fixada a quantidade de água por m³ “a” e a relação a/c, fica determinado o consumo de cimento pela expressão:

$$c = \frac{a}{a/c} \quad \text{Equação 2-17}$$

Onde:

a - quantidade de água por metro cúbico;

a/c – relação água/ cimento;

Cc ou *c* – consumo de cimento.

Este parâmetro é decorrente de outros parâmetros fundamentais como, por exemplo:

- quantidade de água por metro cúbico “*a*”, determinada pelas características do concreto fresco, isto é, trabalhabilidade e coesão.
- relação água/ cimento, determinada pelas características do concreto endurecido, como resistência e permeabilidade.

Uma característica muito importante do concreto é o custo, que é fortemente influenciado pelo teor de cimento. Além de aumentar o custo, um teor excessivo de cimento pode provocar outros inconvenientes, a retração e a fluência (aumento da deformação sob tensão mantida constante) maiores. Isso porque essas propriedades são características da pasta e, portanto, quanto maior a quantidade deste componente, no concreto, mais intensos serão esses fenômenos.

Há especificações que se preocupam com o teor mínimo de cimento, preocupados com a obtenção de um volume de pasta suficiente para envolver todas as partículas de agregados e para preencher os vazios entre essas partículas. Mas, pensando em retração e em fluência, se deveria também pensar em limitação do teor máximo de cimento.

A pasta de cimento hidratada é um sólido com poros submicroscópicos que ocupam cerca de 28% do volume total. O diâmetro desses poros é da ordem de $1,5 \mu\text{m}$ a $2,0 \mu\text{m}$ (milhões de mm). Apesar desses poros, considera-se que a pasta é praticamente impermeável.

No entanto, o excesso de água, em relação à quantidade necessária para a formação de um volume de pasta que possibilite a hidratação completa do cimento, faz com que surjam os poros capilares, cujo diâmetro é da ordem de mil vezes maior do que o diâmetro dos poros da pasta ($1,3 \mu\text{m}$, ou seja, $1,3 \times 10^{-3}$ mm). E esses poros, quando em grande quantidade, se interligam, formando um trajeto contínuo para a água: o concreto passa a ser permeável.

No caso da argamassa utilizada no preenchimento de estaca raiz uma exigência pertinente ao processo executivo é que a argamassa deve possuir elevada fluidez, sendo necessário elevada quantidade de água e como consequência, um consumo de cimento, também alto. No entanto, com o uso de um aditivo plastificante pode-se obter um concreto com a trabalhabilidade desejada com menos água e, podendo-se reduzir também o consumo de cimento.

- **Relação água/ materiais secos (A% ou H)**

É definida pela relação entre a massa de água e a massa total de material seco, isto é, cimento mais agregados (areia, no caso da estaca raiz). O valor dessa relação é fixado em função da

consistência pretendida no estado fresco, segundo o método de dosagem do INT – Instituto Nacional de Tecnologia.

A Lei de Lyse afirma que a quantidade de água para se obter uma determinada trabalhabilidade para concretos plásticos é praticamente a mesma e independente do traço para mesmos materiais, para proporções usuais e dentro de certos limites, como pode ser verificado um comportamento similar ao demonstrado na Figura 2.14. Abaixo esta descrita a *Lei de Lyse*:

$$A\% = \frac{x}{1+m}; \quad \text{Equação 2-18}$$

$$m = a + p \quad \text{Equação 2-19}$$

Onde:

$A\%$ - relação água/ materiais secos (%)

x - relação água/ cimento (g)

a - areia (g)

p - brita (g)

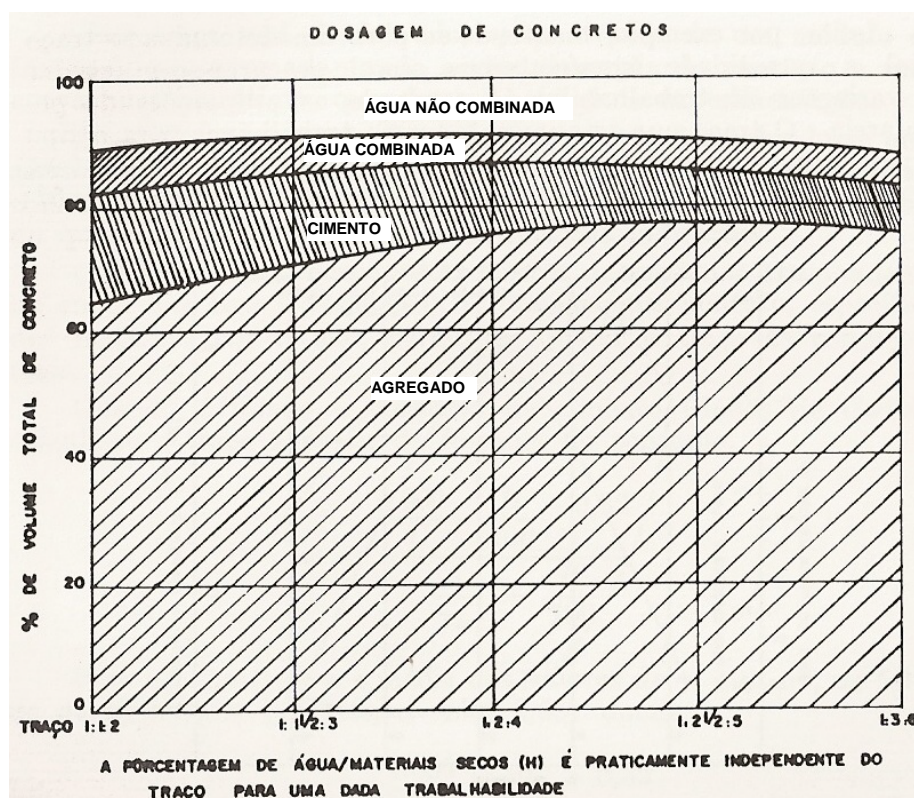


Figura 2.14 – Concretos de mesma trabalhabilidade, constância do teor água/ materiais secos com variação do traço. (PETTRUCCI, 1993).

· **Relação agregado/ cimento (m)**

Este parâmetro é definido pela relação entre a massa total de agregados e a massa de cimento. É um dos parâmetros fundamentais das misturas e está relacionado com o consumo de cimento e com a relação água/ cimento.

Sendo “c” a quantidade de cimento por m³ de concreto, a quantidade total de agregado será igual a “mc”. A partir de “m”, “a” e “c”, conhecidos γ_m e γ_c pode-se obter uma relação muito importante:

$$m = \gamma_m \frac{1 - a}{a} x - \frac{\gamma_m}{\gamma_c} \quad \text{Equação 2-20}$$

Onde:

a – volume de água por m³ (m³)

x – relação água/ cimento

γ_m – massa específica do agregado (t/ m³)

γ_c - massa específica do cimento (t/ m³)

A Equação 2-20 é obtida através do conceito que o volume de concreto é igual à soma dos volumes absolutos de cimento, agregados e água, sendo fundamental para a dosagem dos concretos, pois permite obter o valor de “m” a partir de “a” e “x”.

2.3.2.2 Propriedades que interferem no processo de bombeamento das argamassas

As propriedades que interferem na reologia das argamassas são: consistência, plasticidade, coesão, adesão, exsudação, aspereza e capacidade de retenção de água. Algumas dessas propriedades serão definidas e inter-relacionadas nos próximos itens, sob diferentes pontos de vista.

De acordo com Santos (2003) optou-se por utilizar o termo estruturação interna em detrimento do termo coesão, pois se entende que, na mecânica dos solos, este último conjuntamente com o atrito interno é mais indicado quando da descrição das propriedades do solo que influenciariam na resistência do mesmo ao cisalhamento. Em se tratando das argamassas e concretos, a estruturação interna está relacionada à estabilidade, exsudação,

segregação, e as forças eletroquímicas que proporcionam esta estruturação são conceitualmente diferentes em pastas aglomerantes, em comparação às argilas.

Os principais fatores que influenciam na eficiência da estruturação interna nas pastas aglomerantes são: teor e tipo de aglomerante(s), teor de água e o teor de ar incorporado presente na pasta. Já o atrito interno é utilizado quando se quer descrever a maior interferência no fluxo ocasionada pelas partículas mais *grossas* do material, ou seja, do(s) agregado(s). Portanto, a estruturação interna é imprescindível para materiais sujeitos à pressão, pois a falta da mesma pode propiciar segregação ocasionada pela filtração dos grãos, cujo efeito é a separação da pasta aglomerante das partículas sólidas do agregado.

- **Consistência e Plasticidade**

A consistência e a plasticidade são as propriedades reológicas básicas para caracterizar a trabalhabilidade das argamassas. Em alguns momentos, essa condição torna-se sinônimo dessas duas propriedades. As várias definições existentes derivam dos conceitos apresentadas no documento RILEM norma MR-3 (1982).

Consistência é definida como sendo a propriedade da argamassa pela qual esta tende a resistir à deformação que lhe são impostas através da ação de cargas (por exemplo, o peso próprio), isto é, o grau de facilidade da argamassa deformar-se sob ação das cargas no estado fresco. A plasticidade por sua vez, é a propriedade que permite a argamassa deformar-se sem ruptura, sob a ação de forças superiores às que promovem a sua estabilidade, mantendo a deformação depois de retirado o esforço.

A consistência depende, dentre outras coisas, do teor de água, do teor de ar incorporado, da proporção dos materiais constituintes da argamassa e das características granulométricas e texturais do agregado constituinte.

A plasticidade depende do teor de ar, da natureza e teor de aglomerantes e do teor de finos, e também do efeito dos aditivos presentes na argamassa.

Para o caso das argamassas, a consistência é uma das propriedades que mais influenciam a trabalhabilidade, sendo esta influenciada por uma série de fatores, tanto internos

(propriedades dos materiais constituintes) como externos (propriedades requeridas na aplicação), demonstrado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Fatores que influenciam a trabalhabilidade do concreto no estado fresco (PETRUCCI, 1987).

Fatores internos	Fatores externos
Teor de água muitas vezes definida em função da consistência necessária	Tipo de mistura
Proporção entre aglomerante e agregado	Tipo de bombeamento
Proporção entre agregado miúdo e graúdo	tipo de lançamento
Distribuição granulométrica e forma e textura dos grãos do agregado	tipo de adensamento
Teor e tipo aditivos	dimensões e armadura da peça a executar

As propriedades que podem ser usadas para descrever o escoamento da argamassa no estado fresco são a tensão de escoamento e a viscosidade, portanto, para se conhecer os parâmetros reológicos devem-se conhecer essas duas propriedades. Todavia, a maioria dos testes existentes mede apenas um fator, que pode ser correlacionado com a tensão de escoamento, ou com a viscosidade.

- **Exsudação**

Outra propriedade que merece destaque durante a avaliação de uma condição de trabalhabilidade, é a exsudação de água. A exsudação é uma forma particular de segregação, em que a água da mistura tende elevar-se à superfície do concreto recentemente lançado. Esse fenômeno é provocado pela impossibilidade dos constituintes sólidos fixarem toda a água da mistura e depende, em grande escala, das propriedades do cimento e proporção dos materiais.

A exsudação se manifesta, de forma geral, nas argamassas de consistência plástica a fluida. Selmo (1989) afirma que, em determinadas condições, a tendência da argamassa à exsudação é indicativa da falta de plasticidade da mesma. Assim, a simples busca em se corrigir uma propriedade implica, indiretamente, na correção da outra. Por isso a determinação da exsudação pode ser útil na seleção de diferentes misturas trabalháveis e não trabalháveis.

Segundo Popovics (1982) e Metha & Monteiro (1994) tem-se dois tipos de segregação podem ser distinguidos: segregação interna sendo caracterizada quando as partículas maiores e pesadas se acumulam no fundo do concreto, usualmente durante o adensamento, e a

segregação externa quando causada por forças externas, ocorrendo usualmente antes do adensamento, como o resultado da movimentação imprópria do material dentro do mangote e/ou da dosagem inadequada. Nesse caso, as partículas rolam umas sobre as outras no interior da argamassa ocorrendo segregação na periferia/ fundo da mangueira, quando bombeado.

No processo executivo da estaca raiz a argamassa é bombeada a grandes distâncias e alturas no interior de um mangote, com mudança de direção, sendo descarregada contra obstáculos, favorecendo a ocorrência da segregação. A segunda forma de segregação ocorre particularmente em misturas com muita água, característica inerente à argamassa pesquisada neste trabalho, proporcionando a separação da pasta dos agregados.

São pontos importantes a considerar, que podem causar o aumento da tendência à segregação: aumento do diâmetro máximo da partícula acima de 25 mm (no caso de concretos), utilização de granulometria de agregados descontínua, decréscimo na quantidade da fração fina da areia, forma desfavorável das partículas, decréscimo no consumo de cimento e consistência muito seca ou muito fluída.

- **Retenção de água**

A retenção de água corresponde à propriedade que confere a argamassa no estado fresco a capacidade em manter sua consistência quando submetida a solicitações que provoquem a perda de água de amassamento, por exemplo, evaporação, sucção ou absorção por uma superfície (TRISTÃO, 1995).

O aumento da retenção de água da argamassa pode ser conseguido aumentando-se o teor de materiais constituintes com elevada área específica. Em função de sua elevada área específica, os aglomerantes são os principais responsáveis pela capacidade de retenção de água em argamassas, seguido pela influência das partículas do agregado fino. Esses dois tipos de materiais possuem as menores dimensões de partículas no sistema, seu acréscimo proporciona o aumento da área específica e, conseqüentemente, a área a ser molhada é maior, aparecendo tensões superficiais que tendem a manter a água adsorvida nas partículas.

Santos (2003) ao estudar argamassas para projeção, afirma que como o teor de água utilizado nas argamassas com tal finalidade é muito elevado (com o objetivo de fornecer fluidez necessária ao processo de bombeamento), essas possuem menor capacidade de retenção de água, já que a água em excesso é perdida facilmente por efeito de sucção do substrato, ou seja, ao se ter maior teor de água em uma argamassa, provavelmente, a retenção de água será menor.

- **Trabalhabilidade**

Apesar de ser a mais importante característica do concreto/ argamassa no estado fresco, a trabalhabilidade é de difícil conceituação, pois esta não depende só das características intrínsecas das argamassas, mas também externas, citadas anteriormente (consistência, a textura, coesão, retenção de água). Não é surpreendente que vários autores tem termos diferentes para defini-la. A definição do ACI é que trabalhabilidade é a propriedade do concreto fresco ou argamassa que determina a facilidade que uma mistura pode ser misturada, transportada, lançada, adensada (POPOVICS, 1982).

O conceito de trabalhabilidade pode se tornar mais amplo a depender principalmente do modo como a argamassa será destinada. No caso das argamassas cuja finalidade é o bombeamento, deve-se considerar outros fatores intervenientes do processo e que interferem decisivamente na trabalhabilidade. Conseqüentemente, o conceito de trabalhabilidade das argamassas para o bombeamento engloba as definições já apresentadas, e deve ser complementada com propriedades requeridas como características adequadas de estruturação interna que proporcionem estabilidade à exsudação e segregação, atrito interno e viscosidade (SANTOS, 2003).

Powers definiu trabalhabilidade como sendo a combinação das propriedades no estado fresco que determinam a quantidade de trabalho interno necessário para o lançamento e adensamento de uma mistura, sem perda de sua homogeneidade (POPOVICS, 1982).

Esta propriedade é considerada muito importante se for avaliado o processo executivo da estaca raiz, pois a argamassa deve possuir consistência, coesão e capacidade de retenção de água adequada ao processo de bombeamento, assegurando que na extração do tubo não ocorra

o rompimento da argamassa. Deve-se ressaltar que a fluidez deve ser adequada para permitir o preenchimento de fendas no solo, que é uma característica peculiar da estaca raiz.

A adição de água nem sempre melhora a trabalhabilidade, pois, a partir de certo teor, e tendo-se em vista um adensamento por vibração (ou injeção de pressão, no caso da estaca raiz), ocorrerá a segregação não podendo ser considerada, portanto, uma mistura trabalhável. Na dosagem deve-se buscar o ponto de equilíbrio, ou seja, o máximo de tempo de escoamento sem prejuízo da resistência à segregação.

▪ **Bombeabilidade**

A bombeabilidade é a capacidade de um material poder ser transportado através de um duto sob pressão, mantendo suas características e homogeneidade visando sua adequada aplicação.

Sabe-se que a pasta de cimento ou matriz tem um duplo papel na trabalhabilidade do concreto fresco, já que ela separa as partículas de agregado uma das outras, prevenindo o contato entre elas, mas mantém as mesmas unidas neste estado disperso, agindo como um material lubrificante entre as partículas do agregado e melhorando a capacidade do concreto fresco e argamassas às deformações plásticas (POPOVICS, 1982).

LOADWICK citado por AUSTIN et al (1999) estabeleceu que o concreto flui na forma de um sólido “plug” no interior de um tubo, ou seja, é separado das paredes do tubo por uma camada lubrificante constituída de cimento, água e partículas finas de areia. Este “plug” consiste de agregado graúdo, areia (sem as partículas mais finas) e as partículas de cimento, todos separados por uma camada contínua de água que é hidraulicamente ligada à água da camada lubrificante. De acordo com a teoria hidráulica, a distribuição de velocidade é constante através de toda a largura do “plug”, sem velocidades relativas entre as partículas do agregado graúdo. A velocidade decresce através da camada lubrificante até zero na parede da mangueira de projeção (SANTOS, 2003).

Este comportamento foi explicado por Popovics (1982) considerando-se o momento em que uma pasta de cimento é forçada através de um tubo cilíndrico, conforme mostra a Figura 2.15, podendo ser de forma análoga considerada para as argamassas em estudo.

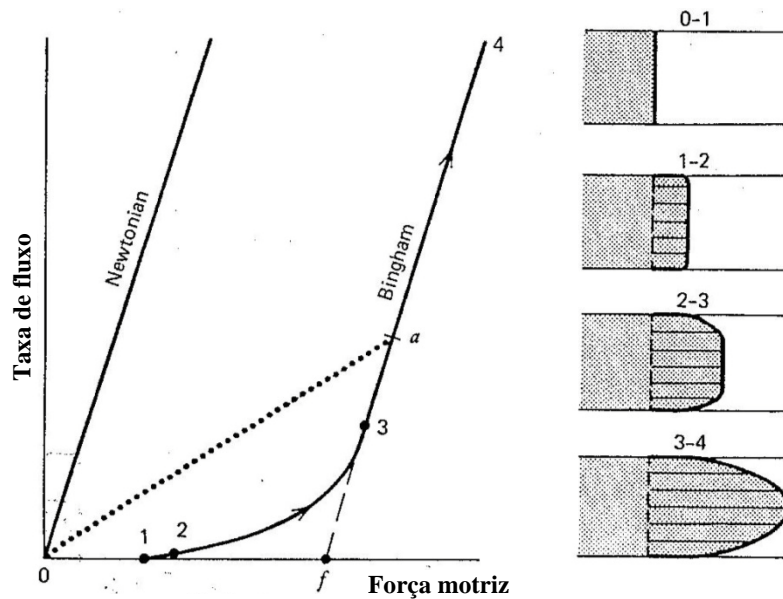


Figura 2.15 - Modelo de deformação do fluxo sob conduto forçado, para pastas de cimento (POPOVICS, 1982)

De acordo com Popovics (1982) a deformação das pastas de cimento é representada pela linha 0-1-2-3-4 da Figura 2.15, segundo o comportamento de Bingham. Este modelo retrata quando uma pasta de cimento é forçada, sem interrupção, a atravessar um tubo cilíndrico com o aumento da força motriz. O segmento da curva 1-2-3 pode ser explicado da seguinte forma:

- Quando uma força que excede o valor representado pelo ponto (1), inicia um movimento constante do material, com o movimento inicial devido a uma falha estrutural ou fluidificação, somente na periferia, como está demonstrado pelo segmento (1-2) na Figura 2.15, sendo denominado “*plug flow*”. Nesta situação a tensão limite de escoamento ainda não foi atingida, portanto a força apenas provocou a deformação do material;
- Com o aumento da tensão de escoamento, o diâmetro do “*plug*” diminui enquanto que a largura da região periférica aumenta (segmento 2-3);
- No segmento 3-4 todo o material foi fluidificado, já que o “*plug*” tomou a forma parabólica. Neste momento, foi atingida a tensão limite de escoamento representada por (f).

A mais complexa representação do comportamento reológico pode ser obtida quando duas propriedades adicionais da pasta de cimento são consideradas: tixotropia e dilatância.

Tixotropia é o resultado de um desarranjo temporário da estrutura interna da pasta, causada pela redução na atração entre partículas e fricção interna. A demonstração disto na mistura é quando a pasta de cimento dá a impressão de estar mais fluida durante o movimento do que depois que o movimento cessa. A Dilatância é causada pelo aumento da interferência das partículas, isto é, pela maior fricção interna. A pasta de cimento fresco pode exibir os dois comportamentos numa mesma amostra, por exemplo: numa baixa taxa de cisalhamento o efeito tixotrópico é dominante, mas com o aumento da taxa de cisalhamento o comportamento dilatante se torna mais evidente (POPOVICS, 1982).

2.4 ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

De acordo com Ferraris (1999) as propriedades de escoamento do concreto são divididas em dois grupos: os ensaios que fornecem apenas um parâmetro, correlacionando-se ou com a tensão de escoamento ou com a viscosidade, e os ensaios que fornecem os dois parâmetros.

Grande parte das técnicas convencionais, utilizadas no estudo das argamassas no estado fresco é tratada como ensaios de um fator, não permitindo uma análise reológica completa. Além do mais, os resultados fornecidos não permitem o cálculo direto de parâmetros fundamentais, e sim, apenas uma correlação.

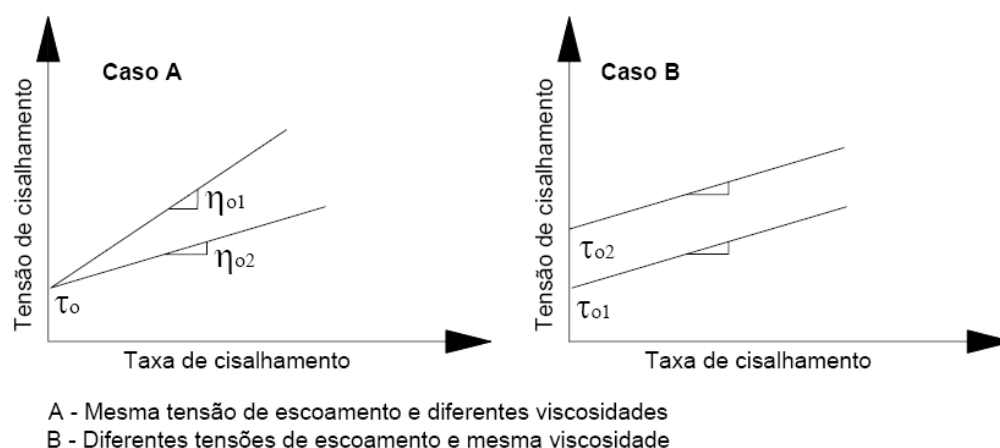


Figura 2.16 – Comportamento reológico dos materiais (FERRARIS, 1999).

Assumindo, por exemplo, que o material tem um comportamento descrito pelo modelo de Bingham (que tem como parâmetros fundamentais a viscosidade e a tensão de escoamento), a

Figura 2.16 ilustra como o conhecimento de apenas um dos parâmetros não é suficiente para descrever o comportamento reológico do material.

Neste contexto, passou-se a utilizar e desenvolver inúmeras técnicas para caracterizar o comportamento no estado fresco das argamassas, tais como o Cone de Marsh, Cone de Penetração, Vane teste, Cone de Escoamento, entre outros, os quais têm como vantagem a facilidade de utilização. Entretanto, a caracterização reológica segundo estes métodos restringe-se a correlações indiretas com os parâmetros reológicos fundamentais, a tensão de escoamento e a viscosidade aparente, mostrando-se deficientes para avaliar o comportamento tanto no estado estático quanto sob fluxo (FILHO et al., 2006).

Nos próximos itens, serão apresentados alguns desses ensaios, destacando-se principalmente aqueles utilizados no estudo das argamassas no estado fresco. Entretanto, deve-se ressaltar que a maior parte dos testes reológicos, que serão apresentados foram desenvolvidos para o estudo da reologia de concretos, mas como a argamassa estudada tem características próximas ao Concreto Alto-Adensável (CAA), optou-se por realizar estes ensaios.

2.4.1 VANE TEST

Citado por Souza (2005) o método *Vane Test*, ou simplesmente ensaio de palheta, tem se mostrado como um método simples, porém eficiente, para se medir as propriedades de fluidos não-newtonianos que exibem um grande efeito de deslizamento das partículas em fluxo. O valor de tensão de escoamento obtido pelo método tem apresentado uma boa concordância com os resultados encontrados pela maioria dos métodos reológicos atualmente disponíveis (NGUYEN e BOGER, 1985; AUSTIN et al., 1999; BARNES e NGUYEN, 2001).

O método Vane Test é bastante utilizado na mecânica dos solos para se determinar o parâmetro definido como “tensão de cisalhamento não drenada de solos”, existindo equipamentos de pequeno porte para ensaios de laboratório, bem como equipamentos de grande porte para ensaios em campo.

O ensaio do Vane Test para argamassas de revestimento vem sendo utilizado no Laboratório de Ensaio e Materiais da Universidade de Brasília (ALVES, 2002; SANTOS, 2003; SOUSA e BAUER, 2003; GONÇALVES, 2004; DO Ó, 2004; SOUZA, 2005; PEREIRA, 2007).

Nguyen e Boger (1985) recomendam que as dimensões do recipiente devam obedecer às seguintes relações: $Dt/D > 2,0$, $Z1/D > 1,0$ e $Z2/D > 0,5$, sendo Dt o diâmetro do recipiente cilíndrico, D o diâmetro da palheta, $Z1$ e $Z2$ as distâncias entre a palheta e a parte superior e inferior da amostra, no recipiente, conforme ilustra a Figura 2.17.

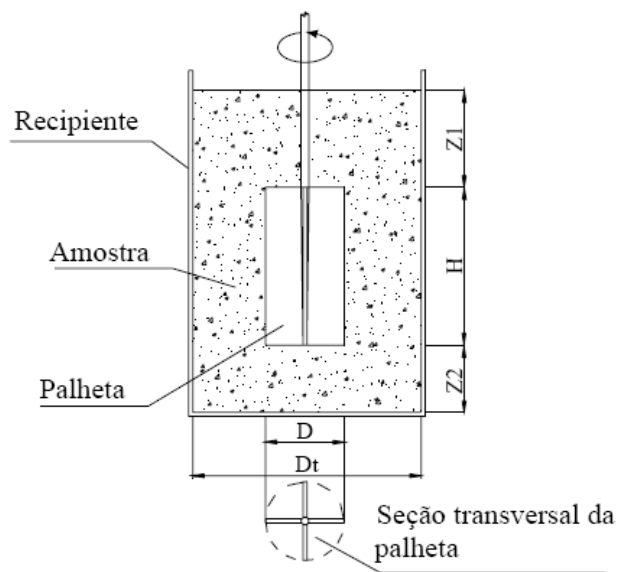


Figura 2.17- Relação entre as dimensões da palheta e do recipiente (BAUER, et al, 2007)

O procedimento do ensaio consiste em colocar a amostra em um recipiente cilíndrico, procurando na seqüência, posicionar a amostra no equipamento inserindo a palheta na argamassa até a altura especificada. Aplica-se rotação na palheta a uma taxa de deformação constante – velocidade angular constante – mensurando-se a deformação versus o torque exercido pela argamassa na palheta, sendo registrado o momento do escoamento quando o torque exercido alcançar o valor máximo, provocando o cisalhamento do material na seção em volta da palheta.

O cisalhamento da amostra deve-se às contribuições da superfície lateral e das superfícies superior e inferior da palheta, assumindo-se, portanto, que o escoamento da argamassa ocorre ao longo da superfície cilíndrica delimitada pela palheta.

Adotando-se que a tensão de cisalhamento é uniformemente distribuída ao longo do cilindro, e igual à tensão de escoamento (τ_0), onde o torque é máximo (T_m). A tensão de escoamento é obtida Equação 2-21 (NGUYEN e BOGER, 1985):

$$T_m = \frac{\pi D^3}{2} \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right) \tau_0 \quad \text{Equação 2-21}$$

Onde:

D = diâmetro da palheta (m)

H = altura da palheta (m)

T_m = Torque máximo (N.m)

τ_0 = tensão de escoamento (kPa)

Para realização deste ensaio foi utilizado aparelho do Vane Test, modelo WF23500 – produzido pela empresa Wykeham Farrance Engineering, mostrado na Figura 2.18.

Ao aplicar-se uma velocidade angular constante, a argamassa sofrerá uma deformação com conseqüente aumento progressivo da tensão de cisalhamento imposta pela amostra. Quando a tensão de cisalhamento igualar-se à tensão de escoamento da argamassa, a mesma sofrerá grande deformação com diminuição significativa da tensão de cisalhamento, ou seja, o material iniciou o regime de fluxo. Com a tensão máxima (torque máximo) determina-se a tensão de escoamento da argamassa ensaiada.



Figura 2.18 – O equipamento utilizado no ensaio do Vane Test.

Por ser um ensaio relacionado com a tensão de escoamento da argamassa, a caracterização reológica sob fluxo não é abrangida e, portanto, há deficiências no conhecimento do comportamento no estado fresco, principalmente em situações em que a viscosidade atua de forma significativa.

A deformação plástica da argamassa sem entrar em regime de fluxo deve-se à atuação tanto da tensão de escoamento como da viscosidade. Portanto, o valor determinado pelo ensaio Vane é um somatório das parcelas dos parâmetros reológicos fundamentais, sem distingui-los (FILHO et al., 2006).

No meio técnico há divergência de opiniões, pois Souza (2005) afirma que o resultado apresentado pelo ensaio do Vane Test é uma medida indireta da consistência, pela qual se obtém o valor direto com o parâmetro reológico tensão limite de escoamento.

Os resultados obtidos pelo ensaio do Vane Test na caracterização de argamassas, utilizadas no preenchimento de estaca raiz, foram muito importantes na mensuração da consistência e conseqüente realização do diagrama de dosagem. O comportamento obtido através dos resultados representou bem as variações impostas na dosagem experimental.

2.4.1 FUNIL V (V FUNNEL)

O teste do funil “V” é utilizado para caracterizar a viscosidade e a capacidade de fluidez de concretos auto-adensáveis (CAA). A argamassa pesquisada é tão fluida como um concreto CAA, portanto este ensaio foi realizado no desenvolver das etapas.

O ensaio do Funil V consiste em medir o tempo em que a amostra de aproximadamente 10 litros de concreto necessita para fluir totalmente através do orifício inferior do funil, onde tal seção deve ter uma dimensão mínima de 3 vezes o tamanho máximo do agregado. Para o CAA (e utilizado nesta pesquisa) sua dimensão deve variar de 6,5 cm a 7,5 cm. O esquema do equipamento utilizado no ensaio é mostrado na Figura 2.19.

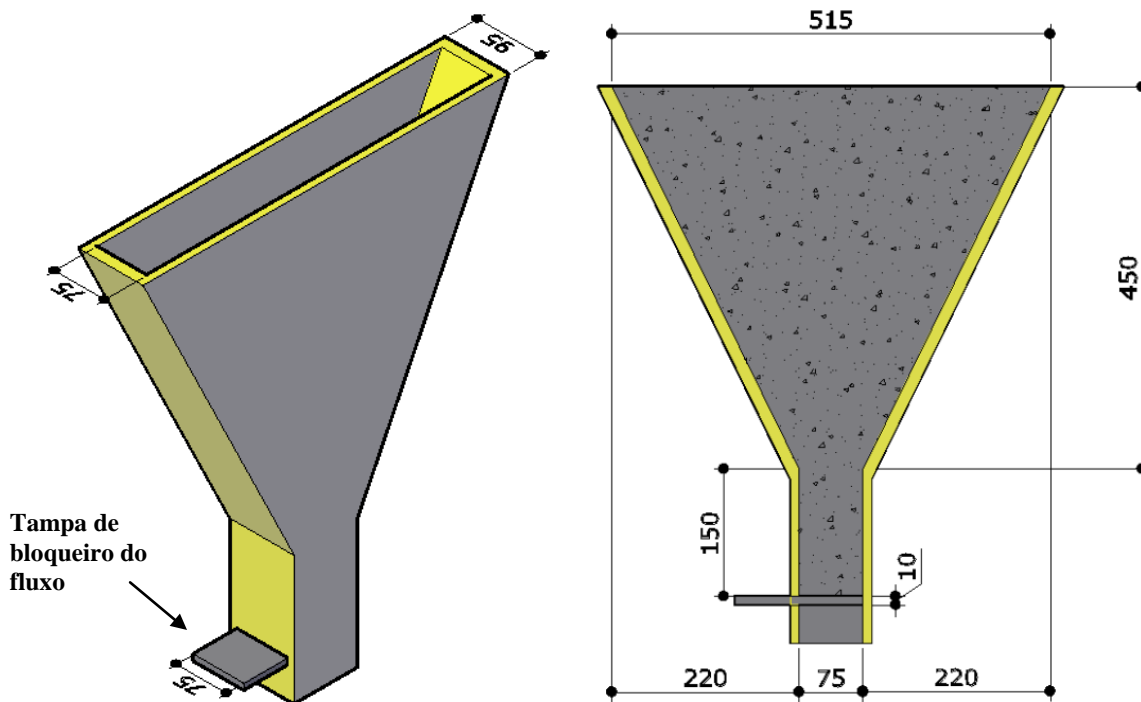


Figura 2.19 – Ilustração do Funil V (*V - Funnel*).

Este ensaio mede a facilidade de o concreto fluir: um baixo tempo de esvaziamento do funil indica grande fluidez, sendo favorável à capacidade de fluxo e um alto tempo de escoamento indica alta viscosidade (baixa fluidez), com tendência a sofrer bloqueio e segregação. Entupimento da abertura inferior indica dificuldades de lançar e adensar o concreto. O tempo de fluxo do concreto e a ocorrência ou não de bloqueio são avaliados.

2.4.1 CONE DE MARSH

Este ensaio tem sido utilizado previamente para avaliar a fluidez e a dosagem ótima de superplastificante em pastas e argamassas. O procedimento é similar à norma ASTM C 939 utilizada para testar a fluidez do graute.

Os aparatos utilizados no ensaio são: a argamassadeira, o cone de Marsh, um beaker graduado, uma proveta graduada, um cronômetro e os recipientes para acomodar os componentes da mistura antes do ensaio. A Figura 2.20 mostra o cone de Marsh.

Na literatura técnica, o diâmetro (d) do bocal do cone varia de 5mm a 12,5mm e o volume (V) inicial utilizado varia de 800 a 2000 ml. As dimensões do funil são escolhidas de acordo com as características dos materiais utilizados (agregados).



Figura 2.20 - Ensaio com o Cone de Marsh (AMARAL e GOMES, 2005).

O procedimento do ensaio consiste em colocar um volume de material ‘ V ’ (pasta ou argamassa) no interior do funil, estando o orifício inferior bloqueado; em seguida desbloquear o orifício e com o auxílio de um cronômetro fazer a medição do tempo necessário para fluir um volume ‘ v ’ através do orifício do funil. Esse período que o material necessita para fluir é chamado de tempo de fluxo.

2.4.2 MESA DE CONSISTÊNCIA

A norma NBR 13276/ 2002 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência, preconiza que a trabalhabilidade das argamassas seja mensurada pelo ensaio na mesa de consistência, sendo este o único parâmetro reológico utilizado para a caracterização no estado fresco. O índice de consistência das argamassas é preconizado pela NBR 7215/1991.

Apesar da grande utilização, este é um dos ensaios mais criticados pelo meio científico quanto à definição de uma condição de trabalhabilidade. Um dos muitos fatores que contribuem para

esta discussão, além da própria concepção do ensaio, diz respeito a uma não correspondência de resultados entre as argamassas caracterizadas sob mesmas condições de trabalhabilidade. Entretanto, é certo que a mesa de consistência ainda está longe de ser “aposentada”, fato que pode ser fortalecido pela carência de parâmetros para o meio técnico, principalmente nacional, que sente a necessidade da inclusão das medidas de espalhamento durante a caracterização das argamassas de revestimento no estado fresco (BAUER, 2005).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.21 – Ensaio da mesa de consistência: (a) Equipamento, (b) Moldagem da argamassa; (c) Aplicação dos golpes; (d) Medida do Espalhamento (ARAÚJO, 2004).

O ensaio consiste em preencher o molde tronco-cônico, de dimensões padronizadas, colocado de modo centralizado sobre a mesa de consistência (Figura 2.21), em três camadas idênticas, aplicando-se em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com soquete padrão, sem atingir a mesa (na 1ª camada) e sem inserir o soquete na camada subjacente, nas demais camadas.

Na seqüência, deve-se rasar a argamassa com régua metálica, proceder à limpeza e retirar o molde, aplicando-se, através da manivela da mesa, 30 golpes em 30 segundos. Imediatamente após o último impacto da mesa é medido com paquímetro o espalhamento do molde tronco-cônico original de argamassa. São feitas 3 leituras uniformemente distribuídas ao longo do perímetro. O índice de consistência da argamassa corresponde à média das três medidas de diâmetro.

De acordo com Filho et al.(2006) ao se retirar o molde, a argamassa sofrerá pequeno escoamento até se estabilizar em função da sua tensão de escoamento e viscosidade. Com a aplicação dos impactos a argamassa é submetida a uma taxa de cisalhamento decrescente, dependente da altura de queda do equipamento e da altura e densidade da argamassa. Portanto, o princípio físico da medida do espalhamento ocorre quando a tensão gerada pelo impacto superar a tensão de escoamento da argamassa, escoando em função da contribuição dos parâmetros reológicos relacionados com a taxa de cisalhamento imposta.

Este ensaio está relacionado com a tensão de escoamento da argamassa, porém a viscosidade aparente exerce influência significativa na avaliação da mesma. Portanto, a distinção da contribuição da tensão de escoamento e da viscosidade no escoamento da argamassa não é facilmente interpretada. Por exemplo, duas argamassas distintas quando submetidas à mesa de consistência, podem ter o mesmo espalhamento, porém as suas características reológicas serem bastante diferentes (FILHO et al., 2006).

2.4.3 PENETRAÇÃO ESTÁTICA DO CONE

O índice de consistência pode ser determinado segundo o método da penetração do cone, prescrito pela norma ASTM C780-96, para controle da consistência das argamassas.

Neste experimento, um cone metálico (com massa e geometria definidas por norma) é liberado sob a ação da gravidade na amostra a ser ensaiada e, depois de cessada a penetração é realizada a leitura, ou seja, a consistência é estabelecida em função da penetração do cone Figura 2.22.

O procedimento do ensaio consiste em colocar a argamassa no porta-amostra em três camadas, aplicando-se em cada uma 20 golpes com o auxílio de uma espátula, homogeneamente distribuídos por todo o material. Na seqüência, a amostra é rasada para proceder-se ao ensaio propriamente dito. É recomendado que o lançamento, adensamento e nivelamento da amostra não ultrapassem 1 minuto e 30 seg.

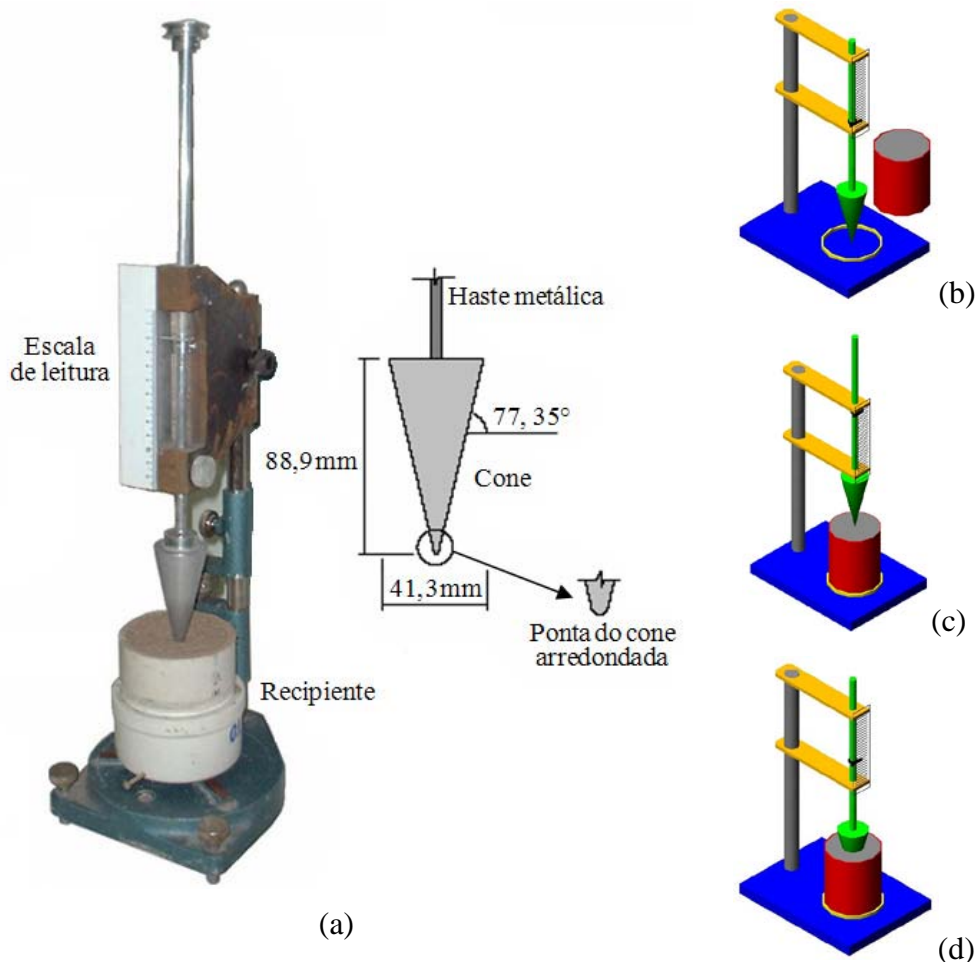


Figura 2.22 – (a) Equipamento utilizado no ensaio de Penetração Estática do Cone, (b) argamassa no porta amostra, (c) posicionamento da amostra, (d) leitura de penetração (FILHO et. al., 2006 e PEREIRA, 2007).

O porta-amostra é posicionado no centro do cone de penetração, sendo cuidadosamente aproximado até a superfície do material e liberado para penetrar na argamassa (Figura 2.22 - d). Quando o conjunto cone/ haste entrar em repouso, ou após 30 segundos de escoamento, mensura-se a profundidade de penetração, em milímetros, através da escala fixada no equipamento.

Como o conjunto cone/haste pesa 200 gramas, a taxa de cisalhamento imposta à argamassa depende da dissipação da energia cinética, restringida pela viscosidade do material e pelo progressivo aumento da área de contato com a argamassa, ocasionado pelo atrito.

Quando a tensão gerada pelo cone igualar-se com a tensão de escoamento da argamassa o sistema entrará em repouso, indicando um parâmetro relacionado com a tensão de escoamento (penetração), porém sem correlação direta.

De acordo com Filho et al.(2006) o escoamento resultante da argamassa, decorrente da ação do cone, depende da tensão de escoamento e da viscosidade, e a influência de cada um dos parâmetros não é discernida; diferentes argamassas, de comportamento reológico distinto, podem apresentar índices de penetração do cone iguais e, na prática, apresentar trabalhabilidade completamente diferentes, não se podendo caracterizar adequadamente um material através deste ensaio.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

2.5.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Para determinar o valor da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) são adotados os critérios preconizados pela NBR 12655/ 2006 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Primeiramente vamos relembrar alguns conceitos de forma sucinta:

Após o ensaio de um número de corpos-de-prova, pode ser feito um gráfico com os valores obtidos de f_c versus a quantidade de corpos-de-prova relativos a determinado valor de f_c , também denominada densidade de frequência. A curva encontrada denomina-se Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão (Figura 2.23).

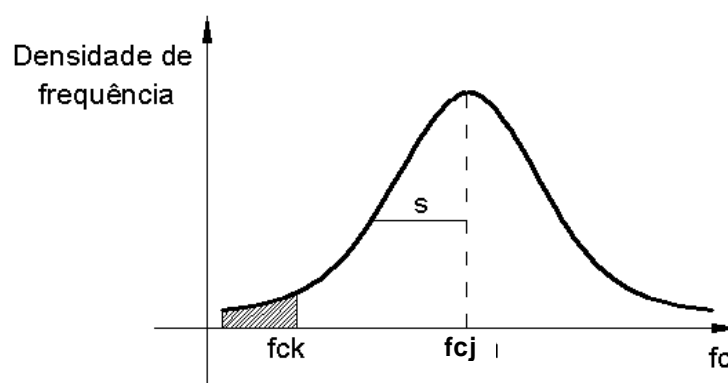


Figura 2.23 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão

Na curva de Gauss encontram-se dois valores de fundamental importância: resistência média do concreto à compressão (f_{cj}) e resistência característica do concreto à compressão, (f_{ck}).

O valor f_{cj} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos-de-prova ensaiados, e é utilizado na determinação da resistência característica (f_{ck}), por meio da fórmula:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad \text{Equação 2-22}$$

Logo,

$$f_{ck} = f_{cj} - 1,65 \times S_d \quad \text{Equação 2-23}$$

Onde:

f_{cj} - é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, em MPa;

f_{ck} - é a resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

S_d - é o desvio-padrão da dosagem, em MPa.

A NBR 6122/ 1996 faz apenas duas recomendações quanto às características das argamassas utilizadas no preenchimento da estaca raiz: estabelece que o f_{ck} da argamassa não seja considerado superior a 20 MPa e o consumo de cimento não inferior a 600 kg/ m³.

O cálculo da resistência de dosagem do concreto, conforme a NBR 12655/ 2006, depende das condições de preparo do concreto, definidas como:

- Condição A
 - aplicável às classes C10 até C80 – onde o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e devendo a água ser corrigida em função da umidade dos agregados;

- Condição B
 - aplicável às classes C10 até C25: onde o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados são medidos em massa combinada com volume, devendo o canteiro dispor de meios para medir a umidade da areia, e que possa efetuar as devidas correções da água necessárias, além de possuir balanças com capacidade e precisão aferidas, para permitir a conversão dos agregados de massa para volume;

- aplicável às classe C10 até C20: onde o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados são medidos em volume. A umidade do agregado miúdo é determinada pelo menos três vezes durante o serviço do mesmo turno de concretagem. O volume de agregado miúdo é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado;

- **Condição C**

- aplicável apenas aos concretos de classe C10 e C15: onde o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto.

O valor do desvio-padrão de dosagem (S_d) a ser aplicado na Equação 2-22, conforme a NBR 12655/ 2006, pode ser conhecido ou desconhecido. É considerado conhecido, quando o concreto for elaborado com os mesmos materiais, mediante equipamentos similares e sob condições equivalentes, com o valor numérico de S_d fixado com no mínimo 20 resultados consecutivos obtidos no intervalo de 30 dias, em período imediatamente anterior, devendo ser maior ou igual a 2MPa.

Quando não se conhece o valor do desvio padrão, deve-se adotar para o cálculo da resistência de dosagem o valor apresentado pela NBR 12655/ 2006 de acordo com as condições de preparo estabelecidas anteriormente, e deve ser mantida permanente durante a construção. Estes valores estão apresentados no quadro da Tabela 2.7. A norma estabelece ainda que para a Condição C, enquanto não se conhece o desvio-padrão, exige-se que os concretos da classe C15 tenham consumo de cimento de 350 kg/ m³.

Tabela 2.7 - Desvio padrão a ser adotado de acordo com a condição de preparo do concreto (NBR 12655/ 2006).

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão (Sd) MPa
A	4,0
B	5,5
C	7,0

2.5.2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

De acordo com a lei de Hooke, o módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão normal e a deformação correspondente, dentro do limite elástico. A argamassa, como no caso do concreto não é um material tipicamente elástico para qualquer estágio de carregamento a que é submetida. Sendo assim, a lei de Hooke tem uma aplicação aproximada. Por causa da falta de proporcionalidade entre tensões e deformações, o módulo de deformação não é constante para qualquer intervalo de carga. Portanto, o seu valor varia de acordo com o ponto do diagrama onde é definido e a forma como é calculado, secante ou tangente à curva.

No regime de tensão longitudinal (tração e compressão), onde a deformação pode ser totalmente recuperada e a relação tensão-deformação é linear e crescente, o módulo é chamado de elástico, representado por “ E ” e dado pelo quociente entre a tensão imposta e a deformação correspondente. O módulo de elasticidade do concreto depende diretamente dos módulos de elasticidade dos agregados e da matriz (SILVA, 2004).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994) o motivo da não linearidade da relação tensão-deformação pode ser explicado através do processo de micro-fissuração progressivo do concreto sob carga, também válida para argamassas. Neste caso, com a aplicação do carregamento, as micro-fissuras existentes na zona de transição aumentam, ocorrendo a propagação através da pasta de cimento (ARAÚJO, 2004).

Para a determinação do módulo foram seguidas as recomendações da NBR 8522/ 2003 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Em 21 de Abril de 2008 entrou em vigor uma nova revisão desta norma, onde foram feitas alterações visando diminuir a variabilidade dos resultados obtidos pelo ensaio.

- **Módulo de deformação estático**

Na avaliação do comportamento global da estrutura e para o cálculo das perdas de protensão, a norma recomenda a utilização em projeto do módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).

Na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal pode ser adotado um módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de elasticidade secante (E_{cs}).

Na NBR 6118/ 2007 o módulo de elasticidade deve ser obtido segundo ensaio descrito na NBR 8522/ 2003, sendo considerado o módulo de deformação tangente inicial cordal igual a 30% de f_c , ou outra tensão especificada projeto. Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade usando a expressão:

$$E_{ci} = 5600 \times f_{ck}^{1/2} \quad \text{Equação 2-24}$$

Onde:

E_{ci} - módulo de deformação tangente inicial, em MPa;

f_{ck} - é a resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

O módulo de elasticidade secante a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve ser calculado pela expressão:

$$E_{cs} = 0,85 \times E_{ci} \quad \text{Equação 2-25}$$

Onde:

E_{ci} - módulo de deformação tangente inicial, em MPa;

E_{cs} - módulo de elasticidade secante, em MPa.

Aproximações teóricas, com base em resultados de ensaios experimentais, têm sido adotadas em normas técnicas de projeto estrutural no mundo todo, correlacionando o módulo de elasticidade do concreto à sua resistência característica à compressão, porém tem-se verificado que não há uma correlação direta em todos os casos entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto. As equações para estimativa do módulo previstas nas normas de projeto estrutural podem ser utilizadas nos casos correntes, mas não atendem a todos os tipos de concreto (BATTAGIN, 2007).

A Figura 2.24 mostra a representação gráfica dos módulos citados anteriormente.

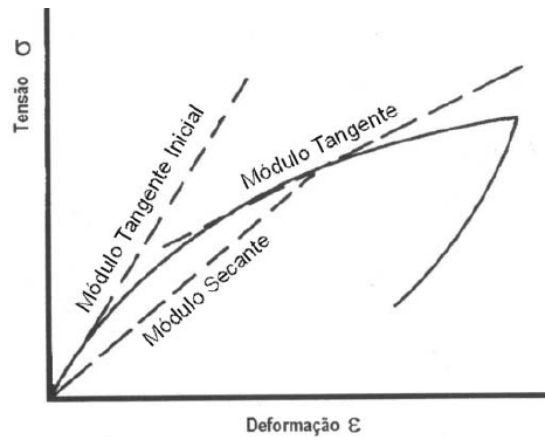


Figura 2.24 – Caracterização dos módulos de deformação

A NBR 6122/ 2003 estabelece que a argamassa utilizada na injeção de estacas raiz deve ter consumo de cimento não inferior a 600 kg/m^3 e um valor de f_{ck} compatível com as técnicas executivas e de controle não superior a 20 MPa. A NBR 8522/ 2003 determina quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias o valor do módulo de elasticidade deve ser calculado segundo a Equação 2-24. Sendo assim, utilizando a Equação 2-24 e considerando-se o $f_{ck} = 20\text{MPa}$, teremos o $E_{ci} = 30 \text{ GPa}$.

A Figura 2.25 descreve os fatores que influenciam nos resultados do módulo de elasticidade.

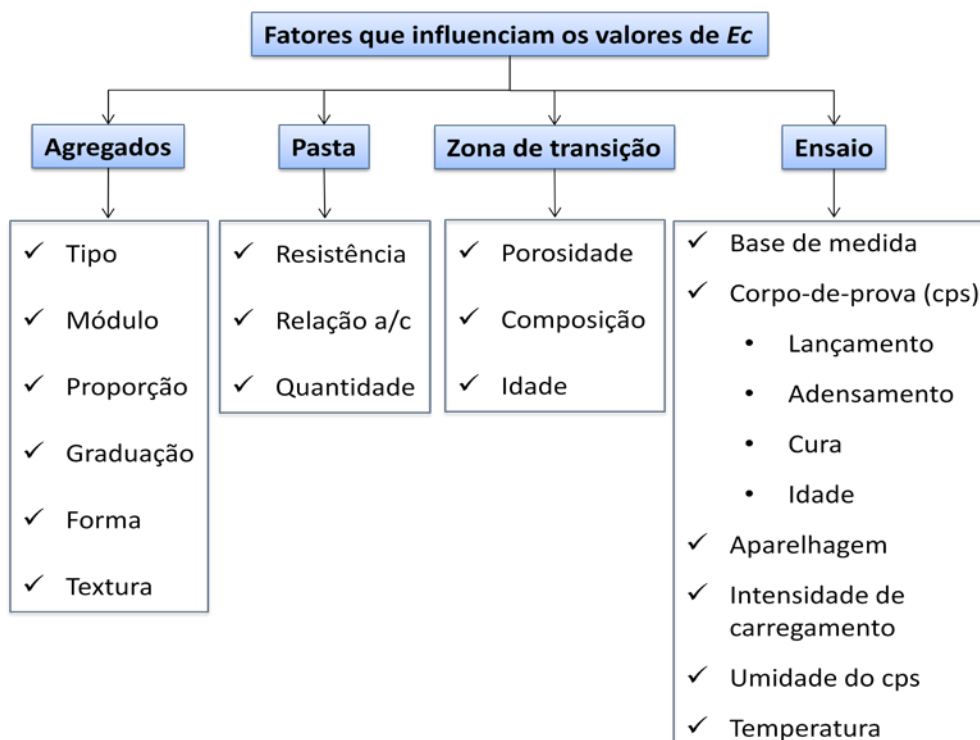


Figura 2.25 - Fatores que interferem no resultado do Módulo de Deformação (BATTAGIN, 2007).

• **Módulo de deformação dinâmico**

O módulo dinâmico é dado pelo módulo tangente inicial, que é o módulo tangente para uma reta traçada desde a origem, e é maior que o módulo de deformação estático, (MEHTA & MONTEIRO, 1994 e NEVILLE, 1997).

O módulo tangente inicial é facilmente determinado pelo ensaio dinâmico por ultrassom, sendo indicado para comprovar se há descontinuidade do material.

• **Módulo de deformação à flexão**

O ensaio de flexão é de fácil realização em laboratório, além de representar melhor as solicitações a que a argamassa será submetida. O cálculo deste módulo pode ser feito a partir da relação entre a tensão de tração na flexão e a deformação correspondente, considerando-se uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada no meio do vão. O módulo de deformação, em função da flecha, é dado pela Equação 2-26.

$$E = \frac{F.l^3}{4\delta.b.d^3} \quad \text{Equação 2-26}$$

Onde:

E = módulo de deformação à flexão, em MPa;

F = carga aplicada no meio do vão, em N;

l = distância entre apoios, em mm;

b = base do corpo-de-prova, em mm;

d = espessura do corpo-de-prova, em mm;

δ = deslocamento (flecha) no meio do corpo-de-prova, em mm.

A relação água/ cimento é um dos fatores que define as propriedades da pasta de cimento, afetando também o módulo de elasticidade. Assim como a resistência à compressão, à medida que se aumenta a relação água/ cimento diminui-se o valor do módulo de elasticidade, mantendo-se a mesma consistência. A Figura 2.26 representa a influência da relação água-cimento sobre o módulo de elasticidade do concreto.

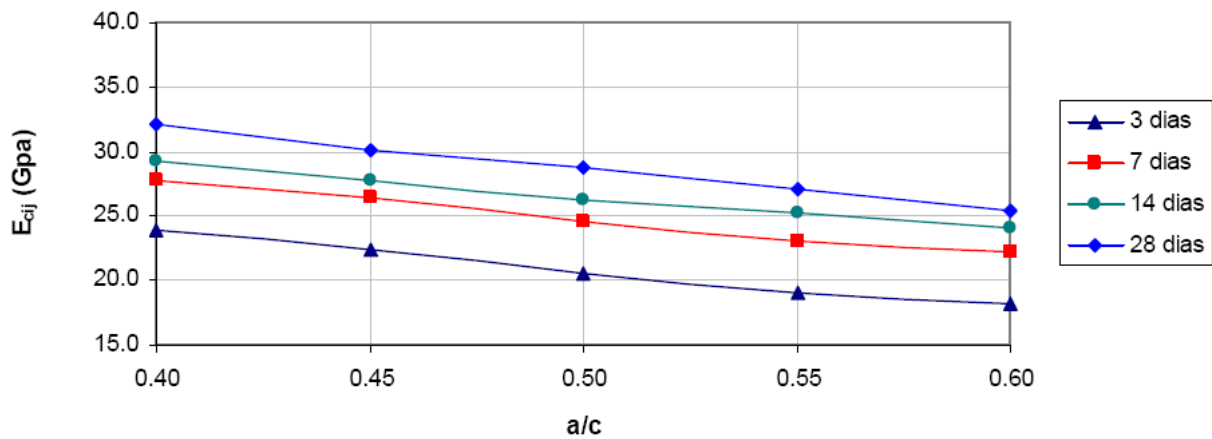


Figura 2.26 - Influência da relação a/c sobre o módulo de elasticidade (NUNES, 2005)

A Figura 2.27 mostra os resultados obtidos em argamassas de revestimento onde se variou o consumo de cimento. Pode-se observar que o módulo aumenta com o aumento da resistência à compressão.

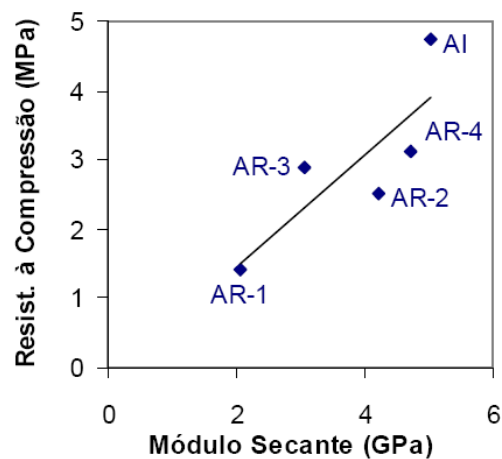


Figura 2.27 - Influência da resistência à compressão sobre o módulo de elasticidade em argamassas (ARAÚJO, 2004)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa foi elaborado visando estudar as características das argamassas que são utilizadas para a injeção de estacas raiz, mediante a caracterização dos parâmetros capazes de interferir nas propriedades do estado fresco, bem como analisar os resultados fornecidos pelos diferentes métodos de ensaio. As variações nas composições das argamassas foram planejadas, levando-se em conta alguns dos principais fatores que interferem na trabalhabilidade, destacando-se: a composição granulométrica dos agregados, o teor de água, teor e natureza dos aglomerantes presentes na composição.

Este capítulo apresenta a descrição do programa experimental elaborado para definir os critérios de consistência adequados no processo executivo da estaca raiz, garantindo sua integridade e eficiência no comportamento estrutural. Também foi realizada a caracterização dos materiais utilizados. Serão também apresentadas as particularidades de cada etapa, abordando-se as condições fixas e as variáveis estudadas. O estudo foi realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília - LEM.

A pesquisa abordada nesta dissertação utilizou o ensaio do Vane Test para realizar a caracterização das argamassas no estado fresco, juntamente com o ensaio do V - Funil. No estado endurecido foram utilizados vários métodos que visam caracterizar as principais propriedades físico-mecânicas das argamassas. Foram avaliadas três argamassas distintas, sendo que a primeira argamassa foi composta apenas por areia grossa, a segunda apenas por areia fina e a última composta pela mistura das duas anteriores.

Cabe salientar que este estudo é de caráter exploratório, buscando identificar os parâmetros capazes de interferir nas propriedades das argamassas no estado fresco, frente às variações impostas. As etapas de desenvolvimento do programa experimental serão discutidas nos próximos itens.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E ENSAIOS UTILIZADOS

Os estudos tiveram início com a definição e caracterização dos materiais constituintes das referidas argamassas (cimento e areias). Foram desenvolvidas algumas atividades para o

processamento dos materiais como, por exemplo, seleção, verificação das curvas granulométricas das areias, formação das granulometrias das areias utilizadas na composição das argamassas.

Os materiais utilizados na composição das argamassas foram cimento, areia, e água. Desta forma, são apresentadas, a seguir, as principais características dos materiais utilizados no presente estudo.

3.1.1 CIMENTO

O cimento empregado na dosagem realizada no Piloto 02, para a confecção das argamassas, foi do tipo “Portland”, composto com adição de filler calcário, CP II-F 32, fabricado pela Indústria Nassau. Este cimento foi adquirido na obra monitorada, com o objetivo de reproduzir em laboratório uma argamassa com a consistência igual àquela avaliada na etapa de monitoramento da obra.

O cimento empregado no Projeto Experimental I e II, realizados em laboratório foi do tipo Portland, composto com adição e resistente a sulfatos, CP IV-RS-32 (NBR 11578/ 1991). O cimento em questão foi produzido pela fábrica de cimento TOCANTINS, tendo sido fornecido em sacos de 50 kg, de um mesmo lote. Os ensaios químicos podem ser analisados na Tabela 3.1, os ensaios físicos na Tabela 3.2 e Tabela 3.3.

Tabela 3.1 - Ensaios químicos realizados no cimento (CP IV-RS-32).

ENSAIOS QUÍMICOS				
Ensaio	NBR N°	Unidade	Resultados	Especificação NBR 5736/91
Perda ao Fogo - PF	NM 18/ 04	%	3,10	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	14656/ 01	%	3,00	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	NM 16/04	%	2,05	≤ 4,0
Resíduo Insolúvel - RI	NM 22/04	%	13,42	-
Equivalente Alcalino em Na ₂ O - (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)	-	%	0,69	-
Óxido de Cálcio Livre - CaO(Livre)	NM 13/04	%	-	-

Nota: Ensaios realizados no laboratório do fabricante.

Tabela 3.2 - Ensaios físicos realizados no cimento (CP IV-RS-32).

ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS				
Ensaio	NBR N°	Unidade	Resultados	Especificação NBR 5736/91
Área Específica (Blaine)	NM 76/ 98	cm ² /g	4,485	-
Massa Específica	NM 23/ 01	g/cm ³	3,05	-
Densidade Aparente	-	g/cm ³	1,07	-
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)	11579/91	%	4,8	≤ 8
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)	11579/91	%	19,4	-
Água da Pasta de Consistência Normal	NM 43/ 03	%	28,8	-
Início de Pega	NM 65/03	min	148	≥ 60
Fim de Pega	NM 65/03	min	221	≤ 720
Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente	11582/ 91	mm	0	≤ 5,0

NOTA: Ensaios realizados no laboratório do fabricante.

Tabela 3.3 – Ensaios de resistência mecânica realizada no cimento (CP IV-RS-32).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) - NBR 7215/ 96					
Idade	Mín.	Máx.	Média	Desvio	Especificação NBR - 5736
1	8,6	14,0	11,4	1,72	não aplicável
3	16,4	26,2	23,7	2,50	≥ 10,0
7	29,6	34,3	32,0	1,54	≥ 20,0
28	-	-	-	-	≥ 32,0

NOTA: Ensaios realizados em laboratório do fabricante.

Pode-se observar que a superfície de Blaine, apesar de não possuir indicação na normalização em vigor para esse tipo de cimento, enquadra-se no intervalo recomendado para o CPV ARI, ou seja, superior a 3000 cm²/ g.

A distribuição granulométrica do CP IV – RS – 32, obtida no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília utilizou um granulômetro a laser, sendo apresentada no Anexo A.

A utilização desse cimento se justifica por apresentar características, que atendem às exigências necessárias ao uso, não apresentando na caracterização física e química, valores que possam influenciar negativamente as propriedades no estado fresco das argamassas (foco do estudo).

3.1.2 AGREGADO

Para a determinação adequada da mistura entre as duas faixas granulométricas de areias, foi utilizado o método da NM 45/ 2006 – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. A escolha da composição considerada “ideal” baseia-se no maior valor obtido para a massa unitária no estado compactado, conforme orientações de Helene e Terzian (1992) para a escolha da proporção de mistura entre agregados miúdos e graúdos.

Para a composição dos agregados foram utilizadas duas areias, sendo a primeira classificada como areia lavada média, adquirida no comércio local de Santa Maria, proveniente do Rio Paracatu em Minas Gerais, e a segunda classificada como areia fina, comprada num fornecedor do comércio de Brasília, proveniente do Rio Corumbá, no estado de Goiás.

Neste estudo empregaram-se três composições diferentes de areias (AF1, AG1 e AGF1), com distribuição granulométrica distintas, tamanho/ formato de grãos, conforme a Tabela 3.4. A composição AF1 é composta apenas por areia fina, a composição AG1 é formada apenas por areia grossa e a composição AGF1 é constituída pela mistura da areia fina e grossa, a fim de se obter a melhor proporção dentro dos critérios de continuidade, visando melhorar as propriedades no estado fresco e endurecido.

Tabela 3.4 - Composição dos agregados utilizados na pesquisa.

Tipos de areias	% de areia utilizada na composição dos agregados		
	AF1	AG1	AGF1
Fina	100 %	-	35 %
Grossa	-	100 %	65 %

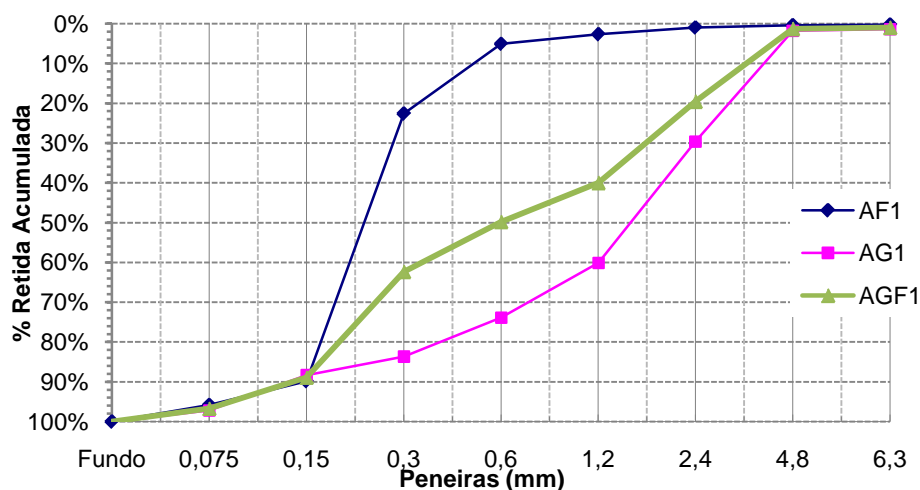


Figura 3.1 – Distribuições granulométricas das areias utilizadas.

Os ensaios para a obtenção das distribuições granulométricas dos agregados miúdos foram realizados seguindo o procedimento indicado na norma MN 248/ 2001 – Determinação da composição granulométrica e estão demonstrados na Figura 3.1.

Sabe-se que quanto maior o índice de vazios e a área específica da areia, maior o consumo de aglomerantes e água de amassamento. Para verificar esta influência, calculou-se o índice de vazios e o volume de vazios das areias utilizando-se a Equação 3-1 e Equação 3-2 respectivamente, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.5.

$$I_V = 1 - \frac{\gamma}{\delta} \quad \text{Equação 3-1}$$

$$V_V = I_V * V_a \quad \text{Equação 3-2}$$

Onde:

I_V – índice de vazios;

γ – massa unitária da areia (g/ cm³);

δ – massa específica da areia (g/ cm³);

V_V – volume de vazios da areia (dm³);

V_a – volume de areia (dm³).

Calculou-se igualmente o coeficiente de uniformidade das areias através da Equação 3-3. Segundo esse critério foram consideradas areias muito uniformes, quando $C_{un} < 5$, de uniformidade média $5 < C_{un} < 15$ e menos uniforme, quando $C_{un} > 15$. Este coeficiente é um parâmetro de análise de influência da areia nas propriedades de argamassas, quando estiver associado a uma curva de distribuição granulométrica (CARNEIRO, 1999). Os resultados estão descritos na Tabela 3.5.

$$C_{un} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Equação 3-3}$$

Onde:

C_{un} – coeficiente de uniformidade;

D_{60} – abertura da malha da peneira na qual passa 60% do material (em mm);

D_{10} – abertura de malha da peneira na qual passa 10% do material (mm).

Tabela 3.5 – Caracterização física dos agregados utilizados na pesquisa

Propriedades/ Normas	Unidade	Composições (agregados)		
		AG1	AF1	AGF1
Massa unitária/ MN 45 (2006)	g/ cm ³	1,661	1,405	1,736
Massa específica/ MN 52 (2003)	g/ cm ³	2,618	2,646	2,632
Coefficiente de uniformidade	-	14,79	1,74	8,70
Módulo de finura/ MN 248 (2001)	-	3,37	1,21	2,62
Índice de vazios	-	0,37	0,47	0,34

As séries AGF1 e AG1 são classificadas como sendo de uniformidade média, mas cabe ressaltar que a AG1 está no limite da faixa e a composição e a série AF1 é classificada como muito uniforme.

Analisando os resultados dos ensaios que caracterizam os agregados, constatou-se uma tendência entre o volume de vazios das areias em relação aos coeficientes de uniformidade, sendo que, as areias classificadas tendo uniformidade média (AG1 e AGF1) apresentaram menor volume de vazios do que as areias classificadas como muito uniformes (AF1).

Utilizando a classificação com base no *módulo de finura (MF)* tem-se que a composição AF1 é classificada como areia fina, a composição AG1 se enquadra como uma areia grossa e a composição AGF1 é classificada como areia média.

3.1.3 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS UTILIZADOS

3.1.3.1 Procedimento de preparo e mistura das argamassas

A areia utilizada na dosagem das argamassas foi armazenada em ambiente externo, isto é, sujeita às intempéries, com o objetivo de simular a forma como e armazenada na obra. As argamassas foram produzidas utilizando-se o misturador planetário de eixo vertical CIBE, com capacidade de 20 litros. A seguinte seqüência da produção foi adotada:



Figura 3.2- Misturador utilizado no preparo das argamassas.

O procedimento descrito neste item foi utilizado, anteriormente, ao desenvolvimento de cada método de ensaio. Com as composições previamente definidas em termos dos materiais constituintes (agregados, cimento e água) era realizada a homogeneização, sendo descritos as etapas a seguir:

- Lançamento do agregado no misturador e parte da água. Os componentes eram misturados por 3 minutos para homogeneização. Quando se utilizava a composição AGF1, composta pela mistura entre a areia fina e a grossa, era realizado a homogeneização das duas areias anteriormente;
- Após a mistura da areia com parte da água, foi adicionado o material cimentante aos componentes, seguido de 1,5 minutos de processamento, para a homogeneização;
- Por fim, acrescentava-se o restante da água à mistura úmida. Após toda a adição dos componentes no misturador, a mistura era processada por cerca de 1,5 minutos até a completa homogeneização.

Nesta etapa foram moldados corpos-de-prova segundo a NBR 13279/ 2005 e a revisão anterior desta mesma norma (NBR 13279/ 1995), pretendendo comparar os resultados obtidos. A NBR 13279/ 2005 estabelece corpos-de-prova prismáticos (4x4x16 cm), porém a revisão anterior especifica corpos-de-prova cilíndricos (5x10cm).

Sabe-se que o adensamento manual de corpos-de-prova pode influenciar nos resultados, em função da energia aplicada não ser constante. Para minimizar esses efeitos, utilizou-se uma mesa vibratória no adensamento dos corpos-de-prova cilíndricos, apresentando 57,5 Hz de vibração e aproximadamente 1,5 mm de amplitude. As dimensões dos moldes e o método utilizado para moldar as amostras estão descritos a seguir.

- Os corpos-de-prova de prova cilíndricos tem 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, moldados em duas camadas, e cada camada foi vibrada por aproximadamente 30 segundos sobre mesa vibratória para realização do adensamento. O rasamento foi realizado com uma colher de pedreiro. As amostras após (48 ± 24) h foram retiradas dos moldes e mantidas em câmara úmida até a data do rompimento, aos 28 dias. Estes corpos-de-prova foram utilizados nos ensaios para determinar as seguintes propriedades: resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222/ 1994), resistência à compressão (NBR 13279/ 1995), módulo de elasticidade (NBR 8522/ 2003);
- Os corpos-de-prova prismáticos tem 4 cm de largura por 4 cm de altura e 16 cm de comprimento, sendo moldados em duas camadas e adensados com 30 quedas por camada, numa mesa de adensamento por queda. Posteriormente realizava-se o rasamento dos corpos-de-prova com o auxílio de uma régua metálica. As amostras após (48 ± 24) h foram retiradas dos moldes e mantidas em temperatura ambiente até a data do rompimento, aos 28 dias. Estes corpos-de-prova foram utilizados nos ensaios para determinar as seguintes propriedades: resistência à tração na flexão (NBR 13279/ 2005), resistência à compressão (NBR 13279/ 2005). A Figura 3.3 mostra os moldes utilizados nos ensaios.



(a)



(b)

Figura 3.3 - a) Mesa vibratória para adensamento dos prismas; b) Molde utilizado para execução dos cps.

3.1.4 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A análise das propriedades no estado fresco foi realizada através dos ensaios descritos a seguir:

3.1.4.1 Método do Vane Teste

O método *Vane Test* ou ensaio de palheta foi utilizado neste trabalho para a determinação da consistência das argamassas, através da determinação da tensão de escoamento. O procedimento usado baseou-se na metodologia proposta por Souza (2005), que apresenta um resumo da rotina de ensaio a ser seguida durante a avaliação de uma argamassa de revestimento.

As características do equipamento utilizado, bem como dos dispositivos são:

- Possui uma base de medida similar aclopada a uma mola (constante de torção igual a 0,0309 kg.com/°) e uma alavanca para aplicação do torque. A taxa de cisalhamento ou velocidade angular utilizada durante a execução do ensaio foi de aproximadamente 0,1 rpm;
- uma palheta, tendo duas lâminas em cruz com altura de 70 mm e largura de 35 mm;
- um recipiente cilíndrico para o armazenamento da argamassa, com diâmetro de 100 mm e altura de 180 mm, compatíveis com a palheta utilizada;

Na realização do ensaio, primeiramente, a argamassa recém-misturada é colocada em um recipiente cilíndrico, com capacidade de aproximadamente de 962 ml, em três camadas aproximadamente iguais, aplicando-se 20 golpes em cada camada, com o auxílio de uma espátula de bordas retas, rasando-se, no final, o excesso de argamassa com a espátula. Cabe destacar que se deve ter certa atenção, durante esta etapa, para se evitar o aparecimento de vazios na região de interface entre a palheta e a amostra, fato que pode comprometer o resultado.

O ensaio era realizado a partir da introdução da palheta na amostra sendo aplicado manualmente um torque na medida aproximada de 90°/min, registrando, através de escala de leitura, o cisalhamento. Com o auxílio do torquímetro, localizado na parte superior do equipamento, registrava-se o torque máximo necessário para romper a camada de argamassa localizada em volta da palheta. Com o torque máximo, obtido durante o ensaio (T_m) e as dimensões da palheta (D – diâmetro e H - altura), a partir da equação demonstrada no item 2.4.1, determinou-se a tensão de escoamento da argamassa.

Os resultados considerados, na avaliação de cada argamassa correspondem à média de três determinações consecutivas, realizadas em amostras diferentes de uma mesma argamassa.

3.1.4.2 Ensaio de perda de água sob sucção

O procedimento adotado para a realização desse ensaio é o mesmo utilizado por Araújo (2004), seguindo recomendações da NBR 13277/ 2005. A retenção de água das argamassas foi determinada adotando o princípio pelo qual se submete a argamassa a uma pressão de sucção de 50 mm de mercúrio através de uma aparelhagem composta por um funil (funil de Büchner modificado) e uma bomba de vácuo, conforme a Figura 3.4.



Figura 3.4- Equipamento utilizado no ensaio de retenção de água com o funil de Büchner modificado.

Para a realização do ensaio retenção de água é necessário a execução das etapas descritas a seguir (DO Ó, 2004):

- coloca-se o papel-filtro umedecido sobre o funil, conforme a Figura 3.5 - a;

- retira-se o excesso de água do papel-filtro, acionando a bomba de vácuo e aplicando ao conjunto uma sucção de 50 mm Hg durante aproximadamente 90 segundos;
- pesa-se o conjunto funil/papel-filtro úmido em balança com resolução de 0,01g e registra-se sua massa (M_{fv});
- preenche-se o prato do funil com uma amostra de argamassa até um pouco acima da borda e promovendo o seu adensamento aplicando-se 37 golpes: 16 junto à borda e 21 na parte central. Retira-se o excesso de argamassa mediante o uso de uma régua metálica, de tal forma a obter uma superfície plana;
- Realiza-se a limpeza da parte externa do funil e, assim, procede a pesagem em uma balança, com resolução de 0,01g, registrando-se a massa do conjunto funil e amostra de argamassa (M_{fc});
- coloca-se na parte superior do funil, uma tampa acrílica perfurada, com intuito de amenizar ou evitar a perda de água por evaporação (Figura 3.5 - b).
- aplica-se na amostra de argamassa a uma pressão negativa (sucção) correspondente à coluna de 50 mm Hg durante o intervalo de tempo de 1 e 15 minutos. Para cada um desses tempos, é necessário registro da massa correspondente (M_{fi}), como pode ser visto na Figura 3.5 - c.

As características do dispositivo utilizado estão descritas na Figura 3.5.



a) Funil com o papel umedecido, após tirar o excesso de água.



b) Funil e a tampa de acrílico perfurada, para evitar a evaporação de água.



b) Registro da massa do funil com argamassa após a sucção

Figura 3.5 - Seqüência da execução do ensaio de retenção de água (Araújo, 2004).

Com os dados obtidos no ensaio, e a partir das equações que seguem, determina-se a retenção de água da argamassa.

$$Ra = \frac{[1 - (ma - ms)]}{AF(ma - mv)} \times 100 \quad \text{Equação 3-4}$$

$$AF = \frac{mw}{m + mw} \quad \text{Equação 3-5}$$

Sendo:

$$Ra = \left[1 - \frac{M_{fc} - M_{fi}}{\frac{a}{af} \times (M_{fc} - M_{fv})} \right] \times 100 \quad \text{Equação 3-6}$$

e,

$$\frac{a}{af} = \frac{M_w}{M + M_w} \quad \text{Equação 3-7}$$

Onde:

Ra = retenção de água, em %;

M_{fv} = massa do funil vazio e filtro, em g;

M_{fc} = massa do funil cheio e filtro, em g;

M_{fi} = massa do funil para o tempo “i” de exposição à sucção, em g;

$\frac{a}{af}$ = relação água/argamassa fresca;

M_w = massa total de água utilizada na argamassa, em g;

M = soma das massas dos componentes anidros da argamassa (cimento cal e areia).

O ensaio de perda de água sob sucção foi assim definido, visando avaliar de forma indireta, a capacidade da argamassa em exibir tendência à exsudação, verificada em função de variações na sua composição. A idéia proposta foi avaliar, em poucos minutos, a quantidade de água livre capaz de contribuir, potencialmente, para o fenômeno de exsudação das argamassas. Entretanto, para o presente estudo, foram considerados os valores obtidos logo no primeiro minuto e após 15 minutos após o início do processo de sucção.

3.1.4.3 Funil V (V Funnel)

Os aparatos utilizados neste ensaio são: Funil V; um recipiente de capacidade de 5 litros para armazenar a amostra a ser colocada no funil; um recipiente tipo bandeja de capacidade de 12 l

para receber a amostra derramada de dentro do funil; um cronômetro de precisão de 0,1s para medir o tempo de esvaziamento total do funil, espátula para nivelar a superfície e concha para coletar a argamassa. A Figura 3.6 mostra o Funil V utilizado.



Figura 3.6 – Funil V utilizado nos ensaios realizados

O ensaio do Funil V apresenta a seguinte seqüência:

- Molhar o interior do Funil V, limpando com um pano molhado.
- Posicionar o funil no suporte, verificando que o seu fundo esteja fechado, próximo ao recipiente receptor da amostra.
- Nivelar a superfície de topo do funil.
- Utilizando uma concha introduzir a amostra de argamassa no funil sem exercer sobre a mesma nenhum tipo de compactação ou vibração, em seguida nivelar a superfície da argamassa com uma espátula.
- Após 15 segundos, abrir rapidamente a tampa do orifício inferior do funil e simultaneamente ligar o cronômetro registrando o tempo (em segundos) de esvaziamento total do funil.
- Quando da repetição do ensaio, é aconselhável que o tempo em que a argamassa escoer aumente em, no máximo, três segundos.

Como é preciso acionar o cronômetro no exato momento em que a porta do aparelho for aberta, são necessários dois operadores, assim como uma base para deixar o equipamento suspenso. O equipamento deve ser firmemente fixado e nivelado, de forma que não se movimente ao longo da execução do ensaio.

3.1.5 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Sabe-se que as superfícies irregulares e não planas nos topos dos corpos-de-prova causam problemas como a transmissão não uniforme da tensão de compressão, com conseqüente concentração de tensão em pontas da superfície das amostras, promovendo a ruptura antecipada das mesmas. Os corpos-de-prova que foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão foram capeados com enxofre.

A verificação das propriedades mecânicas foi realizada através dos seguintes ensaios:

- NBR 7222/ 1994 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Para a realização deste ensaio foram utilizados dois corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm (diâmetro e altura).
- NBR 13279/ 2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. São ensaiados corpos-de-prova prismáticos de 4x4x16 cm (largura, altura, comprimento). Primeiramente são ensaiados três corpos-de-prova à tração através do ensaio à flexão e depois, com as partes resultantes, são ensaiados seis corpos-de-prova à compressão axial.
- NBR 13279/ 1995 (revisão anterior da NBR 13279/ 2005) – Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio. Neste ensaio foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm (diâmetro e altura), a fim de comparar com os resultados obtidos pela nova revisão desta norma.

3.1.5.1 Resistência à compressão axial

No procedimento de preparo das argamassas realizadas nessa pesquisa e em laboratório, a areia e o cimento foram medidos em massa, a água de amassamento também foi medida em massa, fazendo-se a correção na quantidade de água devido à umidade da areia. Sendo assim a o desvio-padrão equivale a 4,0 MPa (condição A, Tabela 2.7), resultando-se numa resistência de dosagem (f_{cj}) igual a 26,6 MPa.

Antes da realização da dosagem em laboratório foi feito o acompanhamento de algumas obras na etapa de execução de estacas raiz na cidade de Águas Claras, próximo a Brasília. Na obra o cimento foi medido em massa, a água em volume (latas) e a areia em volume, mas não feito a aferição da umidade da areia, corrigindo-se a quantidade de água adicionada na mistura em função da avaliação visual da umidade da areia. Analisando-se este procedimento de mistura, verifica-se que não é compatível com as recomendações estabelecidas nas condições B e C. Sendo assim adotou-se o desvio-padrão igual a 5,5, mesmo sabendo que o procedimento de campo não segue as recomendações quanto à correção da umidade, mas entendeu-se que seria a melhor opção, sendo a condição C aplicável apenas aos concretos de classe C10 e C15. Tem-se então uma resistência de dosagem (f_{cj}) igual a 29,1 MPa, aproximada para 30,0 MPa.

Apesar de a dosagem ter sido realizada no laboratório, adotou-se o desvio-padrão para o procedimento realizado em campo/ obra, $f_{cj} = 30,0$ MPa, pois após os estudos realizados em laboratório, serão executadas algumas estacas raiz no campo experimental.

O ensaio de determinação da resistência à compressão axial em prismas (4 x 4 x 16 cm) é descrito pela NBR 13279/ 2005, que utiliza seis semi-prismas maiores que 72 mm, provenientes do ensaio de resistência à tração na flexão, simulando ensaio em cubo de 4 cm de lado. Os ensaios foram executados no LEM, utilizando-se uma prensa Amsler, que possui aplicação de carga manual e três anéis de carga para verificação da força aplicada, fabricada pela Wolpert. Estes anéis apresentam capacidade de carga de 60 kgf, 120 kgf e 300 kgf (prensa usada nos ensaios de resistência à tração em barras de aço), veja a Figura 3.7.

O ensaio para a determinação da resistência à compressão axial também foi realizado em corpos-de-prova cilíndricos segundo as recomendações da norma NBR 13279/ 1995, para os corpos-de-prova 5 x 10 cm, e NBR 5739/ 2007 para os corpos-de-prova 15 x 30 cm.

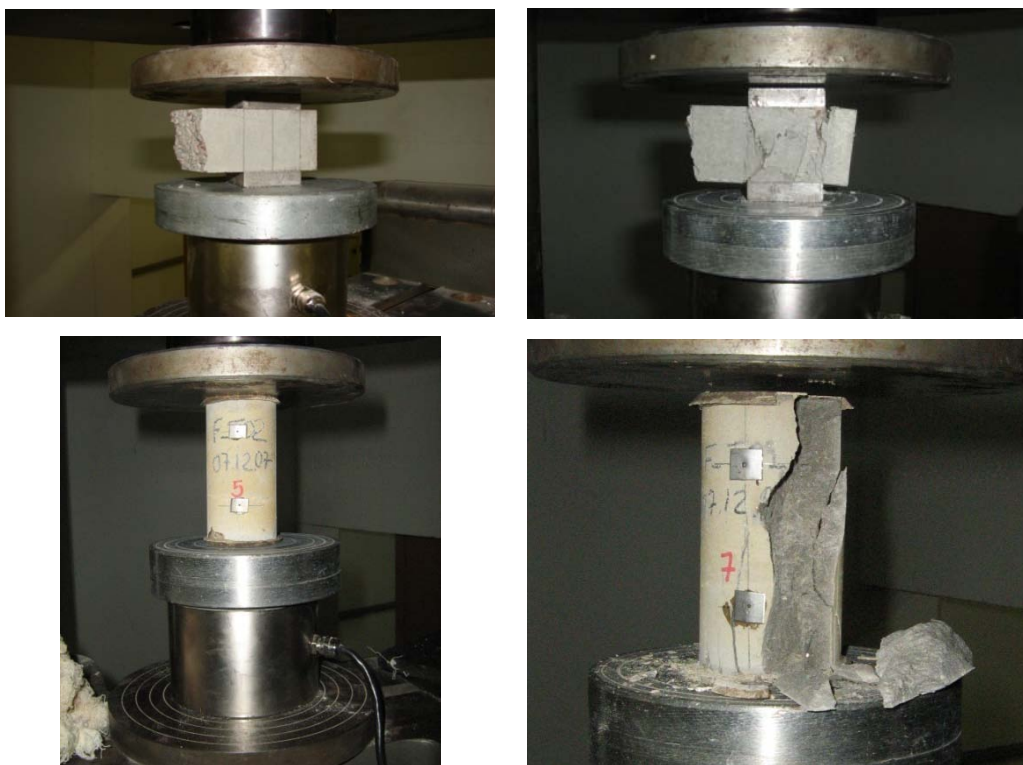


Figura 3.7 Ensaio de compressão axial em corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos.

O objetivo destes ensaios é comparar os resultados das séries de argamassas e discutir os métodos utilizados observando-se as variações quanto à geometria dos corpos-de-prova.

3.1.5.2 Resistência à compressão diametral

Este ensaio tem como objetivo caracterizar a resistência à tração indireta e comparar o método com o ensaio de determinação da resistência à tração na flexão.

Os procedimentos para a realização deste ensaio são prescritos pela norma NBR 7222/ 1994 para a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos (5 x 10 cm). A Figura 3.8 esboça o ensaio realizado.



Figura 3.8 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral segundo a NBR 7222/ 94.

A prensa utilizada neste ensaio foi a mesma utilizada para medir a resistência à compressão por flexão e compressão axial. Os corpos-de-prova ensaiados tem dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A resistência à tração por compressão diametral é determinada através da seguinte equação:

$$f_{t.D} = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times L} \quad \text{Equação 3-8}$$

Onde:

$f_{t.D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa;

F = carga máxima obtida no ensaio, em kN;

D = diâmetro do corpo-de-prova, em mm;

L = altura do corpo-de-prova, em mm.

3.1.5.3 Resistência à tração por flexão

Este ensaio tem como objetivo de medir a resistência à tração por flexão e comparar os resultados determinados pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

O ensaio consiste em aplicar uma carga centrada sobre o corpo-de-prova bi-apoiado, rompendo-o à flexão. A resistência à tração é determinada através da Equação 3-9.

$$f = \frac{1,5 \times F \times l}{(d \times b^2)} \quad \text{Equação 3-9}$$

Onde:

f – resistência à tração na flexão em MPa;

F – força aplicada em N;

l – distância entre apoios igual a 100 mm para ensaios em prismas e 160 mm para ensaios em placas isoladas;

b – largura do corpo-de-prova em mm;

d – altura do corpo-de-prova em mm.

A prensa utilizada possui aplicação de carga manual e a medição da força aplicada realizada por uma célula de carga com capacidade máxima de 5000 kg. Os corpos-de-prova ensaiados foram prismáticos (4 x 4 x 16 cm) segundo recomendações da NBR 13279/ 2005. A Figura 3.9 ilustra a execução do ensaio.

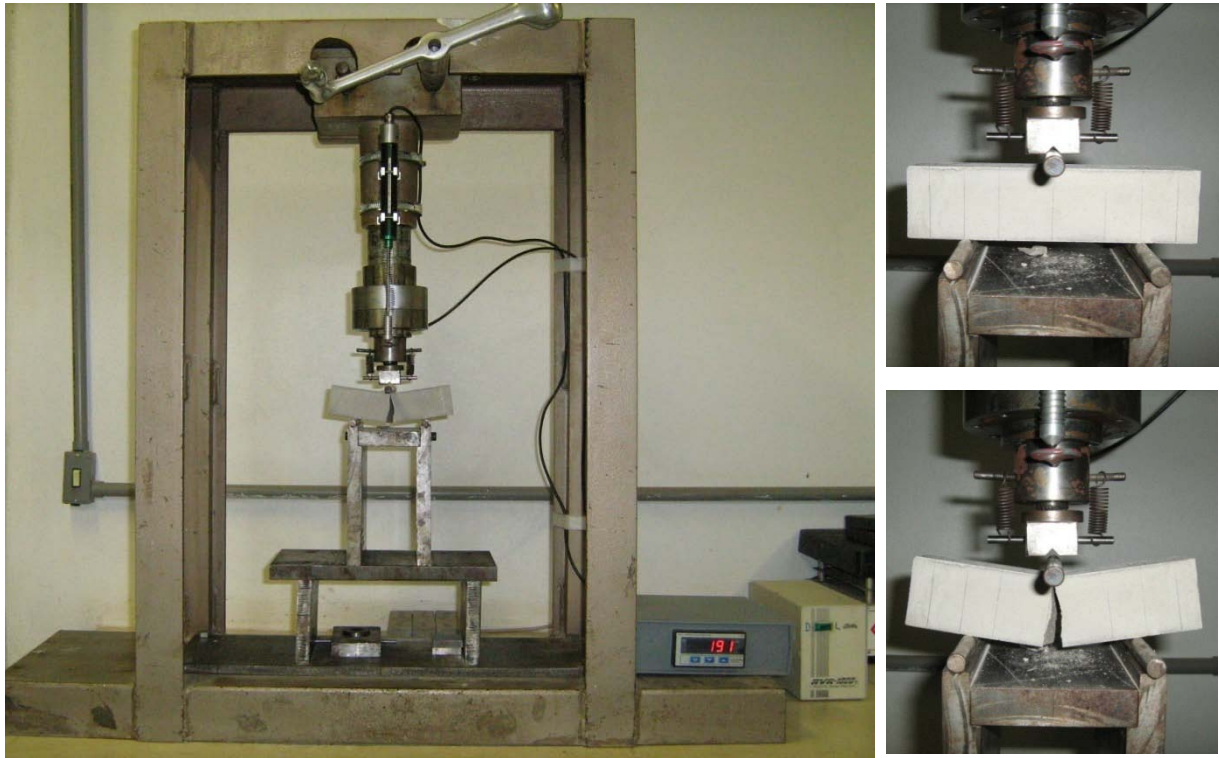


Figura 3.9 - Ensaio de resistência à tração na flexão

3.1.5.4 Módulo de elasticidade

Para a realização deste ensaio foram seguidas as recomendações da NBR 8522/ 2003 - Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva tensão-deformação, com as devidas modificações para ensaio em argamassas de revestimento. A tensão inicial do ensaio foi de 100 e 300 kg ao invés de 0,5 MPa especificada para concretos.

Para determinação do módulo tangente inicial, após o posicionamento do corpo-de-prova é aplicado o carregamento até uma tensão de 30% de f_{cmj} (σ_b) a uma velocidade de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s. Este nível de carregamento deve ser mantido por 60 segundos e em seguida, reduzido à mesma velocidade do processo de carregamento até o nível de tensão básica $\sigma_{a1} = 0,5 \pm 0,1$ MPa). Devem ser realizados mais ciclos de carregamento adicionais, entre σ_a e σ_b mantendo-

se estas tensões por 60 segundos, como representa a Figura 3.10. Depois do último ciclo de carga são medidas as deformações específicas.

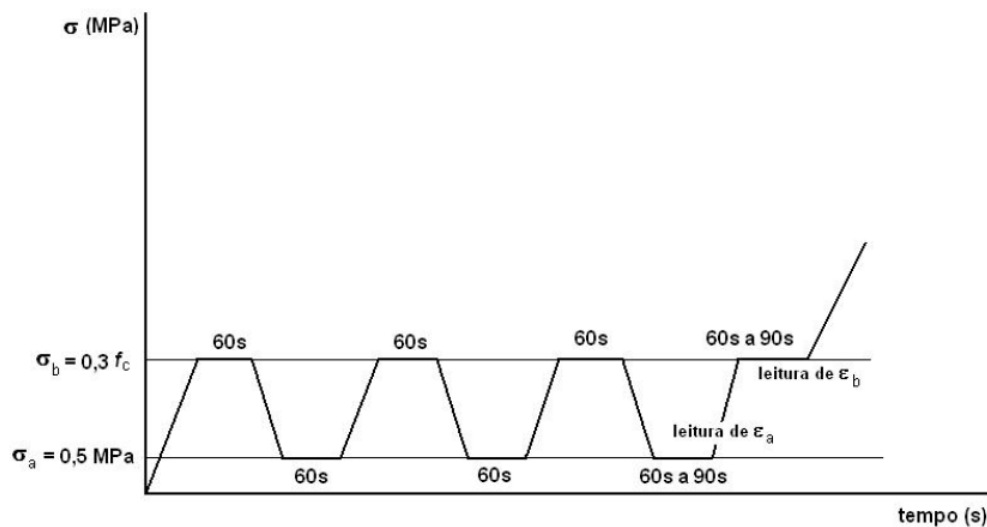


Figura 3.10 - Ciclos de carregamento do concreto para determinação de E_{ci} (NBR 8522/2003).

Para o ensaio de módulo de elasticidade foram necessários cinco corpos de prova cilíndricos, com 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, atendendo à condição $L/d = 2$, sendo que o diâmetro deva ser no mínimo 4 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo. Destes corpos-de-prova, dois devem ser utilizados para determinação a resistência à compressão e assim definir o nível de carregamento a ser aplicado no ensaio de módulo.

Os corpos-de-prova devem ser centralizados nos pratos da prensa e os medidores de deformação devem ser fixados de forma que os pontos de medição fiquem equidistantes dos extremos. A base de medida das deformações deve ser no mínimo igual a $2/3$ do diâmetro do corpo de prova e no máximo igual a esse diâmetro.

Nos corpos-de-prova foram coladas, com cola a base epóxi de secagem rápida, pastilhas metálicas de 5 x 5 mm de dimensões no sentido longitudinal do corpo-de-prova fixando-se as bases de medida. A distância entre o centro das pastilhas era de 5,0 cm (Figura 3.11). Cada corpo-de-prova tinha duas bases de medida dispostas em extremidades opostas.

As leituras de deformações foram realizadas utilizando um extensômetro mecânico “Tensotast Hunggenberger 80333”, com calibração de 0,001 mm por divisão, conforme a Figura 3.11. A prensa utilizada neste ensaio foi a mesma anteriormente descrita para o ensaio de resistência à tração na flexão.

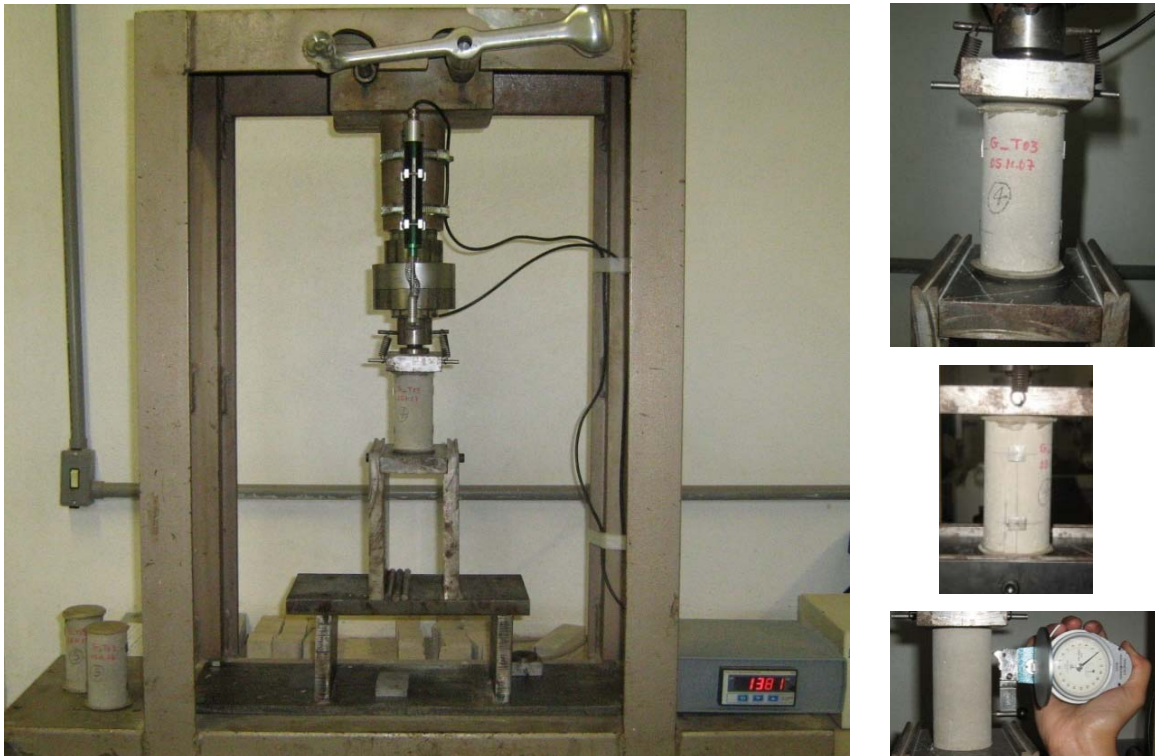


Figura 3.11 – Ensaio do módulo de elasticidade e disposição das pastilhas nos corpos-de-prova 5x10cm.

Após o término das leituras de deformação, o corpo-de-prova deve ser carregado até sua ruptura. Se a resistência efetiva à compressão do corpo-de-prova diferir de f_{cmj} em mais de 20%, os resultados devem ser descartados.

O módulo de deformação secante (E_{CS}) é uma propriedade do material, cujo valor numérico é a inclinação da reta secante ao diagrama tensão-deformação passando, neste caso, pelos pontos correspondentes à tensão de 10% e 30% da tensão de ruptura do corpo-de-prova. O E_{CS} foi calculado pela seguinte expressão:

$$E_{CS} = \frac{\sigma_{40} - \sigma_{10}}{\varepsilon_{40} - \varepsilon_{10}} \quad \text{Equação 3-10}$$

Onde:

E_{CS} = módulo de deformação secante em MPa;

σ_i = tensão igual a “i” % da tensão de ruptura, em MPa;

ε_i = deformação longitudinal específica (mm/mm) no corpo-de-prova correspondente à tensão igual a “i” % da tensão de ruptura.

3.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste item são descritas as etapas do programa experimental, a saber: *Estudo Piloto 1*, seguido pelo *Estudo Piloto 2*, *Projeto Experimental I*, *Projeto Experimental II* e *Estudo de Campo*. Os Programas Experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Ensaios de Materiais - LEM e o Estudo de Campo foi realizado no campo experimental do Laboratório de Geotecnia, integrantes do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, UnB.

A seguir estão descritas as etapas realizadas no desenvolvimento desta pesquisa.

3.2.1 PILOTO 01 - AVALIAÇÕES PRELIMINARES EM LABORATÓRIO

Para definir quais ensaios seriam utilizados na avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco, foram dosadas seis argamassas, utilizando uma areia média adquirida no mercado local de Brasília. A distribuição granulométrica desta areia encontra-se no ANEXO A.

Inicialmente foi dosada uma argamassa para avaliar quais ensaios seriam aplicados à metodologia deste trabalho. Foram realizados alguns ensaios, comumente utilizados para caracterizar a consistência de argamassas e concretos fluidos, como por exemplo: o *mini-slump*, *cone de escoamento*, *mesa de consistência*. Deve-se ressaltar que esta argamassa não possui características parecidas com a argamassa de revestimento, pois sua consistência é muito fluida, tendo o seu comportamento mais parecido com um Concreto Auto-Adensável (CAA) ou graute.

O traço utilizado foi de 1: 1,4: 0,6 (cimento : areia : a/c), sugerido na pesquisa realizada por Amaral e Gomes (2005), onde avaliaram as propriedades de argamassas utilizadas no processo de preenchimento de estaca raiz na região de Brasília.

Para a composição da areia foi utilizado o material retido nas peneiras 4,8, 2,4, 1,2 e 0,3 mm, sendo que o material da peneira 6,3mm foi descartado devido à dimensão das partículas poder

levar a distorção dos resultados. Foram realizadas duas composições de areias, sendo a primeira denominada por AM1, formada pelo material retido nas peneiras 4,8, 2,4 e 1,2 mm e a segunda composição denominada por AM2, utilizou o material retido nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3, conforme demonstrado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Composição dos agregados utilizados na pesquisa.

Composições de areia	% de areia retida em cada peneira				
	4,8 mm	2,4 mm	1,2 mm	0,6	0,3
AM1	33,3%	33,3%	33,3%	-	-
AM2		25,0%	25,0%	25,0%	25,0%

Através desta variação nas proporções e tamanhos das partículas da areia, conseguiu-se uma variação da curva granulométrica, obtendo na dosagem realizada com a composição AM1 partículas de diâmetros maiores do que na composição AM2.

O objetivo deste estudo foi analisar o comportamento da argamassa através da variação obtida pela granulometria, considerando ainda diferentes relações a/c em cada dosagem, como pode ser observado na Tabela 3.7.

Partindo do traço 1: 1,40: 0,6, foi realizado um estudo de dosagem considerando diferentes teores da relação água/ materiais secos (A%), através da variação da relação a/c em cada dosagem. A avaliação da consistência foi realizada pelo ensaio do Vane Test, o ensaio de penetração do cone, mesa de consistência e cone de escoamento, a fim de definir o ensaio que deveria ser utilizado para a caracterização da argamassa no estado fresco.

As argamassas foram produzidas utilizando-se o misturador planetário de eixo vertical CIBE, com capacidade de 20 litros. A seguinte seqüência da produção foi adotada:

- Lançamento da areia e parte da água, seguida de 3,0 minutos de processamento, para a homogeneização.
- Adição do cimento e a fração restante da água à mistura, seguida de 1,5 minutos de processamento;

Os resultados obtidos para a maior parte dos ensaios não foram satisfatórios, devido a restrições nos métodos (ensaios) para avaliação de argamassas com fluidez tão elevada, levando-se em consideração a influência da granulometria também.

Como resultado dessa análise inicial tem-se:

- Ensaio de penetração do cone - não pode ser aplicado, pois o cone penetra toda a argamassa apoiando-se na parte inferior do recipiente, causado pela elevada fluidez da argamassa;
- Mesa de Consistência – após a realização do ensaio constatou-se que houve um espalhamento grande da argamassa sobre a mesa de consistência, ficando apenas uma lâmina de espessura baixa, dificultando a mensuração da consistência além de poder distorcer os resultados;
- Cone de escoamento – na execução do ensaio ocorreu o bloqueio do fluxo, causado pela segregação da areia no funil do cone, não possibilitando a obtenção dos resultados;
- Vane Test – foram obtidos bons resultados neste ensaio, sendo descritos na Tabela 3.7 e Figura 3.12;

Tabela 3.7 - Dosagens realizadas, onde varia a curva granulométrica do agregado e relação a/c.

Areia	Traç. Unit. Massa (kg)		A%	τ_e (kPa)	Consistência
AM1	T01	1 : 1,4 : 0,55	23 %	0,033	Muito fluida
	T02	1 : 1,4 : 0,50	21 %	0,052	Fluida
	T03	1 : 1,4 : 0,45	19 %	0,128	Pouco fluida
AM2	T01	1 : 1,4 : 0,55	23 %	0,069	Fluida
	T02	1 : 1,4 : 0,50	21 %	0,078	Pouco fluida
	T03	1 : 1,4 : 0,40	17 %	0,092	Não fluida

Foi constatado que houve variações relevantes no comportamento da argamassa quanto ao fluxo após aproximadamente 20 minutos do término da homogeneização, verificado através das leituras no ensaio do Vane Test, e para que não houvesse distorção nos resultados, o ensaio foi executado logo após a homogeneização dos materiais.

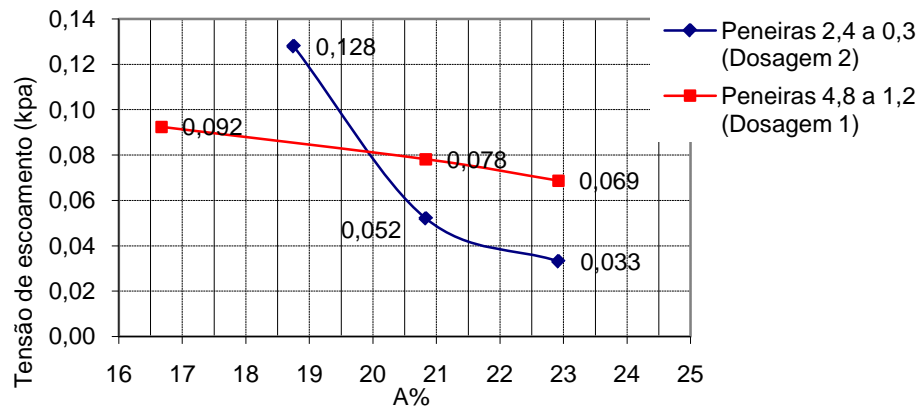


Figura 3.12 – Relação entre a Tensão de escoamento e a relação água/ materiais secos.

Pode-se observar que as duas curvas apresentaram a mesma tendência, à medida que a relação água/ materiais secos aumenta, as leituras obtidas no Vane Test diminuíram. A leitura do Vane Teste para o traço que utiliza $A\% = 19\%$ na dosagem AM1 não acompanha esta tendência. Em média os valores de τ_e encontrados são baixos, caracterizando uma argamassa muito fluida. A representação desse projeto experimental pode ser apresentada, esquematicamente, na Figura 3.13.

A partir destes resultados concluiu-se que a tensão de escoamento obtida pelo ensaio do Vane Test será o principal parâmetro a ser obtido para a caracterização de parâmetros no estado fresco. No entanto cabe salientar que este método não avalia ou serve para definir trabalhabilidade, ou seja, pode-se ter duas argamassas com resultados iguais de tensão de escoamento, mas que apresentam trabalhabilidade diferentes, conforme o Capítulo 2.

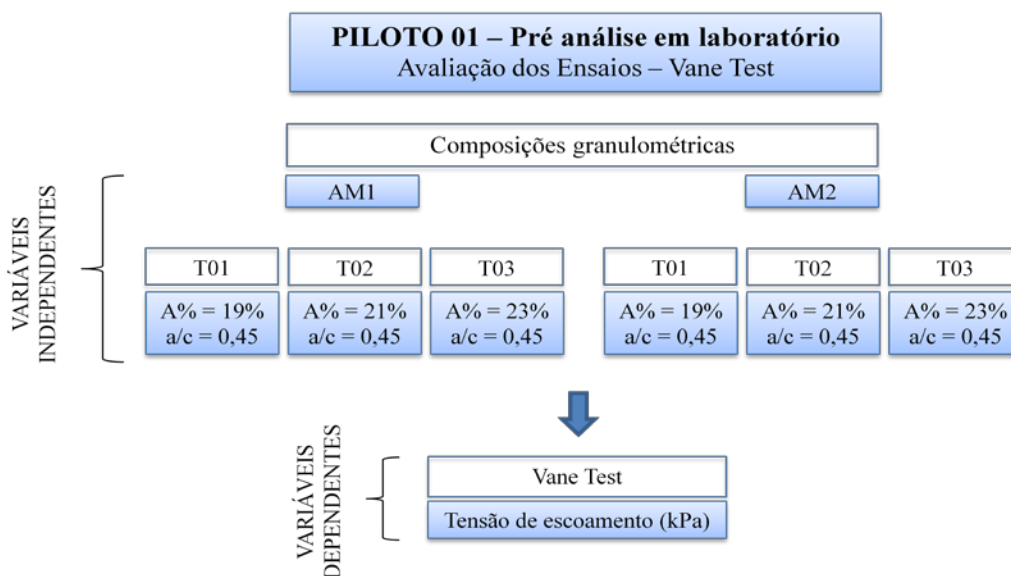


Figura 3.13 – Fluxograma do Piloto 01.

Esta etapa teve como objetivo avaliar o método *Vane test*, observando sua sensibilidade quanto às variações impostas na composição dos materiais.

3.2.2 PILOTO 02 - MONITORAMENTO EM CANTEIRO DE OBRA

Para obtenção de parâmetros iniciais a serem utilizados na caracterização das argamassas utilizadas na injeção de estacas raiz, foi feito o monitoramento de uma obra realizada por empresa de engenharia local, na qual se executava estaca raiz para o reforço das fundações existentes, em Águas Claras, Distrito Federal.

O principal objetivo desta etapa foi identificar os fatores que influenciam o processo de bombeamento das argamassas. Durante o monitoramento, foi constatado que o principal fator que controla a consistência da argamassa é a teor de água adicionado e, infelizmente, a mensuração da quantidade de água é dificultada pela falta de critérios na medição, observados na obra.

Com o intuito de conseguir um parâmetro correlato com a consistência, para a reprodução posterior em laboratório, foi realizado o ensaio do Vane Test, com o objetivo caracterizar a tensão de escoamento da argamassa utilizada na obra. Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (5x10cm) para avaliação da resistência à compressão axial. A Tabela 3.8 apresenta a média dos resultados encontrados em campo.

Infelizmente não há um controle no processo produtivo de argamassa para estaca raiz, sendo usual ocorrer alteração dos fornecedores dos materiais (cimento ou areia), de acordo com a disponibilidade e especulação do mercado.

Na obra monitorada houve modificação do traço utilizado, fornecedor e tipo do cimento. Para uma melhor compreensão, as visitas foram agrupadas em duas fases, sendo que na primeira utilizava-se o cimento Nassau CP II-F-32, e na segunda o cimento Tocantins CP II-Z-32 RS.

Foram coletadas amostras das areias para caracterização da umidade. Na produção da argamassa a areia e a água foram medidas em latas, sendo importante destacar causa

imprecisão na aferição dos volumes. No processo de bombeamento ocorreu em alguns casos a obstrução do mangote devido à segregação da areia, possivelmente provocada pelo alto teor de água na argamassa e elevada exsudação. Os traços utilizados estão apresentados na Tabela 3.8.

As amostras foram coletadas logo após a mistura e antes do bombeamento, sendo realizado o ensaio do Vane Test e logo em seguida moldados, em média, três corpos-de-prova cilíndricos (5x10cm) para cada traço produzido. Os corpos-de-prova foram rompidos após 28 dias.

Tabela 3.8 – Traços encontrados na obra e resultados da tensão de escoamento.

Fase	Dia	Estaca	Traço em massa (kg)			A%	τ_e (kPa)	τ_e Média (kPa)
1ª	19/6/07	P03-ER 02	1	1,207	0,54	0,20	0,309	0,313
	21/6/07	P03-ER 03					0,317	
2ª	01/8/07	P121-ER 02	1	1,229	0,45	0,24	0,201	0,217
	01/8/07	P121-ER 08					0,230	
	02/8/07	P121-ER 07					0,225	
	03/8/07	P121-ER 05					0,212	

Com base nos resultados encontrados em canteiros de obra, foi identificado alguns parâmetros da argamassa no estado fresco, necessários para a elaboração do planejamento experimental desta pesquisa, conforme a Figura 3.14.

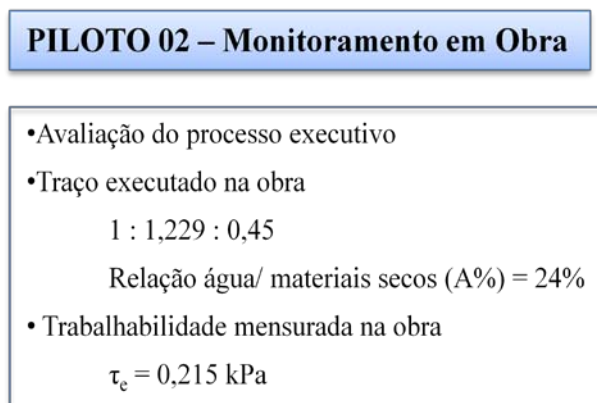


Figura 3.14 – Fluxograma do Piloto 02.

3.3 PROJETO EXPERIMENTAL I E II - CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

As etapas de desenvolvimento do programa experimental estão descritas na Figura 3.15, e serão desenvolvidas nos próximos itens:

Após uma análise preliminar dos resultados obtidos no Estudo Piloto 02, foi desenvolvido um programa experimental para avaliar as propriedades de diferentes argamassas produzidas em laboratório, onde se pretendia, a partir de variações na composição dos materiais, dosar argamassas com propriedades que as classificassem como trabalháveis e não trabalháveis.

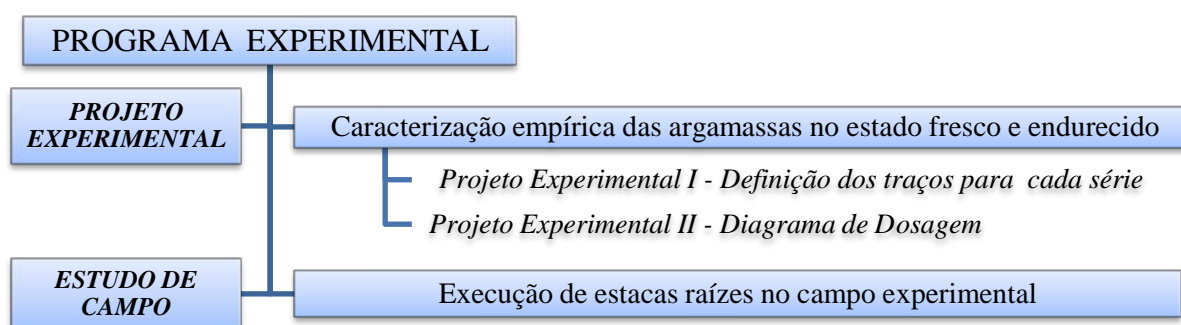


Figura 3.15 - Etapas de desenvolvimento da pesquisa

3.3.1 PROJETO EXPERIMENTAL I - DEFINIÇÃO DO TRAÇO PARA CADA COMPOSIÇÃO DE AREIA UTILIZADA

Nesta etapa buscou-se avaliar o comportamento das argamassas através da caracterização dos parâmetros que influenciam a trabalhabilidade, consistência, exsudação e segregação.

Neste estudo foram utilizadas três composições de agregados definidas anteriormente na caracterização dos materiais (AF1, AG1 e AGF1). Partindo do traço definido no Piloto 02 (obtido na obra monitorada) foi realizado um estudo de dosagem através de vários traços para cada composições de agregados, onde se variou a relação água/ materiais secos (A%) de 16% a 29% e a relação água/ cimento (a/c) de 0,35 até 0,65. O objetivo foi encontrar qual seria o A% que corresponderia a tensão de escoamento encontrada na obra ($\tau_e = 0,215$ kPa).

O objetivo principal foi avaliar como os diferentes tipos de composições, consumos de cimento, teores de água, iriam influenciar os resultados fornecidos pelos diferentes métodos de ensaios (anteriormente mencionados). Nesse caso, foram consideradas as variáveis dependentes e independentes, conforme Figura 3.16.

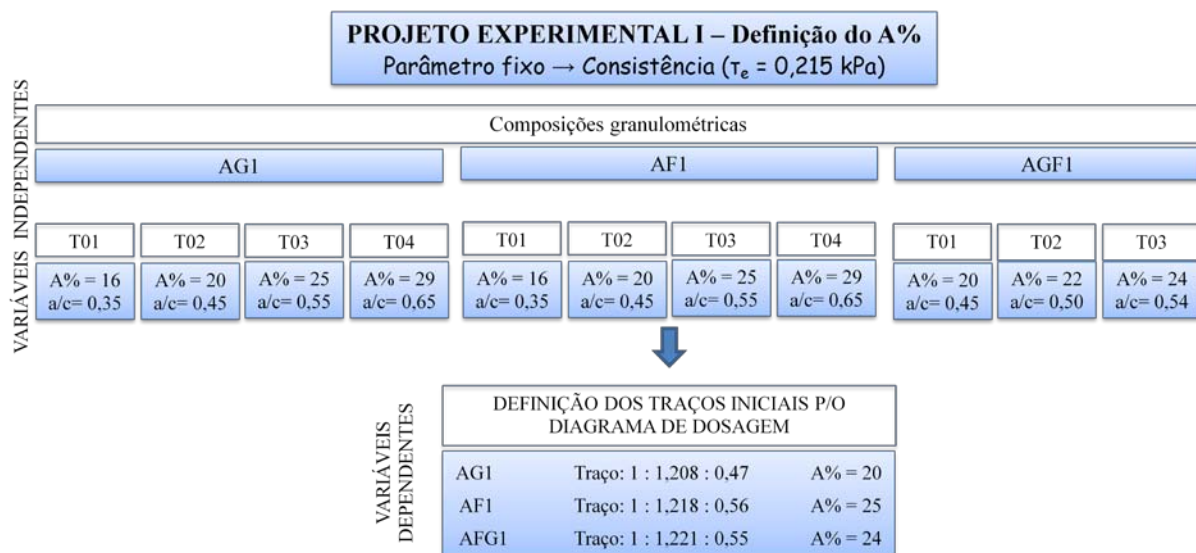


Figura 3.16 – Fluxograma descrevendo as variáveis do Programa Experimental I.

Os traços analisados estão descritos na Tabela 3.9, onde estão destacados aqueles que serão utilizados como referência na próxima etapa, pois obtiveram a tensão de escoamento desejada.

Tabela 3.9 – Dosagem realizada no Projeto Experimental I.

Tipo Areia	Traço	A% (%)	Traço unitário em massa (kg)			τ_e (kPa)
			Cimento	Areia	Água	
AG1	G_T01	16	1	1,229	0,35	-
	G_T02	20	1	1,229	0,45	0,215
	G_T03	25	1	1,229	0,55	0,115
	G_T04	29	1	1,229	0,65	-
AF1	F_T01	16	1	1,229	0,35	-
	F_T02	20	1	1,229	0,45	-
	F_T03	25	1	1,229	0,55	0,215
	F_T04	29	1	1,229	0,65	0,115
AGF1	GF_T01	20	1	1,229	0,45	-
	GF_T02	22	1	1,229	0,50	-
	GF_T03	24	1	1,229	0,54	0,215

As areias foram armazenadas na área externa do laboratório, exposta às alterações atmosféricas, a fim de simular as condições de armazenamento em obra. No cálculo do traço foi corrigida a quantidade de água em relação à umidade contida na areia.

3.3.2 PROJETO EXPERIMENTAL II – DIAGRAMA DE DOSAGEM

Partindo do traço definido no Projeto Experimental I, foi realizado um estudo de dosagem baseado no método do IPT/ EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992).

Neste método tem-se a confecção de um diagrama de dosagem que é constituído por quatro eixos representados pela resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade (f_{c28}), relação água/ aglomerante (a/c), traço unitário (m) e consumo de cimento (Cc). Este diagrama é obtido através da determinação experimental de pelo menos três traços para cada composição de agregado, sendo eles: um traço intermediário, um traço rico em cimento e um traço pobre em cimento, que representarão três pontos da curva de dosagem (apresentados na Tabela 4.1).

Mantendo a mesma consistência ($\tau_e = 0,215$ kPa), ou seja, o valor do A% constante para cada série, determinou-se a relação água/ cimento para os traços auxiliares. Os teores de argamassas encontrados experimentalmente para cada série estão apresentados na Tabela 4.1, com as correspondentes relações água/ cimento. Para a composição AG1 fixou-se o A% = 21%, a qual correspondia à $\tau_e = 0,215$ kPa, variando-se a a/ c de 0,4 a 0,6. Na série AF1 considerou o A% = 25%, equivalente à $\tau_e = 0,215$ kPa, variando-se a a/ c de 0,45 até 0,65. Por fim, na série AGF1 manteve o valor do A% = 25%, correspondente à $\tau_e = 0,215$ kPa, e o intervalo de variação da a/ c foi de 0,45 a 0,60.

Para os traços dosados foram moldados corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, de acordo com as normas NBR 13279/ 1995 e NBR 13279/ 2005, respectivamente. Após 28 dias foram rompidos e determinada a resistência à compressão (f_{c28}), para a elaboração do diagrama de dosagem. Os parâmetros correspondentes aos objetivos das dosagens foram resistência à compressão e a consistência, dada pela tensão de escoamento (kPa).

No diagrama de dosagem manteve a mesma consistência das argamassas preparadas na obra, fixando-se a tensão de escoamento em 0,215 kPa, medido através do ensaio do Vane Test (ASTM D4648).

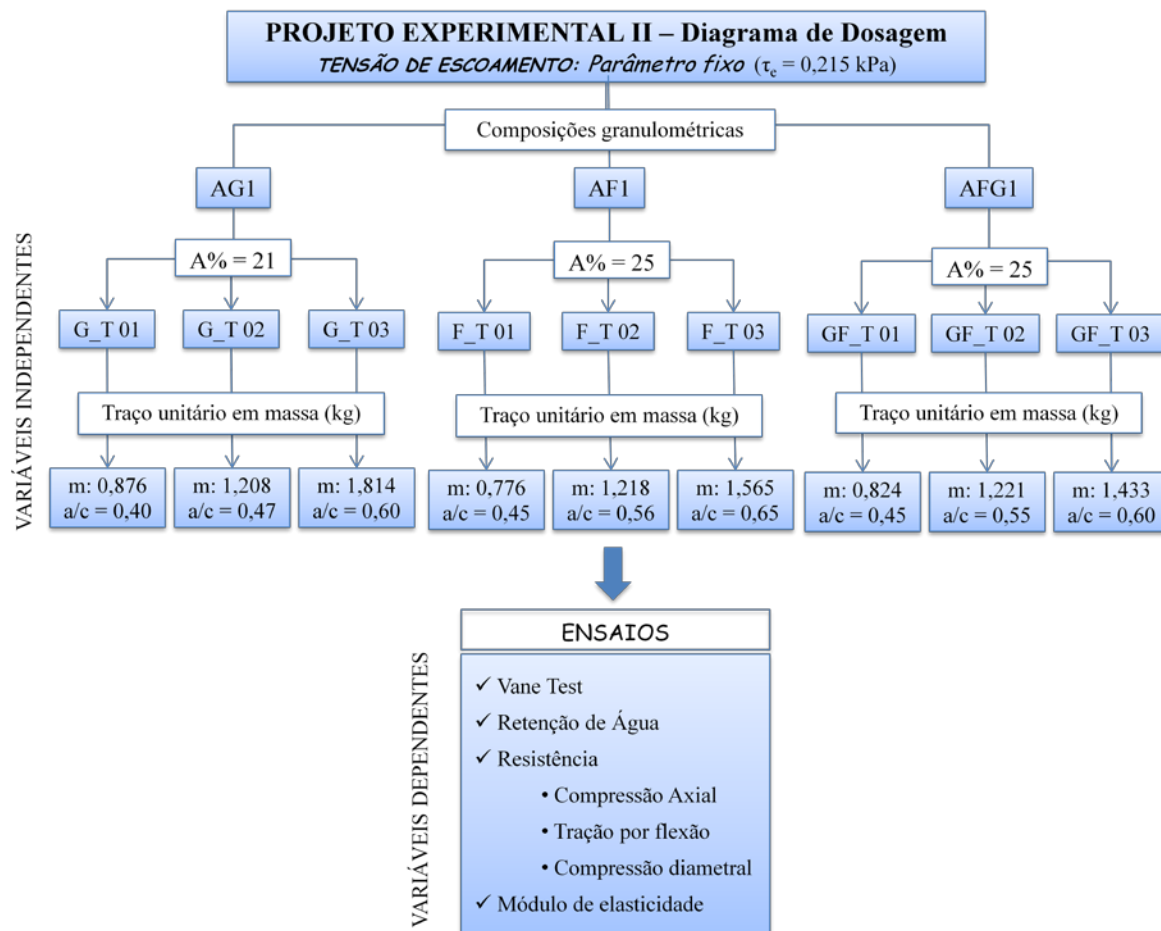


Figura 3.17 – Fluxograma descrevendo as variáveis do Programa Experimental II.

3.4 ESTUDO DE CAMPO – EXECUÇÃO E EXUMAÇÃO DE ESTACA RAIZ

Através das tendências apresentadas pelas curvas do diagrama de dosagem, foram definidos os traços que foram utilizados na execução de seis estacas raiz no campo experimental do Laboratório de Geotecnia, UnB.

Primeiramente foi escolhido, dentro do intervalo pesquisado, o traço que fosse mais indicado para a execução das estacas, possuindo as propriedades necessárias ao processo executivo, como por exemplo, fluidez, coesão, baixa exsudação e baixa segregação. Para a definição dos traços, foram utilizados dois critérios prescritos pela NBR 6122/ 1996:

- A norma especifica que o consumo mínimo de cimento seja de 600 kg/m³. Sendo assim, o critério para seleção dos traços a serem utilizados para cada composição de agregado (AG1, AF1 e AGF1) foram os que possuíam o valor do consumo de cimento mais próximo aos 600 kg/ m³. As argamassas assim obtidas foram denominadas: AG1-C600, AF1-C600, AGF1-C600;
- Outra prescrição da norma é que o f_{ck} seja compatível com as técnicas executivas e de controle e não ultrapasse a 20 MPa. O valor da resistência à compressão axial estimada (f_{c28}) para as argamassas dosadas foi especificada como sendo de 30 MPa (condição B, $S_d = 5,5$ MPa, extraído da Tabela 2.7, item 2.5.1). As argamassas assim obtidas foram denominadas: AG1_F30, AF1_F30, AGF1_F30;
- A trabalhabilidade sugerida nesta dosagem, mensurada através tensão de escoamento, foi aproximadamente de 0,215 kPa para todas as composições;

Em alguns casos, o intervalo pesquisado não contemplou os valores de consumo de cimento igual a 600 kg/ m³ e f_{c28} igual a 30 MPa sugeridos pela norma. Optou-se então por fazer a extrapolação das curvas, mesmo sabendo que segundo uma análise estatística, a extrapolação não é recomendada fora do intervalo pesquisado, devendo-se nesses casos, ter muito critério para analisar os resultados extrapolados.

Através das tendências das curvas obtidas no diagrama de dosagem, Figura 4.14, definiram-se os traços que foram utilizados na execução das estacas raiz. A Tabela 3.10 mostra os traços sugeridos considerando-se o consumo de cimento igual a 600 kg/ m³.

Tabela 3.10 – Traços sugeridos para a execução das estacas raiz, considerando o $C_c = 600$ kg/ m³.

Traço	Traço unit. em massa (kg)			A%	Cc (kg/ m ³)	F _{c28} (MPa) previsto
	Cimento	Areia	a/ c			
AG1 - C600	1	1,956	0,602	20	598	20
AF1 - C600	1	1,566	0,752	29	600	22
AGF1 - C600	1	1,876	0,633	22	599	26

A Tabela 3.11 descreve os traços estimados segundo a $f_{c28} = 30$ MPa. Foram executadas duas estacas para cada tipo de composição de agregado, sendo uma com o consumo de cimento próximo a 600 kg/ m³ e a outra com a resistência à compressão estimada de 30 MPa.

Tabela 3.11 - Traços sugeridos para a execução das estacas raiz, considerando o $f_{c28} = 30$ MPa.

Traço	Traço unit. em massa (kg)			A %	F_{c28} (MPa)	Cc (kg/ m ³) previsto
	Cimento	Areia	a/ c			
AG1- F30	1	1,463	0,541	22	30	703
AF1- F30	1	1,159	0,661	31	30	703
AGF1- F30	1	1,604	0,594	23	30	655

Para que fosse possível a execução das estacas no campo experimental, algumas empresas do comércio local de Brasília forneceram os materiais (areia, cimento, aço) necessários, equipamentos utilizados (argamassadeira, reservatório de água, caminhão munck) e inclusive a disponibilizaram da mão-de-obra utilizada na execução das estacas raiz, composta por uma equipe especializada neste tipo de fundação.

Na realização da mistura verificaram-se alguns desvios na consistência prevista através do diagrama de dosagem, encontrado no Projeto Experimental II. Foram realizadas algumas correções na quantidade de água estimada através da experiência dos dosadores e verificação da tensão de escoamento no ensaio do Vane Test, mas devido à seqüência do processo executivo, os valores buscados para a tensão de escoamento, próxima a 0,215 kPa, não foram alcançados com êxito. A Tabela 3.12 mostra os traços realizados:

Tabela 3.12 – Traços dosados na execução das estacas raiz.

Traço	Traço unitário em massa (kg)			A %	Cc (kg/ m ³)
	Cimento	Areia	a/ c		
AG1- C600	1	1,97	0,59	20	600
AF1- C600	1	1,61	0,60	23	653
AGF1-C600	1	1,90	0,58	20	615
AG1- F30	1	1,46	0,53	22	708
AF1- F30	1	1,19	0,54	25	761
AGF1- F30	1	1,63	0,52	20	685

Depois de 28 dias as estacas foram exumadas, sendo realizada uma avaliação visual a fim de analisar a qualidade final das mesmas, além de analisar a integridade da peça, ocorrência de segregação, brocas, etc.

Devido à indisponibilidade do número necessário de fôrmas para a moldagem dos c.p.s para os seis traços executados, foram utilizados três tipos de corpos-de-prova:

- Cinco corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 5 x 10 cm, utilizados para a execução do módulo de elasticidade, sendo moldados para as séries AF1 e AGF1;
- Oito corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, sendo seis c.p.s para a realização do ensaio de compressão axial, os outros dois c.p.s foram cortados em prismas de 4 x 4 x 20 cm, para a determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Foram moldados para as três séries pesquisadas (AG1, AF1 e AGF1);
- Três corpos-de-prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm, para a determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, moldados para as séries AF1 e AGF1.

A Figura C. 1 e Figura C. 2, no Anexo C, mostram as etapas do processo realizado para a obtenção dos cps prismáticos (4x4x16) a partir de corpos-de-prova cilíndricos (10x20).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada uma compilação dos resultados obtidos no Programa Experimental proposto para esta dissertação, bem como as discussões e considerações referentes.

Para uma melhor compreensão e visualização dos resultados, a fim de evitar tabelas muito grandes, os resultados foram separados em três tipos de composições: AG1 – composta pela areia grossa, AF1 – composta pela areia fina e a AGF1 – composta pela mistura das duas composições anteriores.

Os resultados dos ensaios foram apresentados na forma de planilhas, mostrando os valores médios. Para a análise dos resultados, foram utilizados parâmetros estatísticos de forma tal que a análise fosse comparativa.

Nos anexos apresentam-se as tabelas contendo todos os valores obtidos nos ensaios. No Anexo A (Tabela A.1 até a Tabela A4 e Figura A.1 até Figura A.3) tem-se a caracterização dos materiais utilizados em cada uma das etapas, o Anexo B (Tabela B.1 até a Tabela B6) mostra os resultados dos ensaios realizados no Projeto Experimental I e II, e o Anexo C (Tabela C.1 até a Tabela C7) apresenta os valores obtidos no Estudo de Campo.

4.1 *PROJETO EXPERIMENTAL I – DEFINIÇÃO DO TRAÇO PARA CADA COMPOSIÇÃO*

O traço realizado na obra monitorada foi 1: 1,229: 0,45, tendo $A\% = 20,2\%$ e $\tau_e = 0, 215$ kPa. Partindo deste traço foram realizadas algumas dosagens, variando-se a relação a/c e o teor de A%, tendo o objetivo de encontrar para cada tipo de areia (AF1, AG1 e AGF1), o traço correspondente ao dosado na obra, ou seja, que possua a $\tau_e = 0, 215$ kPa. Para isso foram necessários alguns ajustes na quantidade de água.

As areias utilizadas nas dosagens foram armazenadas em um local externo ao prédio, sob alterações atmosféricas, para simular as condições de armazenamento em obra. No cálculo da quantidade de água a ser adicionada no traço foi descontada a umidade da areia.

Os resultados encontrados foram descritos anteriormente, na Tabela 3.9, e estão resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Traços adotados para cada tipo de agregado a partir da Tabela 3.9.

Tipo de areia	Traço unitário em massa			A% (%)	τ_e (kPa)
	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)		
AG1	1	1,229	0,35	20	0,215
AF1	1	1,229	0,55	25	
AGF1	1	1,229	0,54	24	

4.2 PROJETO EXPERIMENTAL II – DIGRAMA DE DOSAGEM

Nesta etapa foi realizado um estudo de dosagem para cada tipo de areia, variando-se o consumo de cimento, relação água/ cimento e mantendo a percentagem água/ materiais secos (A%) encontrada no Projeto Experimental I. Para isso foram necessários alguns ajustes na quantidade de água prevista.

Conforme citado no item 2.3.2.1, a percentagem água/ materiais secos é um parâmetro utilizado para analisar a trabalhabilidade em argamassas, sendo assim, pode-se dizer que, mantendo-se o mesmo valor do A% encontrado na obra teremos uma consistência semelhante à mensurada na obra.

4.2.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

4.2.1.1 Comportamento dos Parâmetros de Mistura

Para a confecção do Diagrama de Dosagem foi realizado um estudo de dosagem onde foram calculados novos traços mantendo-se fixo o valor do A% encontrado no Estudo Experimental I, variando-se a relação a/c e obtendo-se o m de acordo com a lei de Lyse, o qual corresponde nesta pesquisa à quantidade de areia. Os traços obtidos podem ser observados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Traços dosados no Projeto Experimental II.

Tipo Areia	Traço unitário em massa (kg)				
	Traço	A%	cimento	areia	água
AG1	G_T 01	21	1	0,876	0,40
	G_T 02		1	1,208	0,47
	G_T 03		1	1,814	0,60
AF1	F_T 01	25	1	0,776	0,45
	F_T 02		1	1,218	0,56
	F_T 03		1	1,565	0,65
AGF1	GF_T 01	25	1	0,824	0,45
	GF_T 02		1	1,221	0,55
	GF_T 03		1	1,433	0,60

Logo após a homogeneização das argamassas foi realizado o ensaio do Vane Test para avaliação da consistência. Foram observadas algumas variações na tensão de escoamento prevista ($\tau_e = 0,215$ kPa), sendo necessário realizar correções na quantidade de água a fim de encontrar a consistência desejada. Na Tabela 4.3 são mostrados os traços finais dosados para a elaboração do diagrama de dosagem e os resultados do ensaio do Vane Test para cada série analisada.

Tabela 4.3 – Traços realizados para a concepção do Diagrama de Dosagem.

Tipo Areia	Traço unitário em massa (kg)				A% (%)	Cc (kg/ cm ²)	τ_e (kPa)
	Traço	Cimento	Areia	Água			
AG1	G_T 01	1	0,876	0,48	25	882	0,206
	G_T 02	1	1,208	0,50	23	779	0,211
	G_T 03	1	1,814	0,59	21	624	0,201
AF1	F_T 01	1	0,776	0,57	32	840	0,225
	F_T 02	1	1,218	0,68	31	685	0,196
	F_T 03	1	1,565	0,75	29	601	0,215
AGF1	GF_T 01	1	0,824	0,48	26	894	0,220
	GF_T 02	1	1,221	0,54	24	753	0,201
	GF_T 03	1	1,433	0,57	23	696	0,215

Nos resultados obtidos, pode-se observar uma faixa para a tensão de escoamento que varia de 0,196 kPa até 0,225 kPa. Os resultados encontrados estão próximos da tensão de escoamento requerida ($\tau_e = 0,215$ kPa), sendo portanto, considerados como um valor constante, como pode ser analisado no Figura 4.1.

Devido ao ajuste na quantidade de água da mistura, que pode ser observado comparando-se os valores obtidos na Tabela 4.2 para a Tabela 4.3, ocorreu uma pequena variação nos valores previstos das relações água/ materiais secos (A%). Para a série AG1 o intervalo varia de 21% até 25%, para a série AF1 de 29% até 32% e para a última série, AGF1, o intervalo varia entre 23% e 26%. Pode-se observar ainda que a série AF1 possui a maior relação água/ materiais secos, seguida pela série AGF1 e a série AG1.

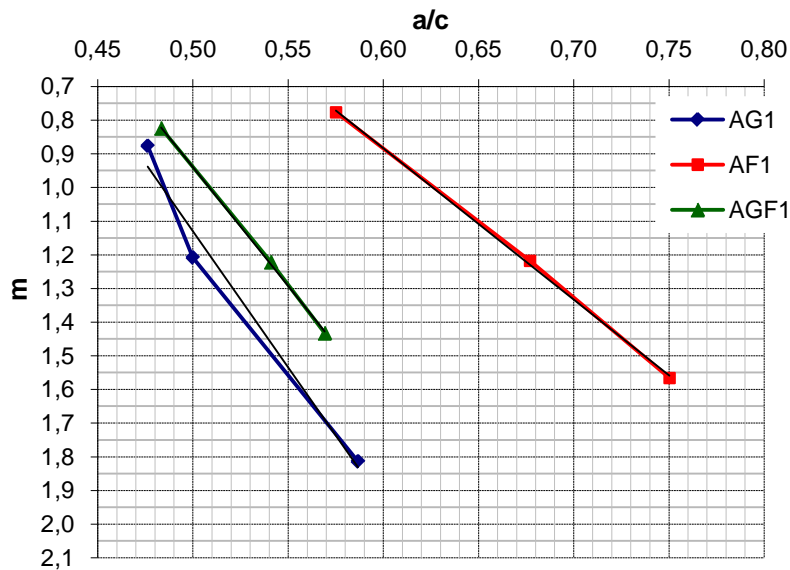


Figura 4.1 – Representação gráfica da quantidade de agregado x a/c obtida no Projeto Experimental II.

Observando-se o gráfico apresentado na Figura 4.1 pode-se verificar que a consistência foi constante no diagrama de dosagem obtido.

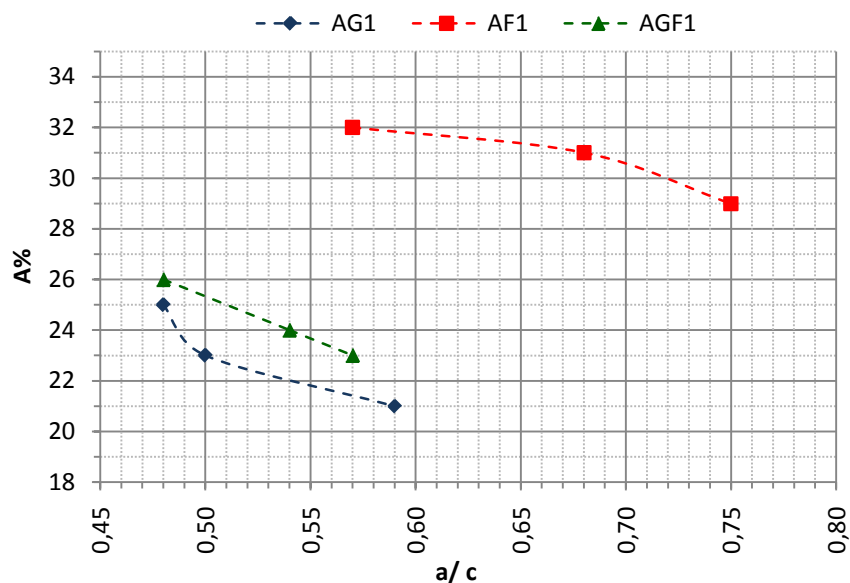


Figura 4.2 – Representação gráfica do A% x a/c, obtidos no Projeto Experimental II.

Na Figura 4.2 pode-se observar que a distribuição granulométrica dos agregados exerce um papel decisivo na definição da demanda de água das argamassas e do A%. É importante observar que a argamassa dosada com o agregado AGF1 exige uma quantidade de água próxima àquela dosada com o agregado AG1, ou seja, os finos adicionados contribuíram para uma melhoria na trabalhabilidade sem requerer um aumento da quantidade de água na mistura.

No anexo B estão alguns gráficos (Figura B.1 até Figura B.3) que mostram a proporção dos materiais para cada série analisada, podendo-se verificar que a quantidade de água é praticamente constante para uma dada trabalhabilidade (considerando os mesmos materiais), independente do traço empregado, conforme o comportamento descrito no Capítulo 2, definido pela Lei de Lyse, onde a trabalhabilidade foi mensurada através do ensaio do Vane Test.

Para analisar a proporção de pasta no volume total da argamassa foram calculados os volumes para cada um dos componentes e o índice de pasta (VPA), que é a razão entre o volume de pasta e o volume de vazios da areia. Observe os resultados obtidos na Tabela 4.4 e Figura 4.3.

Tabela 4.4 – Proporção dos componentes no volume total da argamassa no estado fresco.

Areia	Traço	Cc (kg/ m ³)	Volume (dm ³)				Índice de pasta (VPA)
			Argamassa	Pasta	Areia	Vazios da areia	
AG1	G_T 01	882	1,14	0,81	0,53	0,19	4,19
	G_T 02	779	1,29	0,83	0,73	0,27	3,13
	G_T 03	624	1,61	0,92	1,09	0,40	2,30
AF1	F_T 01	840	1,20	0,91	0,55	0,26	3,50
	F_T 02	685	1,47	1,01	0,87	0,41	2,48
	F_T 03	601	1,67	1,08	1,11	0,52	2,07
AGF1	GF_T 01	894	1,13	0,82	0,47	0,16	5,05
	GF_T 02	753	1,34	0,87	0,70	0,24	3,65
	GF_T 03	696	1,45	0,90	0,83	0,28	3,21

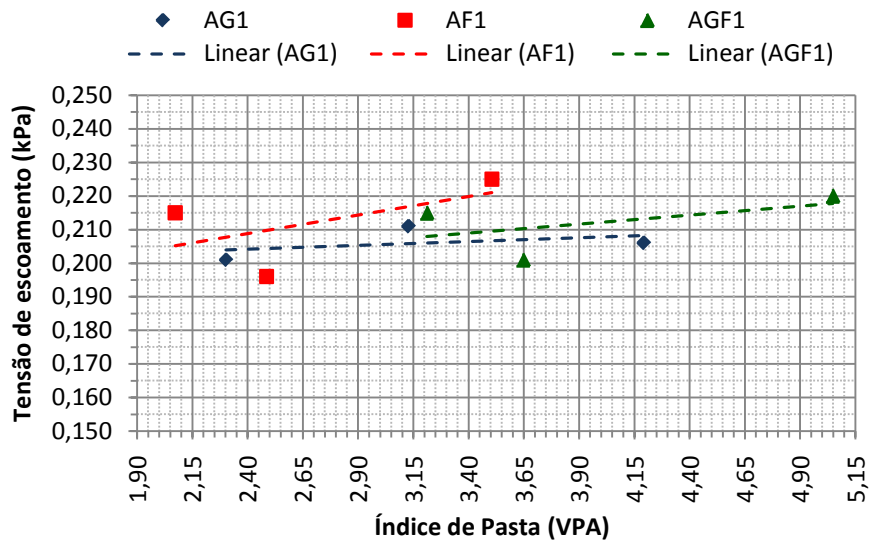


Figura 4.3 - Representação da variação do Índice de Pasta mantendo-se a consistência constante.

Na Figura 4.3 pode-se observar que para uma mesma consistência, o índice de pasta das argamassas varia dependendo da série utilizada. Nota-se que a série que demandou os maiores índices de pasta foi a AGF1, variando de 3,21 a 5,05, sendo importante ressaltar que esta série apresentou os menores índices de vazios, conforme pode ser observado na Figura 4.4. Sabe-se que a quantidade de matriz exerce importante papel no controle da fluidez das argamassas e pode-se observar que a água foi o meio direto utilizado na alteração da trabalhabilidade das argamassas.

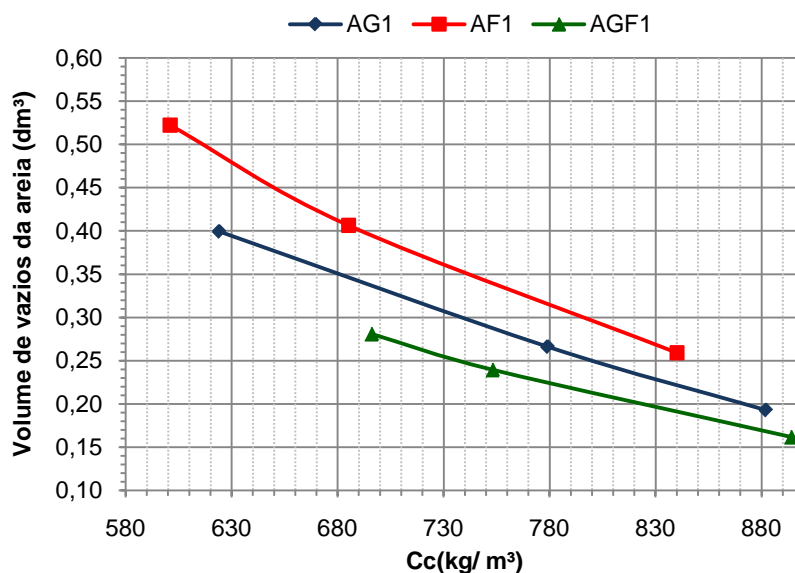


Figura 4.4 - Representação do volume de vazios da areia x consumo de cimento.

A Figura 4.4 mostra que quanto maior a uniformidade da areia utilizada (AF1), maior o volume de vazios existente entre os grãos. Sendo assim a areia que apresentou o maior índice de vazios foi a AF1, e na composição AGF1 verificou-se a menor proporção de vazios, devido a um melhoramento na distribuição granulométrica da areia grossa (AG1).

A Figura 4.5 mostra a influência do consumo de cimento na tensão de escoamento (τ_e). Para as séries, os comportamentos identificados são similares. Pode-se observar que os valores da tensão de escoamento tendem a aumentar à medida que eleva o teor de aglomerante.

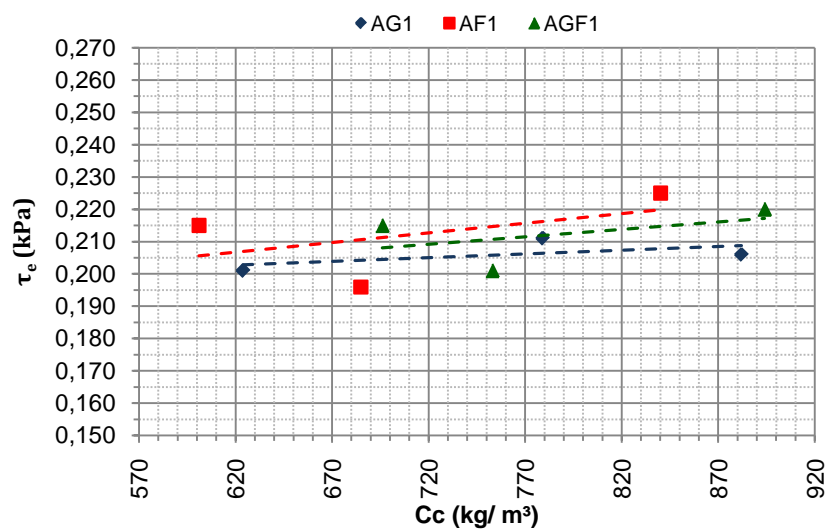


Figura 4.5 – Representação da tensão de escoamento x consumo de cimento.

Foram executados três traços para cada tipo de areia, sendo moldados corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, de acordo com as normas NBR 13279/ 1995 e NBR 13279/ 2005, respectivamente. Após 28 dias, os corpos-de-prova foram rompidos para a determinação da resistência e elaboração do diagrama de dosagem.

4.2.1.2 Exsudação

O ensaio de perda de água por sucção foi utilizado para se avaliar, indiretamente, a tendência de exsudação da água contida na argamassa. Foi avaliada a perda de água decorrido o período de um e quinze minutos de sucção, sob as condições já especificadas no procedimento de ensaio. Esse resultado foi tratado, especificamente, na Figura 4.6 para cada série analisada.

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de Retenção de água para as argamassas.

Traço	Tempo (min)	Ra (%)
G_T01	1	91,02
	15	77,69
G_T02	1	88,79
	15	75,01
G_T03	1	89,55
	15	73,18
F_T01	1	90,12
	15	79,13
F_T02	1	87,99
	15	77,24
F_T03	1	86,93
	15	76,84
GF_T01	1	91,96
	15	79,02
GF_T02	1	90,03
	15	76,31
GF_T03	1	91,63
	15	77,76

Os resultados individuais de perda de água, para cada série de argamassa, estão apresentados na Tabela B1 (Anexo B).

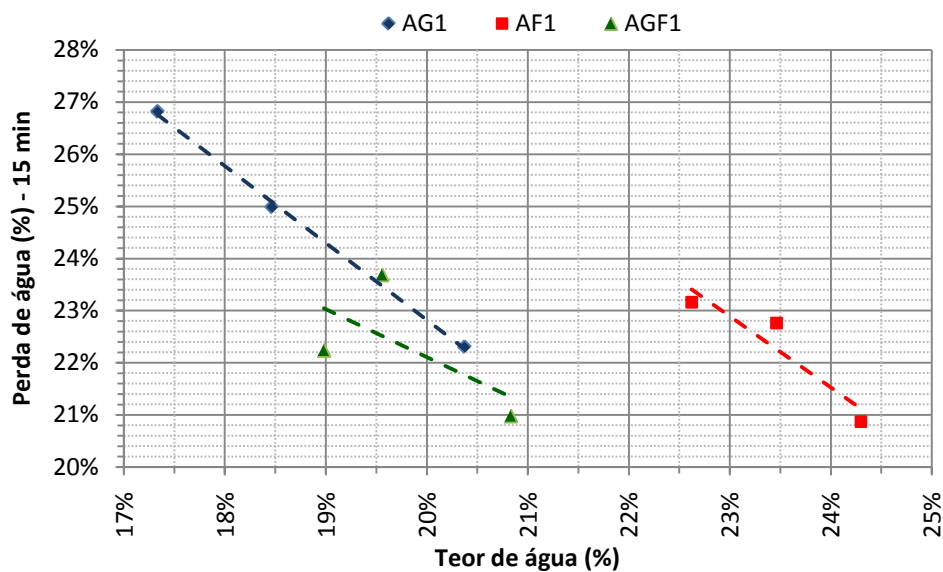


Figura 4.6 – Perda de água após 15 minutos de sucção em relação ao teor de água contido nos traços.

Na Figura 4.6 verifica-se que a maior perda de água ocorreu na série AG1, justamente a série que possui os menores teores de água, porém apresenta os grãos mais grossos, ou seja, menor área específica e maior quantidade de água livre no sistema, sendo assim têm-se menor estabilidade da mistura. Já a série AGF1 apresentou os resultados próximos aos valores encontrados para a série AF1, porém com o teor de água muito inferior devido a melhor distribuição granulométrica. Em resumo pode-se concluir que a composição AGF1 apresentou melhoras significativas em relação à capacidade de reter a água contida na mistura.

Como pode ser observado, as propriedades das argamassas para a injeção em estacas raiz variam de acordo com os componentes e a proporção dos materiais, sendo portanto, de responsabilidade do técnico a escolha dos materiais e a dosagem mais adequada em função do processo produtivo.

4.2.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.2.1 Análise do Método do Ensaio de Resistência

4.2.2.1.1 Resistência à Compressão Axial (f_c)

Para a determinação da resistência à compressão axial das argamassas foram moldados corpos-de-prova (c.p.s) prismáticos segundo a NBR 13279/ 2005 e corpos-de-prova cilíndricos segundo a NBR 13279/ 1995, visando realizar uma análise comparativa dos resultados.

Os corpos-de-prova prismáticos têm dimensões de 4 cm de altura, 4 cm de largura e 16 cm de comprimento, e os corpos-de-prova cilíndricos possuem de diâmetro igual a 5 cm e altura de 10 cm.

Os corpos-de-prova foram moldados e rompidos aos 28 dias. As Tabelas a seguir apresentam as médias dos valores de f_{c28} , bem como o desvio-padrão (S_d) e o coeficiente de variação (CV) para a análise dos resultados.

Tabela 4.6 – Resultados da resistência à compressão axial aos 28 dias.

Corpos-de-prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm)				
Série	Traço	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_T01	45,5	1,1	2,6%
	G_T02	39,2	0,4	1,1%
	G_T03	34,8	0,7	2,0%
AF1	F_T01	39,2	1,6	4,0%
	F_T02	29,0	1,1	3,9%
	F_T03	22,3	2,5	11,2%
AGF1	GF_T01	43,6	1,1	2,5%
	GF_T02	35,9	1,4	4,1%
	GF_T03	35,5	1,3	3,7%

De acordo com a Tabela 4.6, para os corpos-de-prova prismáticos, as maiores resistências à compressão foram obtidas para as séries AG1 e AGF1, devido às dimensões das partículas, melhor continuidade das curvas granulométricas e menores relações a/c, se comparada com a série AF1. Com relação aos valores de desvio padrão é observado que as médias em relação aos valores de f_{c28} não apresentam diferenças significativas. Já com relação ao coeficiente de variação verifica-se que, apenas para o traço F_T03, obteve-se resultado ligeiramente alto, pois a tolerância aceitável pelos estatísticos é até uma variação de 5 %.

Tabela 4.7 – Resultados da resistência à compressão axial aos 28 dias.

Corpos-de-prova cilíndricos (5 x 10 cm)				
Série	Traço	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_T01	23,0	2,9	12,5%
	G_T02	25,1	1,9	7,4%
	G_T03	22,3	1,3	5,8%
AF1	F_T01	39,0	2,7	7,0%
	F_T02	25,5	2,3	9,1%
	F_T03	22,8	2,0	8,8%
AGF1	GF_T01	39,8	2,6	6,6%
	GF_T02	35,9	1,5	4,2%
	GF_T03	35,0	1,2	3,4%

Observando-se a Tabela 4.7, para corpos-de-prova cilíndricos, observa-se que os valores obtidos para as séries AF1 e AGF1 foram próximos valores apresentados pelos corpos-de-prova prismáticos. Os resultados observados para os corpos-de-prova cilíndricos na série AG1 apresentaram valores significativamente menores do que os resultados encontrados para a mesma série considerando corpos-de-prova prismáticos. Acredita-se que houve influência de algum comportamento anormal, possivelmente ocasionado por fatores externos, como por exemplo, o capeamento, o rompimento, entre outros. Pode-se verificar que as variações apresentadas pelo desvio-padrão e o coeficiente de variação nos corpos-de-prova cilíndricos foram maiores do que nos corpos-de-prova prismáticos, provavelmente ocasionados pelo capeamento dos cps.

Para a elaboração do diagrama de dosagem foram considerados os resultados dos corpos-de-prova prismáticos, pois apresentaram as menores variações de desvio-padrão e coeficiente de variação, sendo também o corpo-de-prova especificado pela norma em vigor.

4.2.2.1.2 Resistência à Tração

A NBR 6118/ 2007 estabelece que a resistência à tração indireta e a resistência à tração na flexão para concretos devem ser obtidas em ensaios realizados segundo a NBR 7222/ 1994 e a NBR 12142/ 1994, respectivamente.

A resistência à tração direta (f_{ct}) pode ser obtida através da resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$) e a resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$), segundo as equações abaixo.

$$f_{ct} = 0,9 \times f_{ct,sp} \quad \text{Equação 4-1}$$

$$f_{ct} = 0,7 \times f_{ct,f} \quad \text{Equação 4-2}$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ - resistência à tração indireta (MPa);

$f_{ct,f}$ - resistência à tração na flexão (MPa);

f_{ct} - resistência à tração direta (MPa);

Na falta de ensaios para obtenção de $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$ pode ser avaliado o seu valor médio ou característico por meio das equações a seguir. No caso da argamassa para estaca raiz, temos o f_{ck} igual a 20 MPa, resultando num valor médio de resistência à tração direta ($f_{ct,m}$) de 2,21 MPa.

$$f_{ct,m} = 0,3 \times (f_{ck})^{2/3} \quad \text{Equação 4-3}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \times f_{ct,m} \quad \text{Equação 4-4}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \times f_{ct,m} \quad \text{Equação 4-5}$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ - resistência à tração indireta (MPa);

$f_{ct,f}$ - resistência à tração na flexão (MPa);

f_{ct} - resistência à tração direta (MPa);

$f_{ct,m}$ - valor médio ou característico da resistência à tração direta (MPa);

f_{ck} - resistência característica do concreto (MPa);

$f_{ctk,inf}$ - valor característico inferior da resistência à tração direta (MPa);

$f_{ctk,sup}$ - valor característico superior da resistência à tração direta (MPa);

Tabela 4.8 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$).

Série	Traço	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_T 01	4,6	0,14	2,9%
	G_T 02	4,1	0,04	1,0%
	G_T 03	4,7	0,05	1,1%
AF1	F_T 01	4,5	0,69	15,3%
	F_T 02	3,7	0,11	3,0%
	F_T 03	3,2	0,15	4,5%
AGF1	GF_T 01	4,9	0,07	1,3%
	GF_T 02	4,0	0,29	7,3%
	GF_T 03	4,1	0,06	1,4%

Foi realizado o ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) das argamassas segundo a NBR 7222/ 1994. Utilizou-se dois corpos-de-prova cilíndricos (5x10 cm), rompidos aos 28 dias e moldados juntamente com os outros cps empregados nos outros ensaios. A Tabela 4.8 apresenta as médias dos valores de $f_{ct,sp}$, bem como o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

A determinação da resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) das argamassas foi realizada através do rompimento à flexão ou tração indireta de três cps prismáticos (4 x 4 x 16 cm) na idade de 28 dias, segundo especificações da NBR 13279/ 2005. A Tabela 4.9 apresenta os valores de $f_{ct,f}$, bem como as médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 4.9 – Resultados de resistência à tração na flexão.

Série	Traço	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_T 01	4,3	0,2	5,5%
	G_T 02	4,5	0,4	8,6%
	G_T 03	3,6	0,1	2,1%
AF1	F_T 01	4,1	0,2	4,2%
	F_T 02	3,8	0,3	7,1%
	F_T 03	3,7	0,2	6,3%
AGF1	GF_T 01	4,5	0,0	1,1%
	GF_T 02	4,5	0,1	1,4%
	GF_T 03	4,9	0,5	9,3%

Com relação aos valores de desvio padrão observa-se que as médias obtidas na resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$) tiveram menores variabilidades em relação aos valores de tração na flexão ($f_{ct,f}$) apresentam alguns valores acima da variação permitida estatisticamente.

4.2.2.2 Análise em Função dos Parâmetros de Mistura

4.2.2.2.1 Resistência à Compressão Axial

Conforme já esperado o valor da resistência à compressão axial aumenta à medida que o consumo de cimento aumenta, para as três séries estudadas. Na Figura 4.7 pode-se verificar que, para um mesmo intervalo de consumo de cimento, a série AG1 apresentou as maiores

resistências à compressão axial. Já a série AF1 apresentou os menores resultados, devido às maiores relações a/c . E a série AGF1 apresentou um comportamento intermediário.

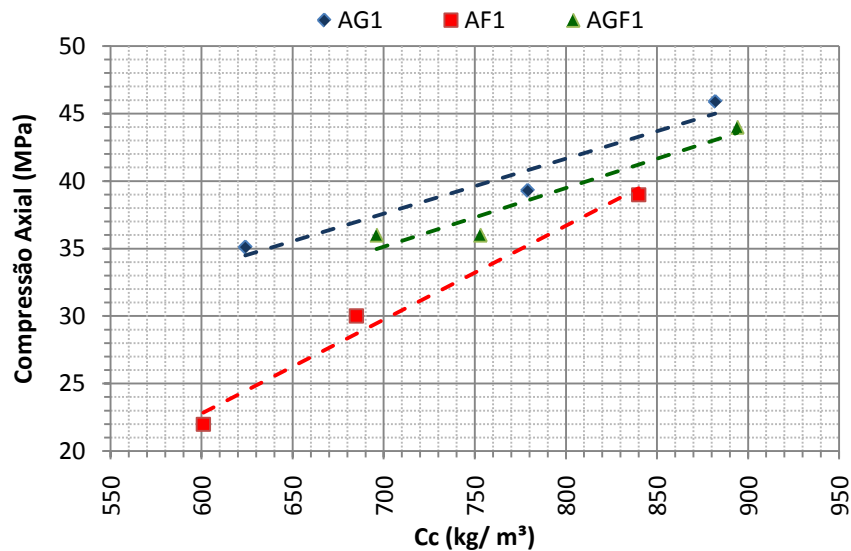


Figura 4.7 - Comportamento da resistência à compressão axial versus C_c , cps prismáticos (4x4x16 cm)

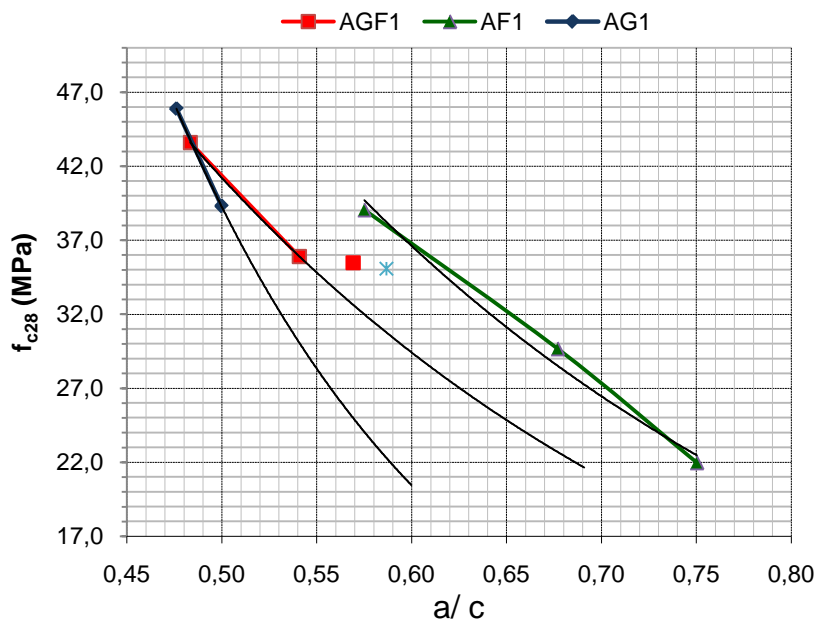


Figura 4.8 – Resistência à compressão axial dos cps prismáticos (4x4x16 cm) x relação a/c .

Os resultados apresentados na Figura 4.8 mostram que as modificações feitas na granulometria da série AGF1 influenciaram nas resistências à compressão da argamassa, visto que, a série AGF1 apresenta valores de f_{c28} próximos aos do AG1, com maior índice de pasta e menor índice de vazios, melhorando-se assim a trabalhabilidade.

Uma conclusão importante foi constatar que o AGF1 apresenta comportamento similar ao AG1, no que diz respeito à resistência à compressão aos 28 dias. Já no estado fresco o comportamento se aproximou da composição AF1, quanto à coesão, exsudação, aparência da argamassa, comportamento sob fluxo.

4.2.2.2 Resistência à Tração

Para analisar a resistência à tração foram realizados dois ensaios: tração na flexão e tração indireta (ensaio da resistência à compressão diametral).

Os resultados para o ensaio à compressão diametral estão apresentados na Figura 4.9, não mostrando nenhuma tendência conclusiva dos valores obtidos. Deve-se ressaltar que uma das vantagens da estaca raiz é o bom funcionamento a tração, porém pode-se observar que os resultados podem ser influenciados por vários fatores, conforme mostra os resultados aleatórios.

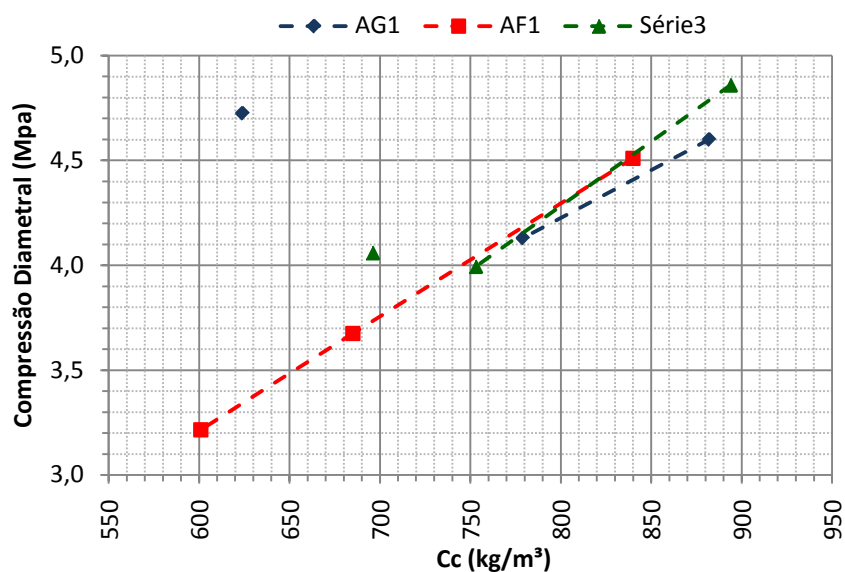


Figura 4.9 - Resistência à compressão diametral x Cc, para cps cilíndricos (5x10 cm)

Na Figura 4.10 pode-se verificar que os resultados obtidos para a série AG1 estão próximos do comportamento verificado pela série AGF1, porém no ponto referente ao traço G_T03, houve um desvio no comportamento, tendo sido provavelmente influenciado por algum fator externo. Já para a série AF1 observa-se que a resistência diminui à medida que aumenta a

relação a/c. Os resultados apresentados mostram que a modificação na granulometria das séries pouco influenciou na resistência à tração por compressão diametral das argamassas.

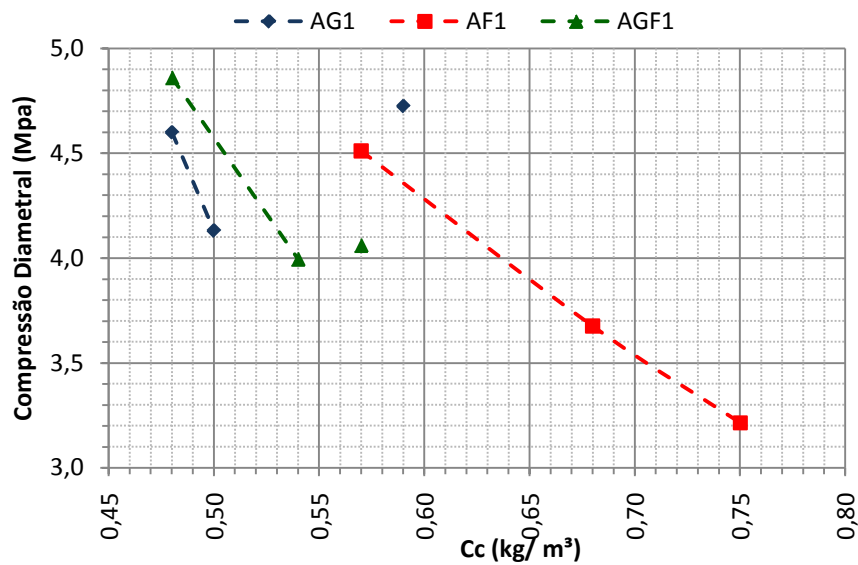


Figura 4.10 - Representação gráfica da resistência à compressão diametral dos cps cilíndricos (5x10 cm).

Os valores à resistência à tração na flexão estão apresentados na Figura 4.11, onde não se verifica tendência nas curvas traçadas. Os dois ensaios realizados para avaliar a resistência à tração não apresentaram resultados satisfatórios, sendo possivelmente influenciado por fatores externos ou inerentes à metodologia do ensaio.

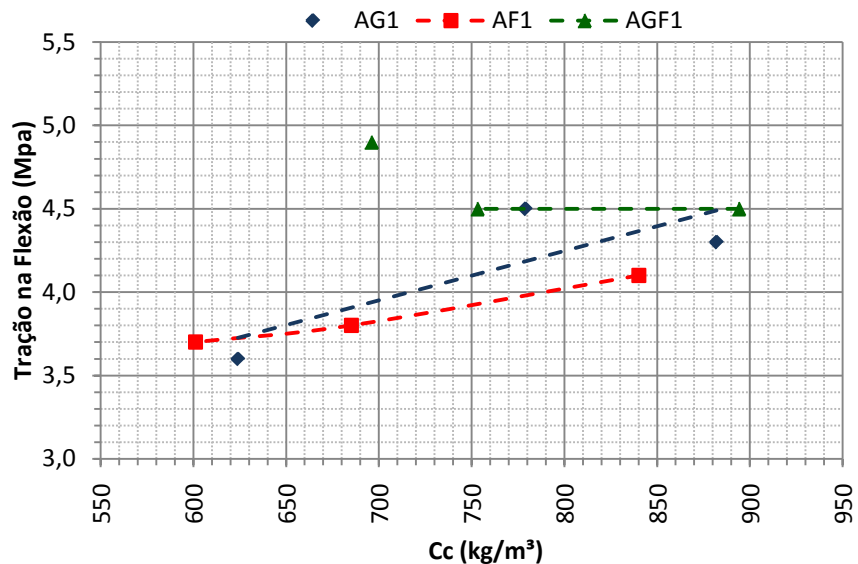


Figura 4.11 - Resistência à tração na flexão x Cc, para cps prismáticos (4x4x16 cm)

Comparando os resultados apresentados na Figura 4.12, pode-se constatar um ganho de resistência à tração na flexão para a série AGF1, quando comparado as outras séries (AG1 e

AF1). Os resultados apresentados mostram que a modificação na granulometria das séries influenciou na resistência à tração das argamassas. É importante salientar que a comprovação da influência dos finos no aumento de $f_{ct,f}$ (AG1 → AGF1), apresentado neste item, necessita de uma análise mais ampla, com várias idades e maior amostragem.

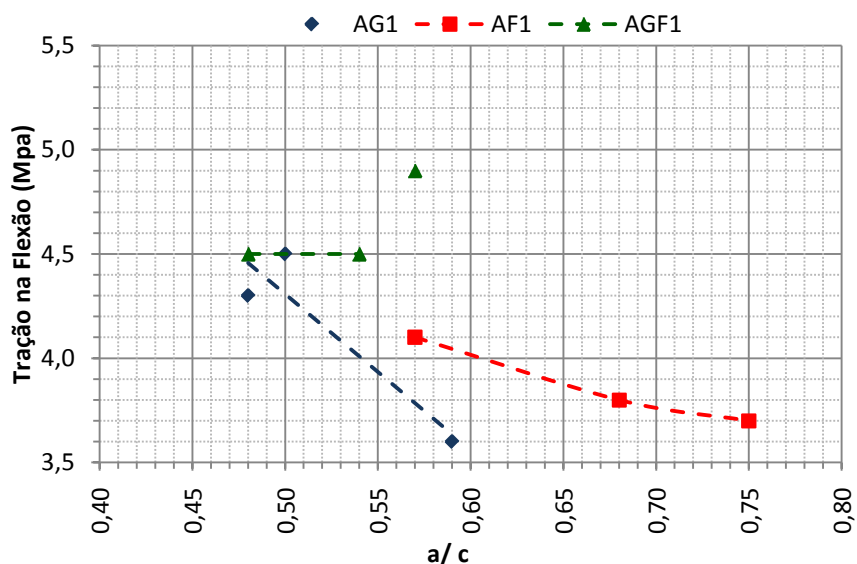


Figura 4.12 - Representação gráfica da resistência à tração na flexão dos cps prismáticos (4x4x16 cm).

4.2.2.3 Módulo de deformação estático (E_{ci})

Na determinação do módulo de elasticidade foram utilizados três corpos-de-prova cilíndricos (5 x 10 cm) na idade de 28 dias, de acordo com a NBR 8522/ 2003. Os resultados do módulo de deformação estático ou módulo de deformação longitudinal estão apresentados na Tabela 4.10, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 4.10 – Resultados do módulo de elasticidade para c.p.s cilíndricos.

Série	Traço	Média (GPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AG1	G_T 01	1,7	0,1	8,4%
	G_T 02	1,5	0,1	5,6%
	G_T 03	1,6	0,1	9,0%
AF1	F_T 01	1,4	0,0	2,4%
	F_T 02	1,3	0,1	9,2%
	F_T 03	1,4	0,0	2,3%
AGF1	GF_T 01	2,2	0,2	9,9%
	GF_T 02	2,1	0,1	6,7%
	GF_T 03	2,0	0,1	5,7%

As médias dos valores de E_{ci} , variam de 1,3 GPa até 2,2 GPa. Com relação aos valores de desvio padrão e coeficiente de variação são verificadas algumas variações acima do intervalo recomendado pelos estatísticos (5%).

Nas argamassas ensaiadas os maiores valores de E_{ci} ocorreram para as argamassas produzidas com agregado AGF1. Analisando os resultados da Tabela 4.10 e na Figura 4.13, pode-se constatar que a série AF1 apresentou a maior deformação, seguido pela AG1. Os resultados apresentados mostram que uma maior compacidade na distribuição granulométrica conduziu a uma menor deformação longitudinal da argamassa AGF1.

Pode-se observar que o comportamento do módulo foi constante para as séries AG1 e AF1 à medida que a resistência à compressão axial aumentava, já na série AGF1 o módulo aumentou com o acréscimo da resistência à compressão axial.

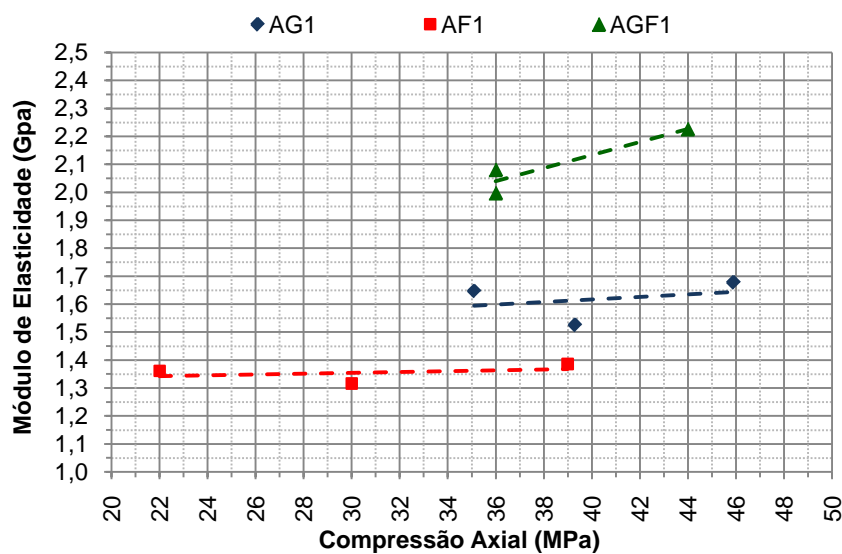


Figura 4.13 - Comportamento do módulo de elasticidade em relação a resistência à compressão de cps prismáticos (4x4x16 cm).

Conforme demonstrado no capítulo 2, item 2.5.2.1, o módulo de elasticidade utilizado no dimensionamento da estaca raiz aos 28 dias é obtido conforme a NBR 8522/ 2003, sendo igual a 30 GPa, considerando um f_{ck} igual a 20MPa.

Comparando-se os valores obtidos pela norma ($E_{ci} = 30 \text{ GPa}$) e o módulo de deformação tangente inicial encontrado pela série AGF1 ($E_{ci} = 2,1 \text{ GPa}$), temos um módulo previsto pela norma de grandeza 14 vezes maior do que os resultados encontrados para as séries. Deve-se ressaltar que a NBR 8522/ 2003 prescreve o módulo de elasticidade para concretos, e de acordo com os resultados encontrados não é recomendado utilizar esta referência para a previsão do módulo de elasticidade de argamassas utilizadas no preenchimento de estacas raiz.

O diagrama de dosagem pode ser observado na Figura 4.14. No Anexo estão apresentadas as equações referentes às tendências geradas para cada série analisada.

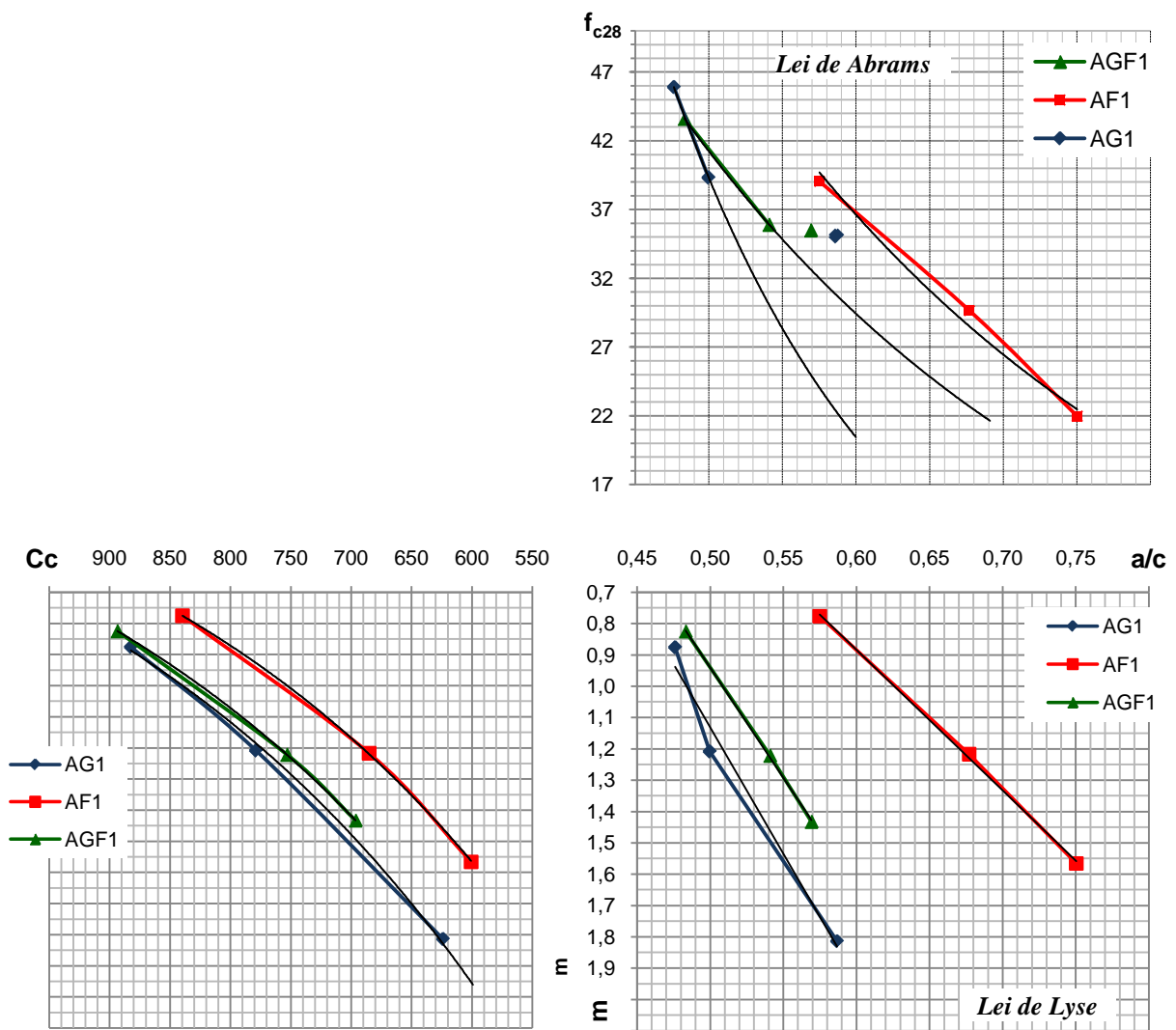


Figura 4.14 – Diagrama de Dosagem obtido através do programa experimental.

4.3 *ESTUDO DE CAMPO – DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS A SEREM EXECUTADOS*

Esta etapa da pesquisa tinha como objetivo encontrar a mistura mais econômica, possuindo adequadas características ao processo de preenchimento. Para a definição dos traços a serem executados no campo experimental foram utilizados dois critérios prescritos na NBR 6122/1996:

- consumo mínimo de cimento igual a 600 kg/m³. Os traços dosados segundo este critério serão identificados pelo código “C600”, como por exemplo: AG1 – C600;
- f_{ck} compatível com as técnicas executivas e de controle não superior a 20 MPa. Os traços dosados segundo este critério serão identificados pelo código “F30”, como por exemplo: AG1 – F30

Após a elaboração do diagrama de dosagem verificou-se que o intervalo pesquisado não abrangia, em alguns casos, os limites especificados para a escolha dos traços. Neste casos optou-se por fazer a extrapolação das curvas, mesmo sabendo que a extrapolação não é recomendada fora do intervalo pesquisado, segundo a análise estatística. Deve-se ter critério na análise dos resultados extrapolados, caso contrário poderá induzir a comportamentos errôneos, não descrevendo o comportamento do material investigado.

Em alguns casos o intervalo pesquisado não foi maior devido ao elevado teor de água na mistura, ocasionando comportamentos indesejáveis, como por exemplo: a perda de coesão, excesso de exsudação e segregação nas argamassas. Nestes casos, seria necessário modificar a metodologia de dosagem, sendo recomendável a utilização de aditivos ou adições para alcançar a trabalhabilidade desejada, utilizando menores teores de água, o que não foi contemplado no escopo desta pesquisa.

4.3.1 *APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ESTACAS NO ESTADO FRESCO*

Através das tendências das curvas obtidas pelo diagrama de dosagem no Programa Experimental II, mantendo-se a mesma consistência obtida na obra monitorada, foram definidos os traços utilizados na execução das estacas. Foram executadas duas estacas para

cada tipo de composição de agregado, conforme pode ser observado na Tabela 4.11 e Tabela 4.12.

Tabela 4.11 – Traços extraídos do Diagrama de Dosagem, definido segundo o $C_c = 600 \text{ kg/m}^3$.

Tipo Areia	A% (%)	C_c * (kg/m^3)	f_{c28} (MPa)	Traço unitário em massa (kg)		
				Cim.	Areia	a/c
AG1 – C600	20	598	20	1	1,97	0,59
AF1 – C600	29	600	22	1	1,61	0,70
AGF1 – C600	22	599	26	1	1,90	0,61

(*) – Valor fixado no diagrama de dosagem de acordo com a NBR 6122/ 1996.

Tabela 4.12 – Traços extraídos do Diagrama de Dosagem, definido segundo o $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$.

Tipo Areia	A% (%)	C_c (kg/m^3)	f_{c28} * (MPa)	Traço unitário em massa (kg)		
				Cim.	Areia	a/c
AG1 – F30	22	703	30	1	1,46	0,54
AF1 – F30	31	703	30	1	1,19	0,63
AGF1 – F30	23	655	30	1	1,63	0,57

(*) – parâmetro fixado no diagrama de dosagem, considerando $f_{ck} = 20\text{MPa}$, $S_d = 5,5 \text{ MPa}$.

Para a dosagem dos traços no campo experimental a areia foi previamente preparada, pesada e armazenada em embalagens plásticas, visando conservar a umidade dos grãos. A quantidade de água prevista para ser adicionada na mistura foi corrigida, em função da umidade da areia, sendo medida no momento da dosagem através de recipientes plásticos graduados.

Apesar dos preparativos para a dosagem da argamassa no campo experimental, ocorreram algumas dificuldades devido ao processo executivo, como por exemplo: o tempo gasto para produzir a argamassa utilizada no preenchimento de uma estaca era insuficiente para a realização dos ensaios e moldagem dos corpos-de-prova. Houve influência de fatores externos, como por exemplo, a elevada temperatura e baixa umidade do ar, provocando o rápido endurecimento da argamassa, causando a alteração da consistência, ou seja, o valor medido da tensão de escoamento. Em resumo, os valores previstos para a tensão de escoamento, no diagrama de dosagem, não foram alcançados com êxito.

Observou-se logo na primeira dosagem que a consistência prevista não foi alcançada através do proporcionamento dos materiais sugeridos pelo diagrama de dosagem, observando-se um comportamento mais fluido. Sendo assim, tentou-se realizar alguns ajustes na quantidade de

água a fim de se obter uma consistência mais próxima da especificada. As Tabelas a seguir (Tabela 4.13 e Tabela 4.14) mostram as correções na quantidade de água realizadas nos traços indicados nas tabelas anteriores (Tabela 4.11 e Tabela 4.12), e os resultados obtidos nos ensaios realizados no estado fresco (Vane Test e Funil V).

Tabela 4.13 – Dosagem realizada no Estudo de Campo, definido pelo $C_c = 600 \text{ kg/ m}^3$.

Tipo Areia	A% (%)	Cc * (kg/m ³)	Traço unitário em massa (kg)			τ_e (kPa)	V-Funil (s)
			Cim.	Areia	a/c		
AG1 – C600	20	600	1	1,97	0,59	0,077	1,59
AF1 – C600	23	653	1	1,61	0,60	0,144	2,22
AGF1 – C600	20	615	1	1,90	0,58	0,263	2,29

(*) – parâmetro definido na realização da dosagem.

Tabela 4.14 – Dosagem realizada no Estudo de Campo, definido pelo $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$.

Tipo Areia	A% (%)	Cc (kg/m ³)	Traço unitário em massa (kg)			τ_e (kPa)	V-Funil (s)
			Cim.	Areia	a/c		
AG1 – F30	22	708	1	1,46	0,53	0,330	2,48
AF1 – F30	25	761	1	1,19	0,54	0,215	4,18
AGF1 – F30	20	685	1	1,63	0,52	0,187	2,57

As diferenças obtidas nos resultados para a tensão de escoamento em relação à especificada ($\tau_e = 0,215 \text{ kPa}$) dificultando uma comparação direta dos resultados no estado endurecido, pois cada mistura apresentou uma τ_e diferente, sendo que algumas argamassas apresentaram consistência muito fluidas e outras menos fluidas. No caso da série AG1, tanto para o consumo de cimento igual a 600 kg/ m^3 , como para a resistência (f_{c28}) igual a 30 MPa , verificou-se a ocorrência de exsudação na realização dos ensaios, acarretando o bloqueio do fluxo no mangote, no processo de injeção da argamassa, possivelmente provocado pela segregação da areia, devido à falta de coesão.

Em resumo pode-se constatar que o procedimento de dosagem realizado requer a realização de outras dosagens para caracterizar melhor o comportamento das argamassas no estado fresco, o que não foi possível ser realizado em decorrência de limitações de prazo para conclusão deste trabalho.

4.3.2 EXECUÇÃO DE ESTACAS RAIZ NO CAMPO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da execução e exumação das estacas raiz no Campo Experimental do Departamento de Geotecnia da UnB.

Na área referente ao campo experimental tem-se um perfil típico da camada de solo laterítico vermelho argiloso, denominado de “argila porosa”, que apresenta baixa resistência à penetração (SPT variando de 1 a 6 golpes), baixa resistência de ponta (CPT variando de 0,6 a 2,3 MPa), baixa capacidade de suporte, baixo nível de saturação e alta permeabilidade (10^{-3} a 10^{-4} m/s) (MOTA, 2003).

Foram executadas seis estacas raiz de diâmetro igual a 20 cm e profundidade de 4,0m. As estacas seguiram um alinhamento pré-definido e o espaçamento mantido entre os furos foi de 1,5 m, visando evitar influências laterais.

Para a execução das estacas utilizou-se uma argamassadeira da marca Puts Master (P13), fabricada no ano de 1997, possuindo um motor com capacidade de 10cv, 380/ 460V, 60Hz, sendo a pressão para a escavação/ injeção de água de 5cv, sendo da marca WEG. A pressão de normalmente 3kg/cm^2 para a injeção de ar a cada 3m de argamassa injetada não foi utilizada pois dificultaria a posterior exumação das estacas, pois proporcionaria o enraizamento da argamassa no solo. Na Figura 4.15 pode-se observar a argamassadeira utilizada na mistura da argamassa, estando ao lado esquerdo da foto o conjunto de bombas responsáveis pela mistura e injeção.



Figura 4.15 – Argamassadeira utilizada nas misturas.

Na armação longitudinal das estacas foram utilizadas 4 barras de $\varnothing 10,0$ mm e na armação transversal foi utilizada barras de $\varnothing 5,0$ mm com passo de 12 cm.

Após 28 dias da data de concretagem das estacas, foi realizada a exumação com o objetivo de conhecer as características geométricas das estacas. Para que fosse possível executar esse serviço foi necessário avaliar as possíveis maneiras de executar a extração. Na extração foi utilizado um Munck de 5tn, sendo que a armação longitudinal foi dobrada deixando-se na parte superior um gancho para posteriormente içar a estaca, conforme pode ser observado na Figura 4.16.

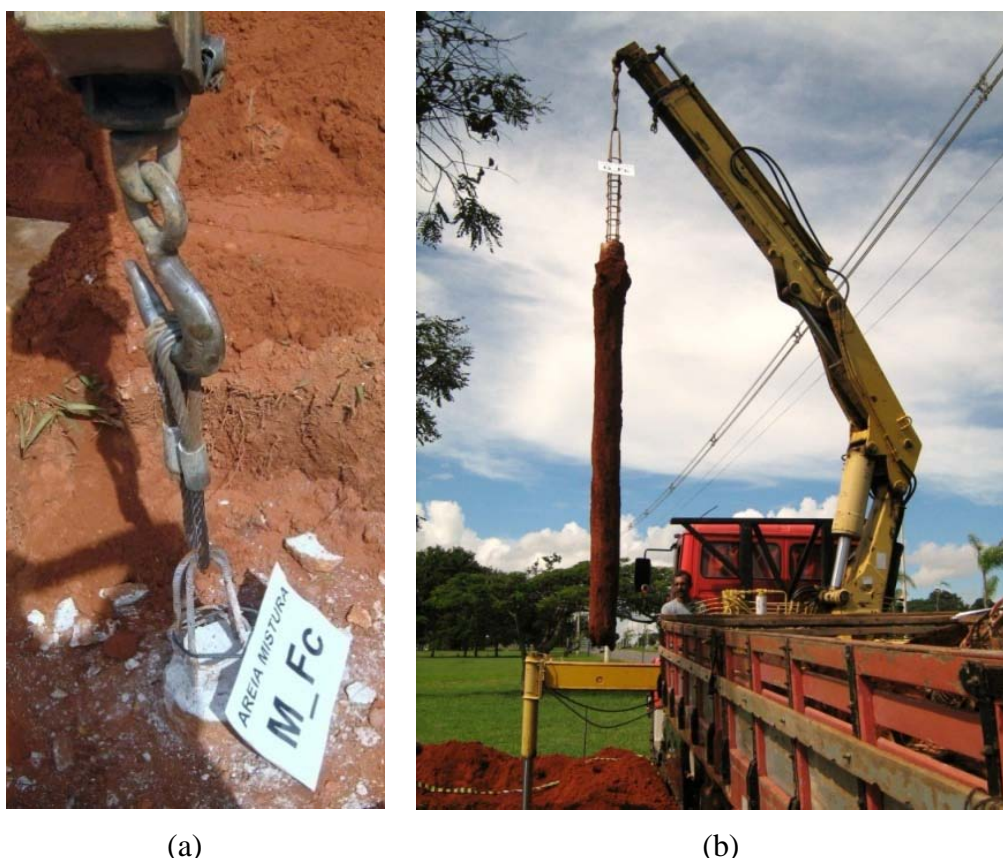


Figura 4.16 – Momento de retirada das estacas do solo. (a) – içamento da estaca através da ferragem, (b) a estaca após a retirada do solo.

Não houve dificuldade na extração das estacas devido à baixa resistência do solo nas primeiras camadas, comprovado pelo laudo de sondagem realizado no local, em trabalhos anteriores.

Após a exumação das estacas foi realizada uma inspeção visual, podendo-se analisar as alterações na superfície do fuste, geometria e forma da ponta, provavelmente ocasionadas pelas diferentes consistências das argamassas, variação na pressão de injeção, propriedades das pastas e agregados. Observe a Figura 4.17 e Figura 4.18

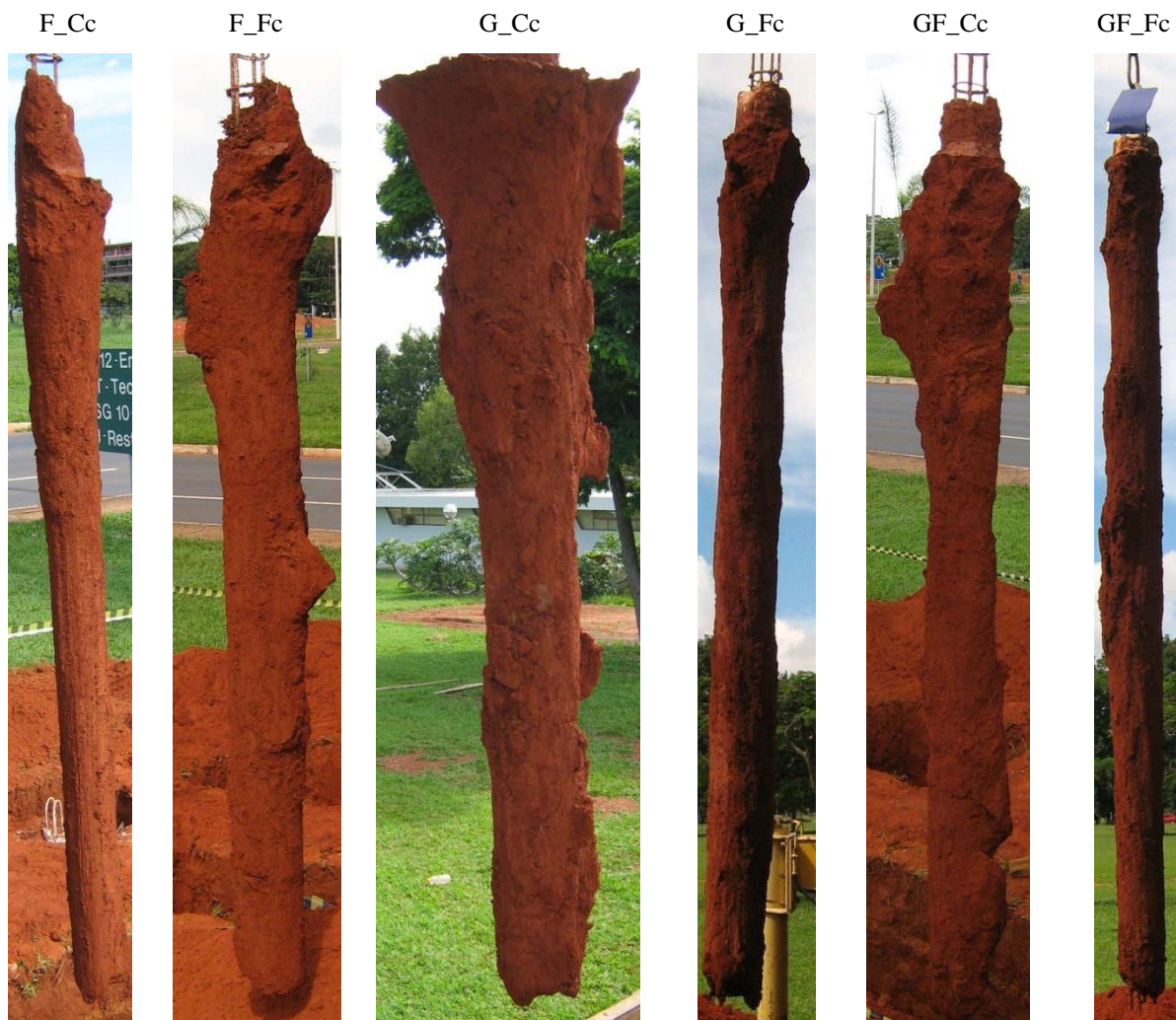


Figura 4.17 – Estacas após a exumação, mostrando o comportamento da argamassa injetada ao longo do fuste.

Aspecto superficial das estacas após a retirada do excesso de solo:

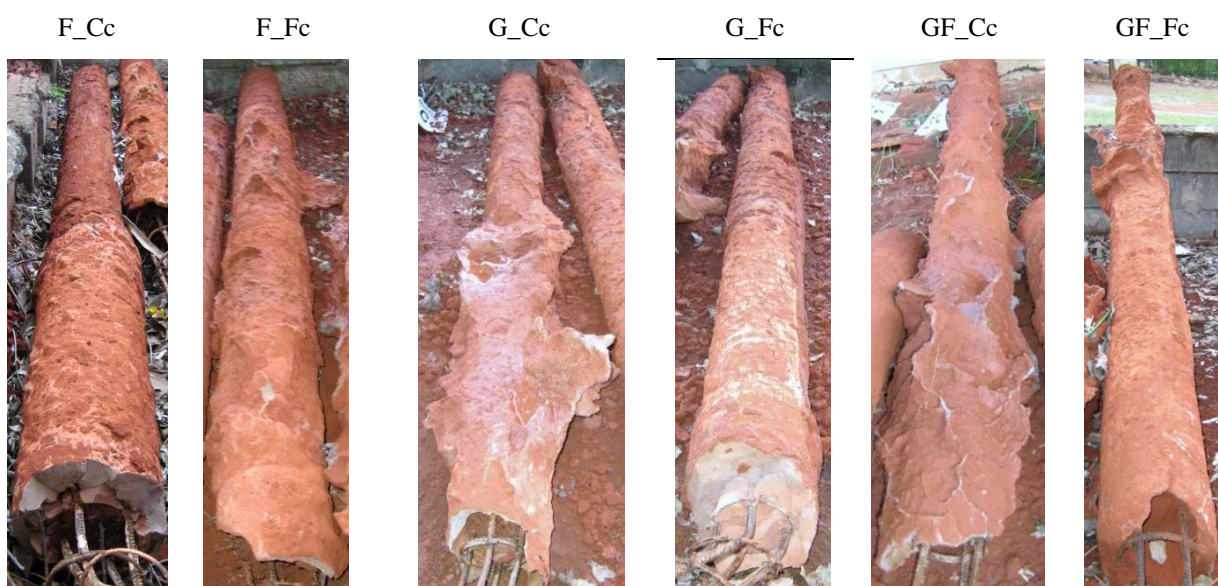


Figura 4.18 - Estacas após a retirada do excesso de solo para melhor analisar a superfície do fuste.

Devido ao espaçamento mantido entre os furos ser de 1,5 m, considerou-se que o solo não seria uma variável no processo, pois a influência que a camada de solo exerceria no preenchimento das estacas seria a mesma para todos os traços, não interferindo no resultado final obtido.

Pode-se verificar que o comportamento final da superfície do fuste, comparando-se o mesmo tipo de areia, foram distintos: um apresentou rugosidade/ enraizamento da argamassa no solo, e no outro observa-se uma superfície bem lisa.

Na série de areia fina pode-se observar que a superfície do fuste do traço F_Cc apresentou pouca rugosidade, já para o traço F_Fc verifica-se uma superfície mais rugosa mas não ocorrendo o enraizamento da argamassa no solo.

Para as séries dosadas com a areia grossa e a composição das duas areias pode-se observar que os traços dosados a partir do parâmetro $C_c=600 \text{ kg/ m}^3$ apresentaram maior rugosidade, sendo visível o enraizamento da argamassa no solo.

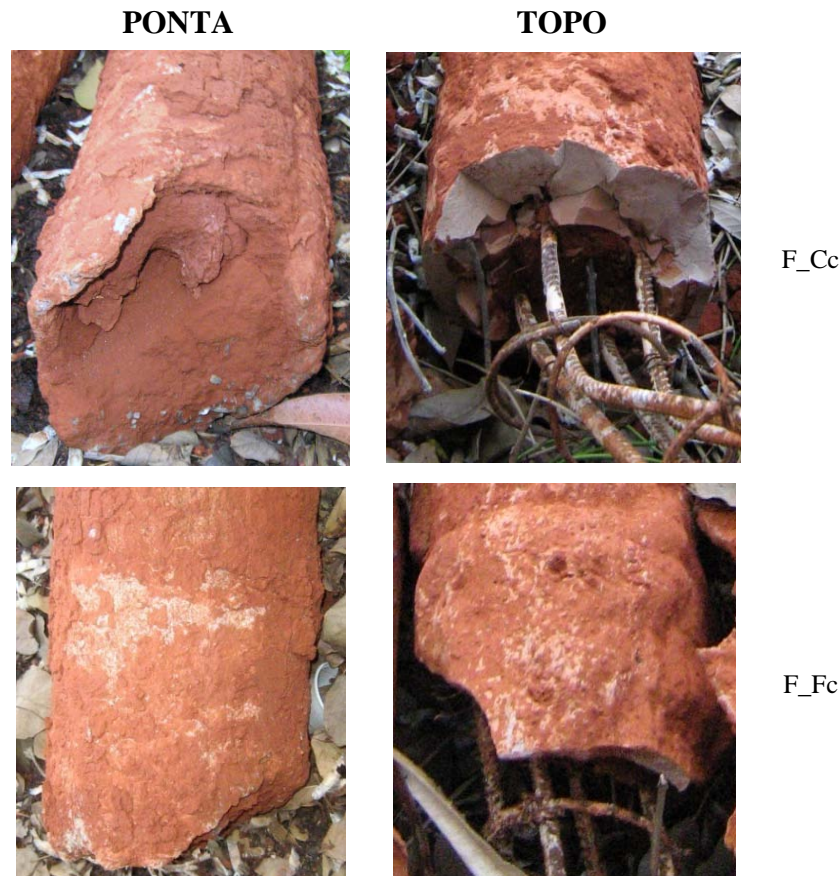


Figura 4.19 – Detalhes das pontas e topo das estacas moldadas para a série dosada com a areia fina.

A Figura 4.19 mostra o comportamento da argamassa para a série dosada com areia fina, detalhando o topo da estaca (região do fuste mais próxima à superfície) e na ponta (região do fuste que atingiu a maior profundidade).

Pode-se observar que no topo da estaca dosada no traço F_Cc a argamassa apresentou aspecto quebradiço, comprovando que não seria indicado a execução de traços com apenas areia fina, por motivos econômicos, de resistência e durabilidade.

Na Figura 4.20 pode-se observar o comportamento para a série dosada com areia grossa. Na ponta verifica-se o completo envolvimento da armadura pela argamassa, ocorrendo ao longo do fuste e no topo da estaca dosada com o traço G_Cc um enraizamento da argamassa no solo, característica importante para o comportamento da estaca raiz.

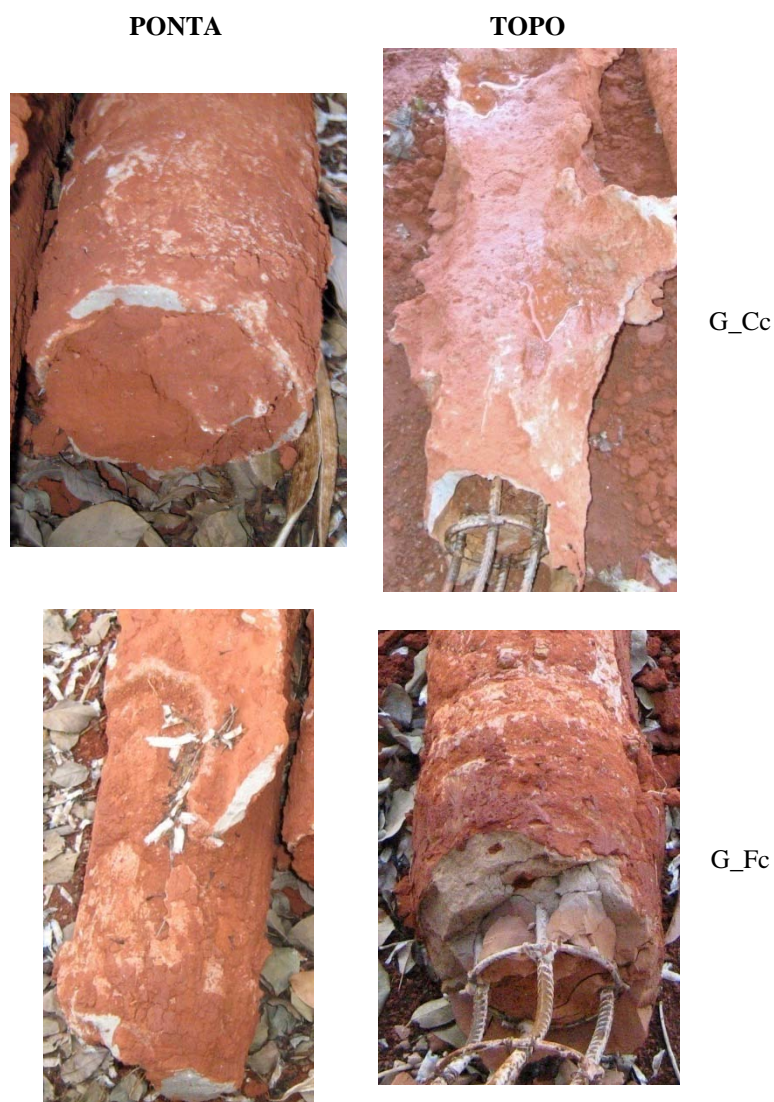


Figura 4.20 – Detalhes das pontas e topo das estacas moldadas para a série dosada com a areia grossa.

Na Figura 4.21 pode-se observar o comportamento das estacas dosadas com o proporcionamento das duas areias. Pode-se verificar que tanto no topo, quanto na ponta da estaca dosada com o traço GF_Cc, ocorreu o enraizamento da argamassa no solo. Já no traço GF_Fc houve uma falha no envolvimento da armadura pela argamassa, na região da ponta da estaca, possivelmente causada pelo acúmulo de água, ou solo na região.

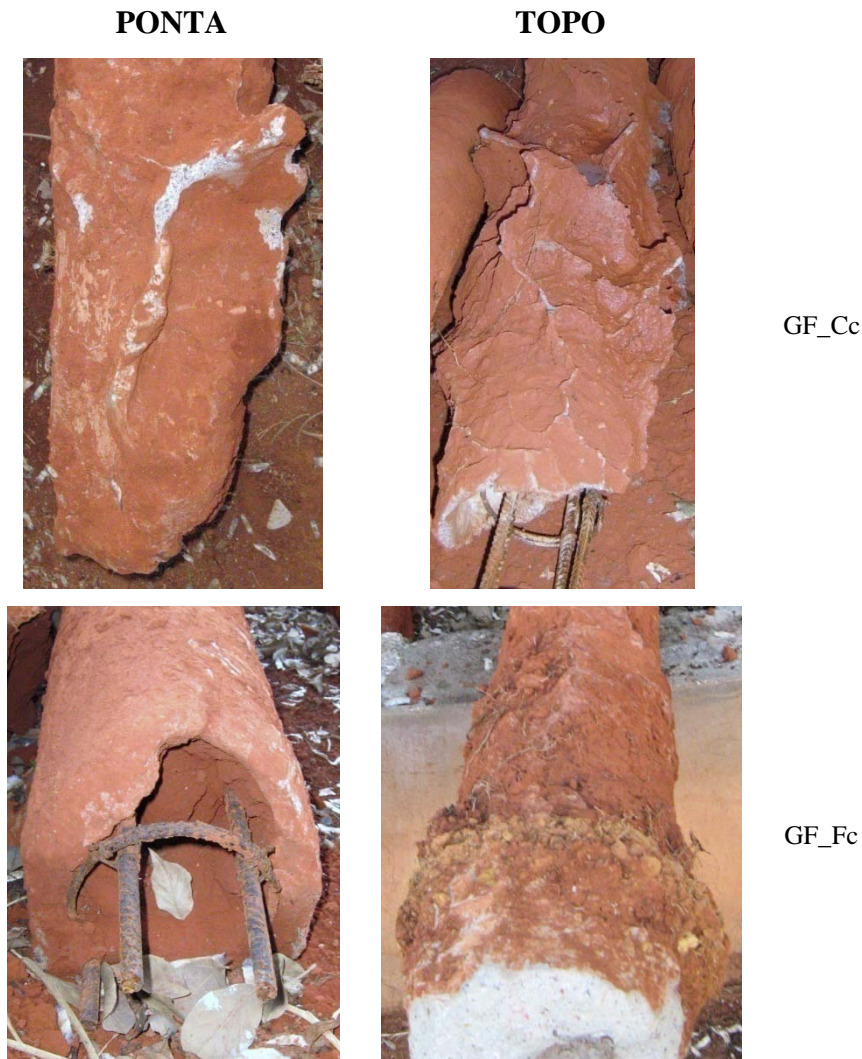


Figura 4.21 – Detalhes das pontas e topo das estacas moldadas para a série dosada com a areia fina e grossa.

Em resumo tem-se que a série que apresentou os melhores resultados foram as dosadas com areia grossa e a composição das duas areias.

Após a exumação das estacas os furos foram preenchidos com o solo proveniente das escavações e efetuou-se a limpeza do local.

4.3.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

O resultado do ensaio de resistência à compressão é influenciado por vários parâmetros da mistura: dimensões e tipo do corpo-de-prova, capeamento, velocidade de carregamento, temperatura e umidade, entre outros. Por isso, o ensaio de resistência à compressão deve seguir procedimentos padronizados.

No Brasil, para a realização dos ensaios de resistência à compressão são utilizados corpos-de-prova cilíndricos, os quais mantêm a relação altura/ diâmetro igual a duas vezes. Para concretos com resistência à compressão mais elevada utilizam-se corpos-de-prova com dimensões menores, devido à limitação na capacidade das prensas.

Mantendo-se a razão altura/diâmetro igual a 2, a resistência diminui à medida que o diâmetro do corpo-de-prova aumenta (METHA & MONTEIRO, 1993). Nesta etapa da pesquisa foram moldados vários tipos e tamanhos de corpos-de-prova, visando-se fazer uma análise comparativa dos resultados.

Nos próximos itens serão apresentados os resultados dos ensaios no estado endurecido referentes aos corpos-de-prova moldados na execução de estacas raiz no campo experimental.

4.3.3.1 Resistência à compressão axial

A Tabela 4.15 apresenta a média dos resultados à compressão axial obtidos para os corpos-de-prova prismáticos cortados, com dimensões de 4 x 4,5 x 20 cm.

Verificam-se altas variações para o coeficiente de variação e desvio-padrão, provavelmente ocasionado pelo processo de corte dos corpos-de-prova, adensamento, etc.

Pode observar que as argamassas dosadas para o $f_{c28} = 30$ MPa correspondem às argamassas que apresentaram os maiores valores de resistência em média, pois justamente estes traços apresentaram os valores de tensão de escoamento maiores e menores relações a/c. Vários fatores podem ter contribuído para esta variação nos valores encontrados, como por exemplo, a não uniformidade na moldagem dos corpos-de-prova, seccionamento dos corpos-de-prova, etc.

Tabela 4.15 – Resultados da resistência à compressão axial para c.p.s prismáticos cortados.

Corpos-de-prova prismáticos (4 x 4,5 x 20 cm)

Série	Traço	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_C600	20,0	2,0	10,2%
	G_F30	32,5	3,9	11,9%
AF1	F_C600	19,5	3,8	19,7%
	F_F30	27,0	2,2	8,3%
AGF1	GF_C600	22,4	3,4	15,2%
	GF_F30	24,5	2,9	11,7%

4.3.3.2 Resistência à tração na flexão

Os valores da resistência à tração por compressão diametral para corpos-de-prova prismáticos cortados (4 x 4,5 x 20 cm), estão apresentados na Tabela 4.16.

Nas séries AG1 e AGF1 as variações dos resultados apresentaram desvios abaixo do tolerável pelos estatísticos. Entretanto, a série AF1 apresentou resultados acima do aceitável.

Tabela 4.16 – Resultados de resistência à tração na flexão para c.p.s prismáticos cortados.

Série	Traço	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_C600	6,1	0,1	1,2%
	G_F30	6,9	0,7	10,5%
AF1	F_C600	6,7	0,8	12,2%
	F_F30	6,1	0,6	10,3%
AGF1	GF_C600	6,5	0,5	7,1%
	GF_F30	7,1	0,7	9,3%

4.3.3.3 Módulo de deformação estático

Para a análise dos resultados do módulo de elasticidade a Tabela 4.17 apresenta os valores de E_{ci} , bem como as médias, o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

As médias dos valores de E_{ci} para a série AF1 foram iguais aos obtidos no Projeto Experimental II ($E_{ci} = 1,4$ GPa), já para a série AGF1 os valores apresentados foram ligeiramente menores do que os obtidos anteriormente ($E_{ci} = 2,1$ GPa). Com relação aos valores de desvio-padrão e coeficiente de variação, são verificadas variações dentro do intervalo aceitável (5,0%).

Tabela 4.17 – Resultados do módulo de elasticidade para c.p.s cilíndricos.

Série	Traço	Média (GPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AG1	G_C600	-	-	-
	G_F30	-	-	-
AF1	F_C600	1,39	0,0	2,4%
	F_F30	1,44	0,1	5,0%
AGF1	GF_C600	1,69	0,1	5,7%
	GF_F30	1,70	0,1	5,4%

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A única recomendação que a NBR 6122/ 1996 faz em relação à dosagem da argamassa é fixar um consumo mínimo de cimento não inferior a 600 kg/ m³. Através da análise dos traços executados no campo experimental, em todos os casos se verificou que o consumo de cimento estava acima do limite especificado pela norma, porém em alguns resultados não foi atingida a resistência de dosagem (f_{c28}) igual a 30,0 MPa, que corresponde ao f_{ck} igual a 20 MPa especificado pela norma. Uma provável causa das resistências terem sido baixas se dá pela alta relação água/ cimento utilizada nos traços, sendo assim, pode-se constatar a importância de recomendação de um limite máximo e mínimo permitidos na dosagem.

Deve-se ressaltar que o consumo de cimento é uma simples consequência da demanda de água necessária, no concreto ainda fresco, para assegurar a trabalhabilidade adequada.

Na dosagem realizada, consideraram-se três séries com curvas granulométricas distintas, sendo que a primeira foi composta apenas por areia grossa (AG1), a segunda constituída apenas por areia fina (AF1) e a última formada pela mistura das duas anteriores (AGF1). Nos resultados do módulo de elasticidade observou-se uma influência grande causada pelo tipo do agregado e a distribuição granulométrica. Os valores correspondentes à série AF1 foi de 1,3 a 1,4 GPa (maior deformação), seguida pela série AG1 que apresentou o módulo de 1,5 a 1,7, já a série AGF1, que teve a sua curva granulométrica melhorada pela mistura das duas areias, apresentou os maiores valores de módulo obtidos, de 2,0 a 2,2 GPa (correspondentes à menor deformação).

No comportamento do módulo em relação a água/ cimento, verifica-se que o intervalo da relação a/ c para as séries AG1 e AGF1 foi praticamente o mesmo, mas os resultados do módulo da série AGF1 foram superiores aos apresentados pela série AF1. Esta mesma tendência se verifica no comportamento referente a resistência à compressão axial.

As médias dos valores encontrados para o módulo de elasticidade, das três séries pesquisadas, variaram de 1,3 até 2,2 GPa. A previsão do comportamento da estaca raiz quanto à deformação segue as recomendações da NBR 8522/ 2007, que determina o cálculo do

módulo, através da resistência característica do concreto (f_{ck}) resultando em 30 GPa. Verifica-se que o resultados do módulo obtido nos ensaios é cerca de 14 vezes menor do que o módulo calculado a partir do f_{ck} , ou seja, a argamassa deforma 14 vezes mais, inviabilizando a integridade/ comportamento estrutural da estaca. É relevante a realização de outras pesquisas em relação ao módulo de elasticidade das argamassas utilizadas no preenchimento de estacas raiz, para a aferição de valores mais próximos ao comportamento real do material.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão axial foram influenciados pelo tipo e tamanho do corpo-de-prova, relação a/c, quantidade de pasta, etc.

Através de uma análise comparativa dos resultados obtidos nos ensaios realizados, pode-se observar que existe uma relação de proporcionalidade direta entre o consumo de cimento e o aumento da resistência mecânica dos traços ensaiados. Isto parece justificar-se a medida que as argamassas mais ricas são mais compactas, menos porosas pelo maior teor de pasta aglomerante e, conseqüentemente, apresentam melhores resistências.

No comportamento relatado percebe-se claramente que o aglomerante juntamente com a água funciona como lubrificante das partículas de agregado. Para as relações com teores de aglomerantes relativamente baixas, o contato entre as partículas de agregado é relativamente alto e pode dificultar o cisalhamento durante o ensaio, resultando no aumento da demanda de água para uma mesma tensão de escoamento. Aumentando-se o consumo de cimento e como conseqüência o índice de pasta também, o teor de aglomerante torna-se suficiente para favorecer o fluxo relativo entre as partículas de agregado (reduzindo o contato e afastando as partículas de agregado), necessitando de uma demanda de água menor para atingir a tensão de escoamento desejada ($\tau_e = 0,215$ kPa).

Em relação às composições analisadas, nota-se que a série AGF1 composta pela mistura de areia grossa e fina, apresentou o melhor desempenho no conjunto das propriedades ensaiadas, chegando a diferir significativamente, num grande número de resultados, dos demais traços estudados. Isto pode ser comprovado através dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração e o módulo de elasticidade.

Nos resultados obtidos para a série AGF1, a tensão de escoamento encontra-se no intervalo de 0,201 kPa a 0,211 kPa. A relação de água/ materiais secos varia de 23 a 25%. Os resultados encontrados estão próximos a tensão de escoamento requerida inicialmente ($\tau_e = 0,215$ kPa).

A adição de água nem sempre melhora a trabalhabilidade, pois, a partir de certo teor, e tendo-se em vista um adensamento por vibração (ou injeção de pressão, no caso da estaca raiz), o concreto/ argamassa segregará, não sendo, portanto, trabalhável. Elevando o teor de água aumenta-se a fluidez da argamassa, mas, por outro lado, aumenta também a exsudação e a tendência à sedimentação (segregação dos sólidos), o que dificulta a injetabilidade da argamassa. Deve ser procurado o ponto de equilíbrio, isto é, o máximo de tempo de escoamento sem prejuízo da resistência à segregação.

Entretanto é importante que um volume maior de trabalhos experimentais seja realizado para que se possam estabelecer correlações mais precisas e condizentes com os diversos tipos de agregados e materiais cimentantes utilizados no Brasil entre as diversas propriedades do material e suas características de empacotamento.

Já as séries AG1 e AF1 foram testadas experimentalmente, não apresentando bom desempenho quando submetido à avaliação da maioria das propriedades ensaiadas, pois apresentaram alto índice de exsudação e segregação, no caso da série AG1 e retração no caso da série AF1 e menores resistências mecânicas, diferindo significativamente da série AGF1.

Em relação as estacas executadas no campo experimental observou-se que os melhores resultados foram obtidos na série composta pela mistura das duas areias. A superfície do fuste apresentou rugosidade e enraizamento da argamassa no solo, de acordo com a definição deste tipo de fundação.

Foram observados diferentes comportamentos texturais das argamassas nas estacas, mostrando que além da consistência da argamassa, característica muito importante, o processo de bombeamento é fundamental para o aspecto final da estaca, dentre outras variáveis.

5.2 *SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS*

Com base em todo o estudo apresentado ao longo desta Dissertação e visando ampliar e definir ainda mais as propriedades intervenientes no processo de preenchimento da estaca raiz, são recomendados os seguintes tópicos para futuras pesquisas:

- Avaliar a influência da forma, textura e morfologia dos agregados constituintes das argamassas em relação ao processo de bombeamento;
- Estudar as propriedades requeridas das argamassas para o adequado bombeamento, utilizando a bomba de argamassa tipo pistão;
- Sugere-se que sejam realizadas mais pesquisas em relação à dosagem de argamassas, inclusive com a utilização de aditivos, avaliando-se as propriedades dos agregados de cada região no comportamento final da estaca;
- Desenvolver um mecanismo para a medição, com uma melhor precisão, do volume de água a ser adicionado na mistura, com o objetivo de realizar o controle tecnológico do processo;
- Sugerem-se mais trabalhos a respeito do desenvolvimento de ensaios para medir a consistência das argamassas em campo. O ensaio do Funil V proposto nesta pesquisa pode ser aperfeiçoado através de um dispositivo capaz de realizar a leitura do tempo de fluxo, melhorando a precisão do ensaio;
- Sugerem-se trabalhos para avaliar qual seria o corpo-de-prova mais adequado para a realização do ensaio de resistência à compressão axial, devendo-se seguir as recomendações da norma de argamassa de revestimento ou seria melhor a norma de concreto;

6. BIBLIOGRAFIA PRINCIPAL

ABEF (2007). **Manual de Especificações de Produtos e Procedimentos ABEF** - Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia, Editora PINI, 2ª edição, xxx p.

ABNT (1996). **Projeto e Execução de Fundações: NBR-6122**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 12 p.

ABNT (1996). **Argamassas para Assentamento de Paredes e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da Resistência à Compressão – Método de ensaio: NBR 13279**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2 p.

ABNT (1994). **Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndrico: NBR 7222**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3 p.

ABNT (2003). **Concreto – Determinação dos Módulos Elásticos de Elasticidade e de Deformação e da Curva Tensão-Deformação: NBR 8522**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 9 p.

ABNT (2006). **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento: NBR 12655**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 18 p.

ABNT (1996). **Projeto e execução de fundações: NBR 6122**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1996.

ABNT (2007). **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento: NBR 6118**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 221 p.

ABNT (2006). **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento: NBR12655** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

ALONSO, U. R. (1993). **Reavaliação do Dimensionamento Estrutural de Estacas Raiz Face à Exigência do Ensaio MB 3472 da ABNT**, Revista Solos e Rochas, vol. 16, nº 16, Abril.

ALONSO, U.R. (1996). **Estacas Injetadas**, Capítulo 9.1.5, Livro Fundações Teoria e Prática. Editora PINI LTDA, 1º ed., São Paulo SP, p. 361-372.

AMARAL, A.O.; GOMES, P.S. (2005). **Avaliação das Propriedades da Argamassa Utilizada no Preenchimento de Estaca Raiz**. Monografia de Projeto Final 2, Publicação G.PF- Julho/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 92.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. **An approximate method to estimate the bearing capacity of piles**. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5., 1975, Buenos Aires. Anais... Buenos Aires: ISSMGE, 1975. p. 116-127.

ARAÚJO JR., J.M. (2004). **Contribuição ao Estudo das propriedades Físico-Mecânicas das Argamassas de Revestimento**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM – 009A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 175p.

AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J.; GOODIER, C. I (1999). **The rheological performance of wetprocess sprayed mortars**. Magazine of Concrete Research, v. 51, n. 5, p. 341-352, October.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. E.; WALTERS F. R. S (1989). **An introduction to rheology**. **Amsterdam**: Elsevier Science. 199 p.

BARNES, H. A.; NGUYEN, Q. D (2001). **Rotating vane rheometry – a review**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, n. 98, p. 1-14.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. São Paulo, 2001. 172p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BATTAGIN, I. L. S. (2007). **Módulo de Elasticidade do Concreto Como Analisar e Especificar**. Superintendente do ABNT/CB-18: Comitê Brasileiro de Cimento – Concreto e Agregados da ABNT. Disponível em: <http://www.daneprairie.com/>.

BAUER, E.; SOUZA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A; SILVA, F. G. S. (2007). **Study of the laboratory Vane test on mortars**. Building and Environment – Elsevier, 86-92 p.

BERBERIAN, D. (1999). Engenharia de Fundações. Tomo II. ADVANCED. 1ª Ed. Editora Universa, Infrasolo, Technical.

BRASFOND (2007). Estaca Raiz (Catálogo). Brasfond Fundações Especiais LTDA, São Paulo, SP, 60p.

CABRAL, D. A. **O Uso de estacas raiz como fundação de obras normais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ABMS, 1986. v. 6, p. 71-82.

CARDOSO, C. M.; MOURA, A. S. (2007). **Reavaliação dos parâmetros dos solos de Fortaleza pelo método Aoki e Velloso (1975) para estacas do tipo raiz**. Revista Tecnológica. Fortaleza, v. 28, n. 1, jun, p. 51-61.

CARNEIRO, A. M. P; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. São Paulo, 1999. 14p. Boletim Técnico - Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil.

CINCOTTO, M. A; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento: propriedades, características e métodos de ensaios**, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1995, 118p.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**. Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999, 421 p.

DO Ó, S.W (2004). **Análise da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 175p.

FILHO, J. H.; CARDOSO, F. A.; CINOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. (2006). **Técnicas de caracterização reológica de argamassas**. e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil, Vol. 3, n. 2, Novembro, p. 103-120.

FUNDESP (2001). Fundações Especiais (Catálogo). Fundesp Fundações Especiais LTDA, 5ª Ed., Rio de Janeiro RJ, 62 p.

GIAMMUSSO, S. E. Coord. **CONCRETO**, Revista A Construção, São Paulo, PINI, Separata dos encartes 001/048.

GONÇALVES, S. R. C (2004). **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – Estudo de caso**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília. 148p.

GRISOLLI, M. (2007). Altura: 527 pixels. Largura: 527 pixels. 43,8 kb. Formato JPEG. Disponível em: <http://www.revistaau.com.br/arquitetura-urbanismo/161/imagens/i27240.jpg>

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P (1992). **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, Ed. PINI; Brasília: SENAI, 349p.

JOPPERT. J. I. (2007). **Fundações e contenções em edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução**. São Paulo: Pini.

KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W. **Summary of concrete workability tests methods**. International Center for Aggregates Research – ICAR. Report nº. ICAR 105-1, August, 2003.

MACHADO, J. C. V (2002). **Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 257 p.

MARTINS, V.C (2005). **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos: estudo de caso**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 186p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, 1ª Edição, São Paulo, Ed. PINI, 1994, 573p.

MOTA, N.M.B. (2003). **Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-013A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.

NAVARRO, R. F. **Fundamentos de reologia de polímeros**. Caxias do Sul: EDUCS, 1997. 264 p.

- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997. 738 p.
- NGUYEN, N. Q.; BOGER, D. V (1985). Direct yield stress measurement with the vane method. **Journal of Rheology**, v. 29, n. 3, p. 335-347.
- NUNES, F. W. G (2005). **Avaliação da resistência e do módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**. Tese – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, COPPE, Rio de Janeiro, 110 p.
- PETTRUCCI, E. G. R. (1993). **Concreto de cimento Portland**. 12 ed. Ver, São Paulo, Ed. Globo, 307p.
- PINTO, C., S. (2000) **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. São Paulo: Oficina de textos, 247p
- SANTOS, C. C. N. (2003). **Crítérios de Projetabilidade para as Argamassas Industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa com eixo helicoidal**. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 04A/03, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 138 p.
- SAYEGH, S. (2007). Referência Estaiada. AU – Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, n.161, agosto 2007. Disponível em: <http://www.revistaau.com.br/arquitetura-urbanismo/161/brasil-ponte-sobre-o-rio-das-ostras-58409-1.asp>. Acesso em: 15 nov. 2008.
- SEDRAN, T. and DE LARRARD, F. *Mixture-proportioning of highperformance concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 11, November 2002, p. 1699-1704.
- SILVA, A. S. M. (2004). **Dosagem de concreto pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Aïtcin-Faury**, Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 124 p.
- SOUSA, J. G. G.; BAUER, E., (2003). **Contribuição ao estudo da trabalhabilidade das argamassas mistas**, Anais do V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (V SBTA). São Paulo: EPUSP/ ANTAC, p. 279-290.
- SOUSA, J. G. G. (2005). **Contribuição ao Estudo das Propriedades das Argamassas de Revestimento no Estado Fresco**. Tese de Doutorado, Publicação E.TD 010A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 233p.
- SOUZA, J. G. G.; LARA, P. L. O. (2005). **Reologia e Trabalhabilidade das Argamassas**, Capítulo 3, Livro Revestimento de Argamassa: Características e Peculiaridades. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon, 92 p.
- TATTERSALL, G. H. (1976). **The workability of concrete**. Slough. Viewpoint Publication.
- TATERSALL, G. H. (1991). **Workability and Quality Control of Concrete**. E & FN SPON, London.
- TRISTÃO, F. A. (1995). **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Florianópolis. 188 p. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

07.JPG. Altura: 100 pixels. Largura: 75 pixels. 300 dpi. 32 BIT CMYK. 157.56 Kb. Formato JPG. Compactado. Disponível em: < <http://www.enbrageo.com.br/html/portifolio.htm>>. Acesso em: 19 nov. 2008.

09.JPG. Altura: 100 pixels. Largura: 75 pixels. 300 dpi. 32 BIT CMYK. 37.675 Kb. Formato JPG. Compactado. Disponível em: < <http://www.enbrageo.com.br/html/portifolio.htm>>. Acesso em: 19 nov. 2008.

ANEXOS

ANEXO A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

1) AGREGADO UTILIZADO NO PILOTO 01

Tabela A 1 - Areia utilizada nos estudos iniciais em laboratório.

Peneira (mm)	Peso peneira (g)	Material retido (g)	% Retida	% acumulada
6,3	465,0	12,9	1,3	1
4,8	521,8	30,3	3,0	4
2,4	605,0	100,3	10,0	14
1,2	454,3	254,0	25,4	40
0,6	521,6	193,5	19,4	59
0,3	368,8	231,8	23,2	82
0,15	348,6	119,4	11,9	94
0,075	403,3	38,8	3,9	98
Fundo	483,2	18,7	1,9	100
MF:	2,94		DM:	4,8

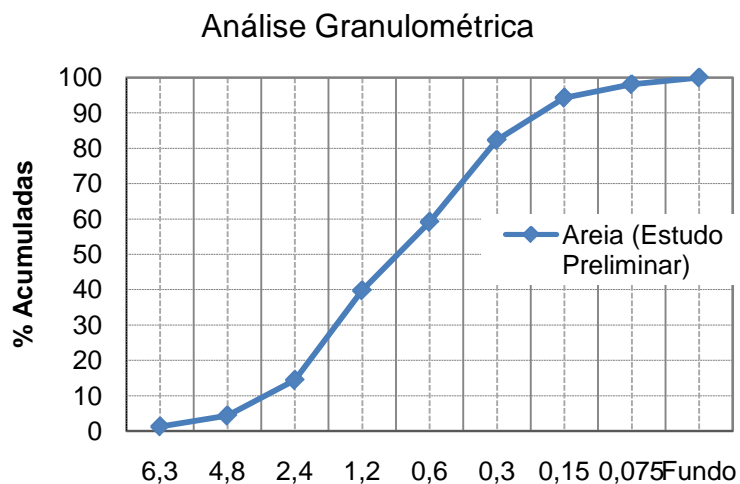


Figura A 1 – Distr. granulométrica da areia utilizada no Piloto 01.

2) **AGREGADO UTILIZADO NO PROJETO EXPERIMENTAL I, II E ESTUDO DE CAMPO**

Tabela A 2 – Percentagens retida acumuladas para a série AF1.

AREIA FINA (AF1)				
Peneira (mm)	Peso peneira (g)	Material retido (g)	% Retida	% acumulada
6,3	468,6	471,3	0%	0%
4,8	521,8	523,2	0%	0%
2,4	604,9	610,1	1%	1%
1,2	449,6	467,0	2%	3%
0,6	521,5	545,0	2%	5%
0,3	368,0	544,1	18%	23%
0,15	358,1	1029,9	67%	90%
0,075	394,4	454,1	6%	96%
Fundo	468,1	510,3	4%	100%
MF:	1,21		DM:	0,6

Tabela A 3 – Percentagens retida acumuladas para a série AG1.

AREIA GROSSA (AG1)				
Peneira (mm)	Peso peneira (g)	Material retido (g)	% Retida	% acumulada
6,3	468,6	482,0	1%	1%
4,8	556,5	560,5	0%	2%
2,4	499,4	778,0	28%	30%
1,2	583,2	888,0	30%	60%
0,6	509,9	647,5	14%	74%
0,3	368,6	467,0	10%	84%
0,15	348,5	395,1	5%	88%
0,075	403,2	491,1	9%	97%
Fundo	343,9	372,7	3%	100%
MF:	3,37		DM:	4,8

A outra composição foi formada pela mistura (AGF1) das duas areias anteriores. A proporção entre as duas areias que apresentou os melhores resultados foi considerando 35% de areia fina (AF1) e 65% de areia Grossa (AG1). A próxima tabela mostra as percentagens para cada peneira.

Tabela A 4 – Percentagens retida acumuladas para a série AGF1.

AREIA COMPOSTA PELA MISTURA DAS ANTERIORES (AGF1)						
Peneiras (mm)	% acumulada (FINA)	% acumulada (GROSSA)	Proporção de mistura		% retida	% retida acum.
			FINA	GROSSA		
6,3	0%	1%	35%	65%	1%	1%
4,8	0%	2%			0%	1%
2,4	1%	30%			18%	20%
1,2	3%	60%			20%	40%
0,6	5%	74%			10%	50%
0,3	23%	84%			13%	62%
0,15	90%	88%			27%	89%
0,075	96%	97%			8%	97%
Fundo	100%	100%			3%	100%
MF:	2,62		DM:	4,8		

Neste gráfico pode-se verificar as porcentagens de mistura das areias AF1 e AG1 analisadas:

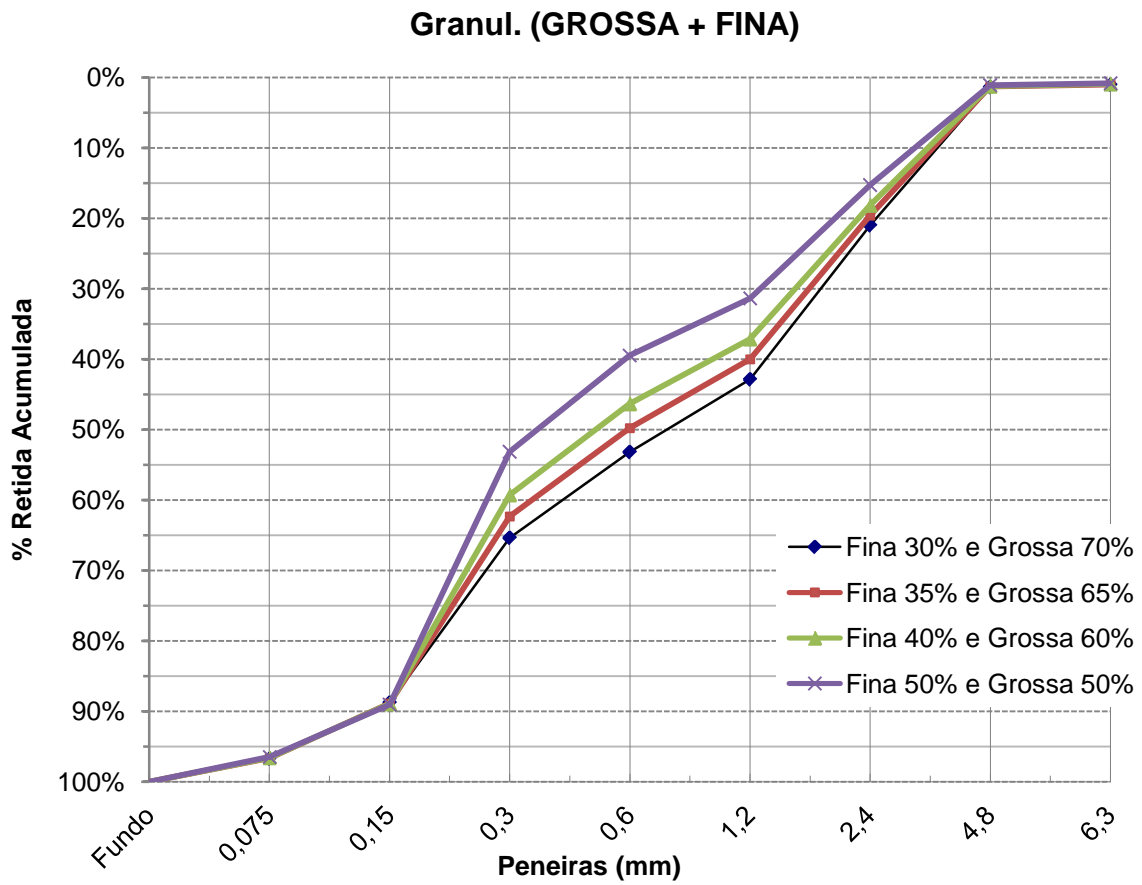


Figura A 2 – Proporções de mistura das duas areias (Grossa e Fina) analisadas nesta pesquisa.

3) **AGLOMERANTE UTILIZADO NO PROJETO EXPERIMENTAL I, II E ESTUDO DE CAMPO)**

CIMENTO CP IV – RS – 32 (TOCANTINS)

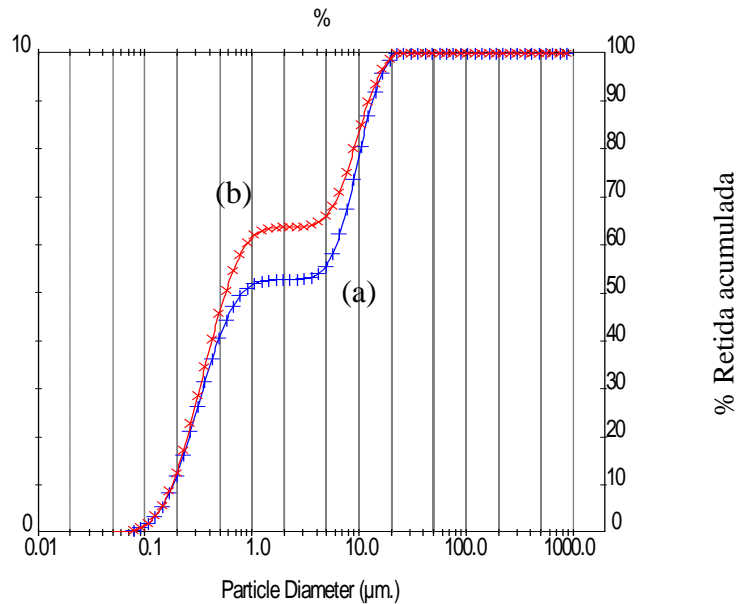


Figura A 3 – Curva granulométrica do cimento. Curva (a) sem ultrassom, (b) com ultrassom.

Pela configuração da curva (b), percebe-se que o cimento apresenta um grau de uniformidade elevado, ou seja, mostra um percentual de partículas mal distribuído ao longo das várias dimensões.

Pode-se observar que 100% dos grãos de cimento são menores que $20 \mu\text{m}$, sendo 80% menores que $10 \mu\text{m}$, correspondendo a um cimento bem fino.

ANEXO B – RESULTADOS DOS ENSAIOS (PROJETO EXPERIMENTAL I E II)

Gráficos mostrando-se as proporções de mistura nos traços desenvolvidos no Projeto Experimental II.

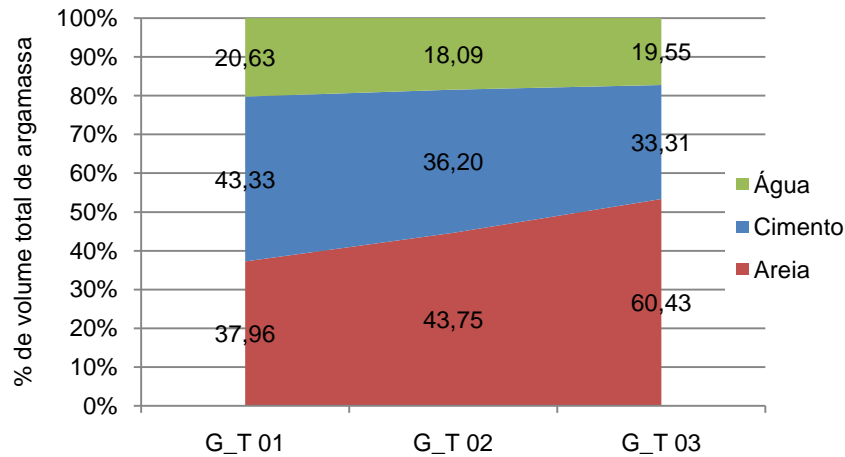


Figura B. 1 – Proporção dos materiais na série AG1.

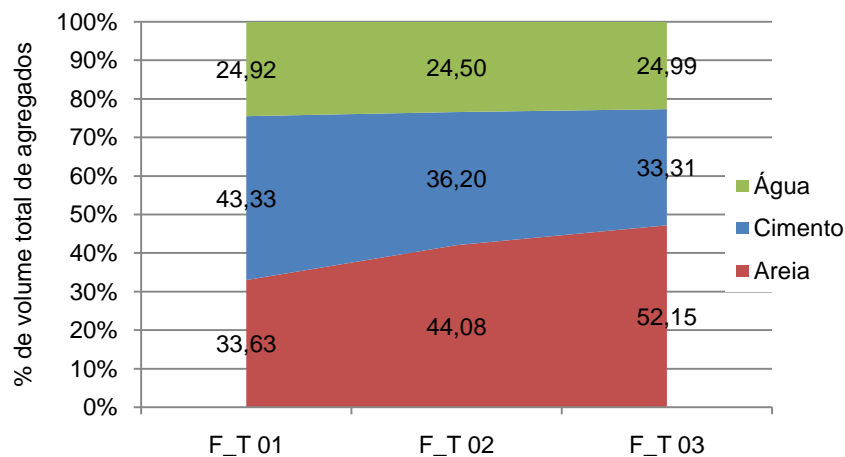


Figura B. 2 – Proporção dos materiais na série AF1.

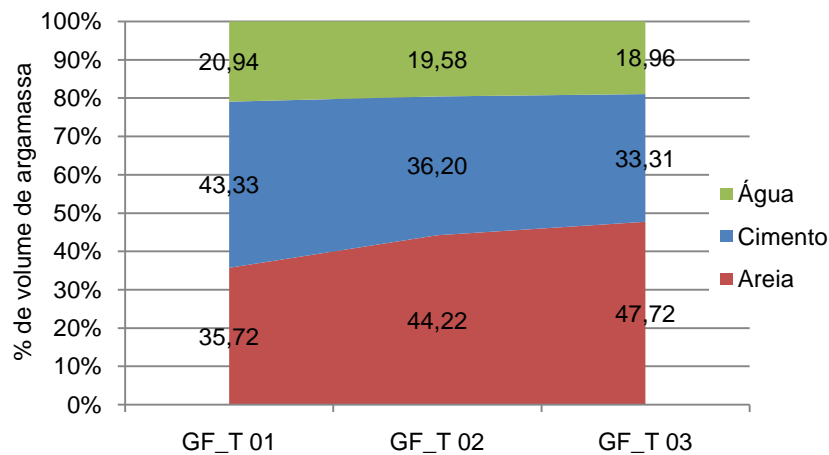


Figura B. 3 – Proporção dos materiais na série AGF1.

1) **RETENÇÃO DE ÁGUA**

Tabela B 1 – Resultados do ensaio de retenção de água nas argamassas dosadas.

Traço	mw	m	AF	Tempo	ma	ms	mv	Ra
G_T 01	3,138	12,364	0,202	1 min	2642,1	2618,1	1322,4	91,02
				15 min		2582,5		77,69
G_T 02	2,425	10,715	0,185	1 min	2584,6	2558,5	1322,7	88,79
				15 min		2526,4		75,01
G_T 03	2,406	11,540	0,173	1 min	2564,2	2541,8	1321,5	89,55
				15 min		2506,7		73,18
F_T 01	2,300	7,104	0,245	1 min	2622,5	2591,1	1323,5	90,12
				15 min		2556,2		79,13
F_T 02	2,707	8,870	0,234	1 min	2559,7	2525,0	1323,7	87,99
				15 min		2493,9		77,24
F_T 03	3,001	10,262	0,226	1 min	2569,8	2532,9	1322,1	86,93
				15 min		2504,4		76,84
M_T 01	3,187	12,032	0,209	1 min	2630,4	2608,4	1323,9	91,96
				15 min		2573,0		79,02
M_T 02	2,930	12,032	0,196	1 min	2644,6	2618,8	1323,1	90,03
				15 min		2583,3		76,31
M_T 03	2,815	12,032	0,190	1 min	2665,3	2644,0	1323,3	91,63
				15 min		2608,7		77,76

2) **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL**

Tabela B 2 – Resultados da resistência à compressão axial para c.p.s prismáticos.

Tipo de Areia	Corpos-de-prova prismáticos (4x4x16 cm)						
	Traço	CP	Fc (N)	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AG1	G_T 01	1	74.922,81	46,83	45,5	1,1	2,6%
		1	63.939,36	39,96*			
		2	73.746,01	46,09			
		2	71.490,48	44,68			
		3	70.411,75	44,01			
		3	73.647,94	46,03			
	G_T 02	1	63.056,76	39,41	39,2	0,4	1,1%
		1	62.272,23	38,92			
		2	63.449,03	39,66			
		2	61.781,90	38,61			
		3	47.954,52	29,97*			
		3	62.860,63	39,29			
	G_T 03	1	55.799,84	34,87	34,8	0,7	2,0%
		1	56.486,30	35,30			
		2	55.701,77	34,81			
		2	53.544,31	33,47			
		3	55.995,97	35,00			
		3	56.682,44	35,43			
AF1	F_T 01	1	59.722,50	37,33	39,3	1,6	4,0%
		1	61.781,90	38,61			
		2	62.468,36	39,04			
		2	62.566,43	39,10			
		3	63.154,83	39,47			
		3	67.371,69	42,11			
	F_T 02	1	44.914,46	28,07	29,1	1,1	3,9%
		1	45.600,92	28,50			
		2	44.326,06	27,70			
		2	48.052,59	30,03			
		3	48.739,05	30,46			
		3	47.464,19	29,67			
	F_T 03	1	35.107,81	21,94	22,3	2,5	11,2%
		1	35.745,24	24,82			
		2	32.754,21	20,47			
2		29.616,08	18,51				
3		37.559,47	23,47				
3		39.520,80	24,70				
AGF1	GF_T 01	1	69.333,02	43,33	43,2	1,1	2,5%
		1	70.509,81	44,07			
		2	65.802,62	41,13			
		2	69.431,08	43,39			
		3	70.313,68	43,95			
	3	69.234,95	43,27				
	GF_T 02	1	55.113,37	34,45	35,1	1,5	4,1%
		1	56.094,04	35,06			
		2	57.388,52	32,61			
		2	58.643,77	36,65			
3		57.761,17	36,10				
3	57.270,84	35,79					

Tipo de Areia	Corpos-de-prova prismáticos (4x4x16 cm)						
	Traço	CP	Fc (N)	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AGF1	GF_T 03	1	57.565,04	35,98	35,0	1,3	3,7%
		1	55.995,97	35,00			
		2	57.172,77	35,73			
		2	56.682,44	35,43			
		3	56.584,37	35,37			
		3	51.877,18	32,42			

Tabela B 3 – Resultados da resistência à compressão axial para c.p.s cilíndricos.

Tipo de Areia	Corpos-de-prova cilíndrico (5x10 cm)						
	Traço	CP	Fc (N)	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AG1	G_T 01	4	5220	26,0	23,0	2,9	12,5%
		5	5240	26,1			
		1	4420	21,9			
		2	4120	20,6			
		3	4040	20,3			
		4	5000	24,9			
	G_T 02	5	4780	23,9	25,1	1,9	7,4%
		1	3500	17,5*			
		2	5580	27,9			
		3	4780	24,0			
		1	4700	23,5			
		2	4100	20,5			
	G_T 03	1	4500	22,5	22,3	1,3	5,8%
		2	4550	22,8			
		3	3390	16,9*			
		4	5220	26,0			
		5	5240	26,1			
		1	4420	21,9			
AF1	F_T 01	3	5360	26,8*	39,0	2,7	7,0%
		4	6990	34,9			
		5	8010	40,0			
		6	8170	40,8			
		7	8030	40,1			
	F_T 02	3	4760	23,8	25,5	2,3	9,1%
		4	5020	25,1			
		5	5770	28,8			
		6	4840	24,2			
		7	6930	34,6*			
	F_T 03	3	3960	19,8	22,8	2,0	8,8%
		4	4350	21,7			
		5	4740	23,7			
		6	4800	24,0			
7		4950	24,7				
AGF1	GF_T 01	3	7475	37,3	39,8	2,6	6,6%
		4	7620	38,1			
		5	8200	41,0			
		6	6800	34,0*			
		7	8610	43,0			

Tipo de Areia	Corpos-de-prova cilíndrico (5x10 cm)						
	Traço	CP	Fc (N)	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AGF1	GF_T 02	3	5350	26,7*	35,9	1,5	4,2%
		4	6750	33,7			
		5	7340	36,7			
		6	7440	37,2			
		7	7220	36,1			
	M_T 03	3	5753	28,7*	35,0	1,2	3,4%
		4	6720	33,6			
		5	6900	34,5			
		6	7210	36,0			
		7	7190	35,9			

3) RESISTÊNCIA À TRACÃO NA FLEXÃO

Tabela B 4 – Resultados da resistência à tração na flexão para c.p.s prismáticos (4x4x16 cm).

Série	Traço	CP	Ft (N)	Rf (Mpa)	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_T01	1	1990,75	4,54	4,3	0,2	5,5%
		2	1873,07	4,27			
		3	1784,81	4,07			
	G_T02	1	1873,07	4,27	4,5	0,4	8,6%
		2	2167,27	4,94			
		3	1873,07	4,27			
	G_T03	1	1618,10	3,69	3,6	0,1	2,1%
		2	1784,81	4,07			
		3	1569,06	3,58			
AF1	F_T01	1	1382,74	3,15*	4,1	0,2	4,6%
		2	1765,20	4,02			
		3	1873,07	4,27			
	F_T02	1	1578,87	3,60*	4,2	0,3	6,4%
		2	1902,49	4,34			
		3	1745,58	3,98			
	F_T03	1	1569,06	3,58	3,7	0,2	5,8%
		2	1716,16	3,91			
		3	2098,62	4,78*			
AGF1	GF_T01	1	1618,10	3,69	4,9	0,0	1,1%
		2	2118,24	4,83			
		3	2147,66	4,90			
	GF_T02	1	1784,81	4,07	4,1	0,1	1,4%
		2	1824,04	4,16			
		3	2255,53	5,14			
	GF_T03	1	1902,49	4,34	4,7	0,5	9,3%
		2	2186,88	4,98			
		3	2412,44	5,50			

4) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela B 5 – Resultados da resistência à tração na flexão para c.p.s prismáticos (4x4x16 cm).

Série	Traço	CP	F (kN)	$f_{t,D}$ (MPa)	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_T01	1	35.618	4,56	4,65	0,1	2,9%
		2	37.069	4,75			
	G_T02	1	32.558	4,16	4,13	0,0	1,0%
		2	32.068	4,10			
	G_T03	1	36.971	4,69	4,73	0,1	1,1%
		2	37.069	4,76			
AF1	F_T01	1	31.577	4,02	4,5	0,7	15,3%
		2	39.129	5,00			
	F_T02	1	29.322	3,75	3,7	0,1	3,0%
		2	28.243	3,60			
	F_T03	1	24.222	3,11	3,2	0,1	4,5%
		2	25.791	3,32			
AGF1	GF_T01	1	38.540	4,81	4,9	0,1	1,3%
		2	38.736	4,91			
	GF_T02	1	30.008	3,79	4,0	0,3	7,3%
		2	33.146	4,20			
	GF_T03	1	32.166	4,10	4,1	0,1	1,4%
		2	31.479	4,02			

5) MÓDULO DE ELASTICIDADE

Tabela B 6 – Módulo de elasticidade para as argamassas dosadas no Programa Experimental I.

Tipo de areia	Traço	CP	σ_a (MPa) 100kgf	σ_b (MPa)	ΔL_a (0,001mm)		ϵ_a		ΔL_b (0,001mm)		ϵ_b		E_{ci} (GPa)	MÉDIA (GPa)	Sd (Mpa)	CV (%)
					T.E	T.D	T.E	T.D	T.E	T.D	T.E	T.D				
AG1	G_T01	3	0,50	7,80	0,004	0,001	0,0009	0,0001	0,022	0,029	0,0044	0,0059	1,58	1,7	0,1	8,4%
		4	0,50	7,85	0,001	0,002	0,0001	0,0005	0,008	0,035	0,0017	0,0069	1,84			
		5	0,50	7,88	0,002	0,003	0,0003	0,0006	0,017	0,034	0,0034	0,0067	1,62			
	G_T02	3	0,50	7,18	0,004	0,001	0,0007	0,0001	0,025	0,021	0,0050	0,0042	1,61	1,5	0,1	5,6%
		4	0,50	7,16	0,002	0,003	0,0005	0,0006	0,016	0,033	0,0033	0,0065	1,53			
		5	0,50	7,19	0,004	0,002	0,0007	0,0005	0,019	0,033	0,0038	0,0067	1,44			
	G_T03	3	0,50	6,16	0,002	0,002	0,0004	0,0004	0,014	0,021	0,0028	0,0043	1,81	1,6	0,1	9,0%
		4	0,50	6,16	0,005	0,000	0,0011	0,0000	0,021	0,022	0,0041	0,0044	1,52			
		5	0,50	6,14	0,001	0,002	0,0003	0,0005	0,012	0,026	0,0025	0,0052	1,62			
AF1	F_T01	3	0,50	10,47	0,009	0,002	0,0018	0,0004	0,042	0,039	0,0084	0,0078	1,42	1,4	0,0	2,4%
		4	0,50	10,47	0,006	0,004	0,0012	0,0008	0,036	0,047	0,0072	0,0094	1,37			
		5	0,50	10,47	0,012	0,000	0,0024	0,0000	0,049	0,036	0,0098	0,0072	1,37			
	F_T02	3	0,50	7,52	0,003	0,003	0,0006	0,0006	0,021	0,038	0,0042	0,0076	1,32	1,3	0,1	9,2%
		4	0,50	7,52	0,006	0,008	0,0012	0,0016	0,025	0,048	0,0050	0,0096	1,19			
		5	0,50	7,52	0,003	0,003	0,0006	0,0006	0,024	0,031	0,0048	0,0062	1,43			
	F_T03	3	0,50	7,49	0,003	0,002	0,0006	0,0004	0,032	0,025	0,0064	0,0050	1,34	1,4	0,0	2,3%
		4	0,50	7,49	0,007	0,004	0,0014	0,0008	0,037	0,026	0,0074	0,0052	1,34			
		5	0,50	7,49	0,008	0,001	0,0016	0,0002	0,028	0,031	0,0056	0,0062	1,40			
AGF1	GF_T01	3	0,50	11,42	0,004	0,000	0,0008	0,0000	0,024	0,024	0,0048	0,0048	2,48	2,2	0,2	9,9%
		4	0,50	11,42	0,003	0,004	0,0006	0,0008	0,022	0,037	0,0044	0,0074	2,10			
		5	0,50	11,42	0,003	0,005	0,0006	0,0010	0,021	0,039	0,0042	0,0078	2,10			
	GF_T02	3	0,50	10,11	0,005	0,002	0,0010	0,0004	0,025	0,032	0,0050	0,0064	1,92	2,1	0,1	6,7%
		4	0,50	10,11	0,003	0,003	0,0006	0,0006	0,014	0,036	0,0028	0,0072	2,19			
		5	0,50	10,11	0,005	0,006	0,0010	0,0012	0,025	0,031	0,0050	0,0062	2,14			
	GF_T03	3	0,50	10,07	0,003	0,003	0,0006	0,0006	0,027	0,029	0,0054	0,0058	1,91	2,0	0,1	5,7%
		4	0,50	10,07	0,004	0,004	0,0008	0,0008	0,021	0,036	0,0042	0,0072	1,95			
		5	0,50	10,07	0,006	0,001	0,0012	0,0002	0,033	0,019	0,0066	0,0038	2,13			

Diagrama de Dosagem do Projeto Experimental II

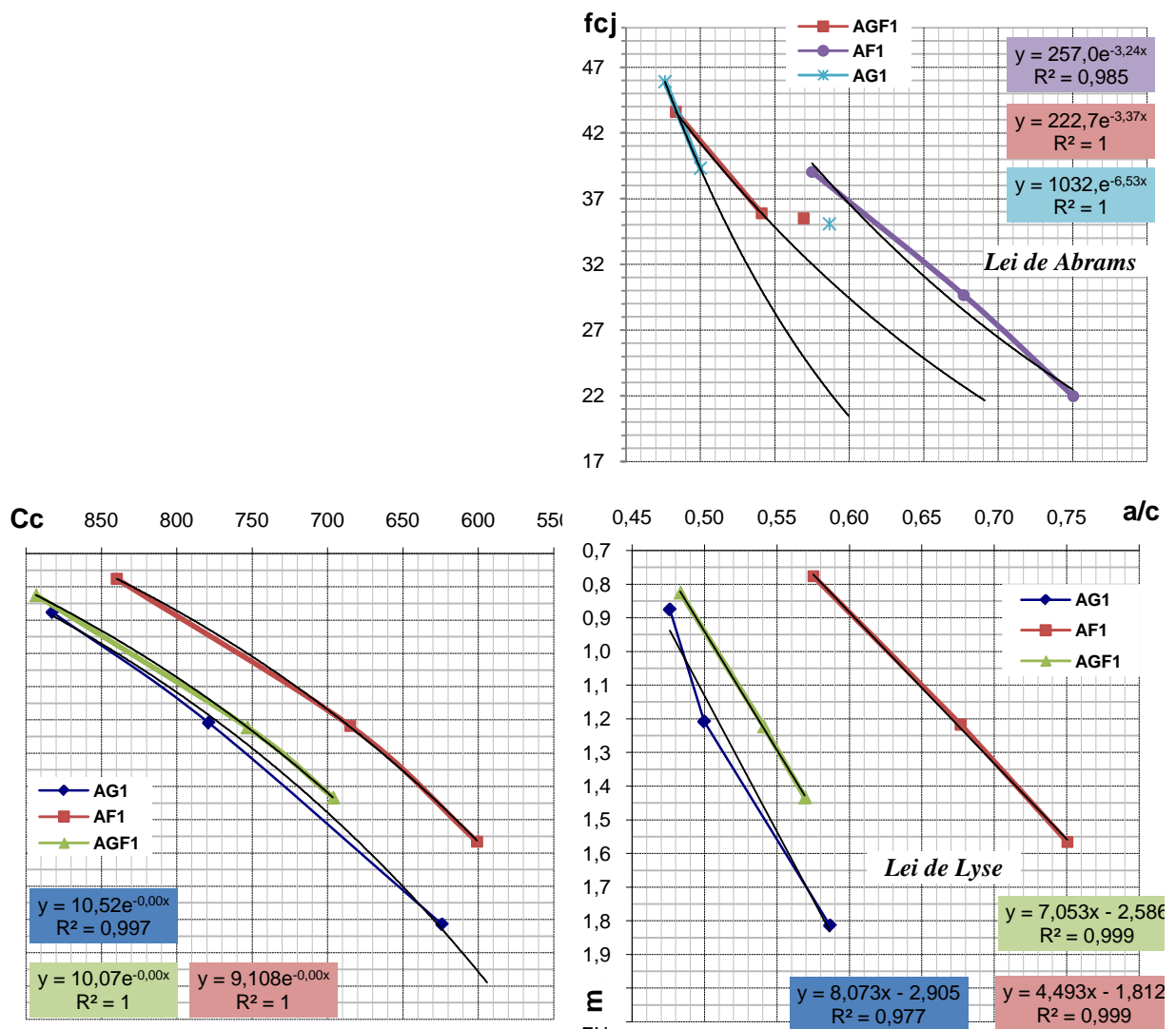


Figura B. 4 – Diagrama de Dosagem obtido através do programa experimental.

ANEXO C- ESTUDO DE CAMPO

Na Figura C. 1 estão demonstradas as etapas para a obtenção de prismas (4 x 4 x 16 cm) a partir do corte de corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20 cm).

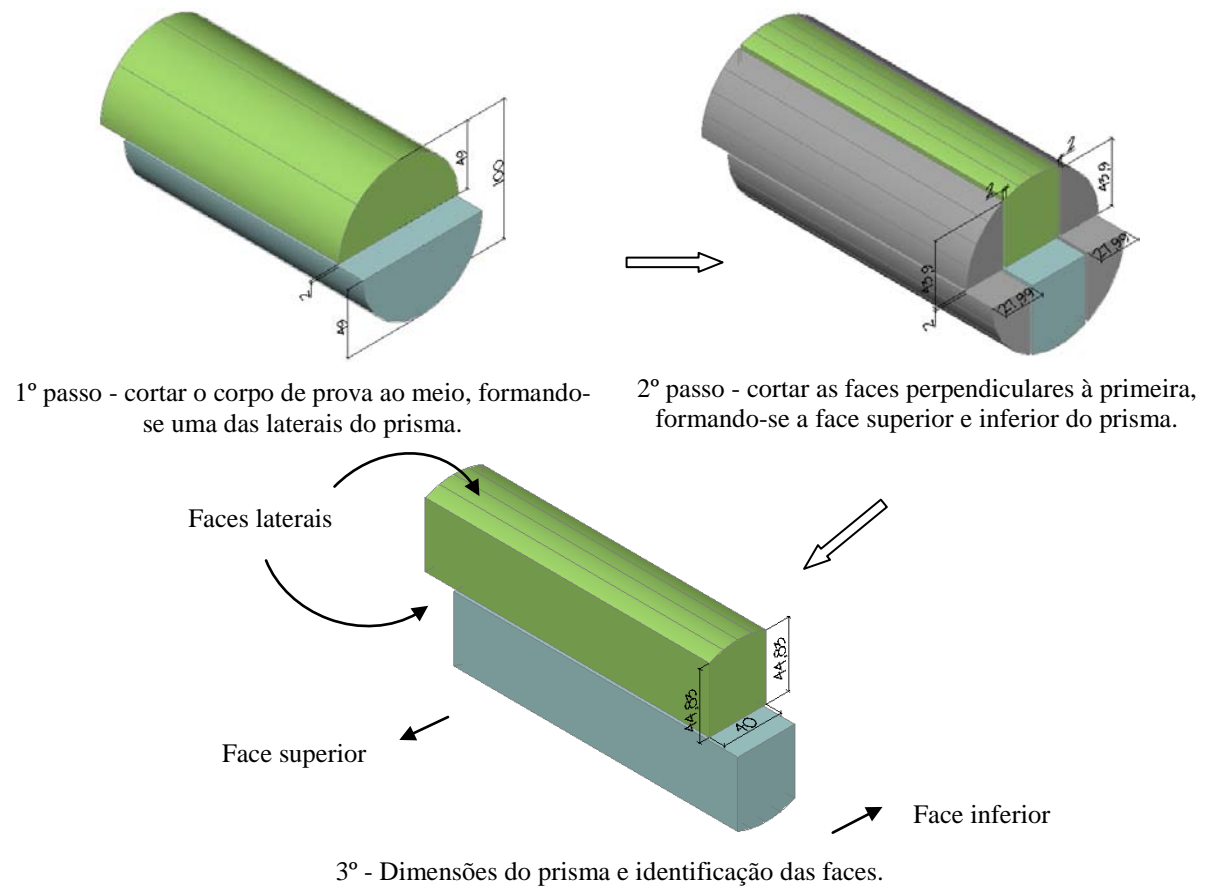


Figura C. 1 – Processo de aquisição dos c.p.s prismáticos e suas dimensões em milímetros.

Este processo foi executado para os corpos-de-prova moldados para as três séries pesquisadas.

A Figura C. 2 mostra algumas fotos do processo realizado para a obtenção dos cps prismáticos (4x4x16) a partir de corpos-de-prova cilíndricos (10x20).



(a)



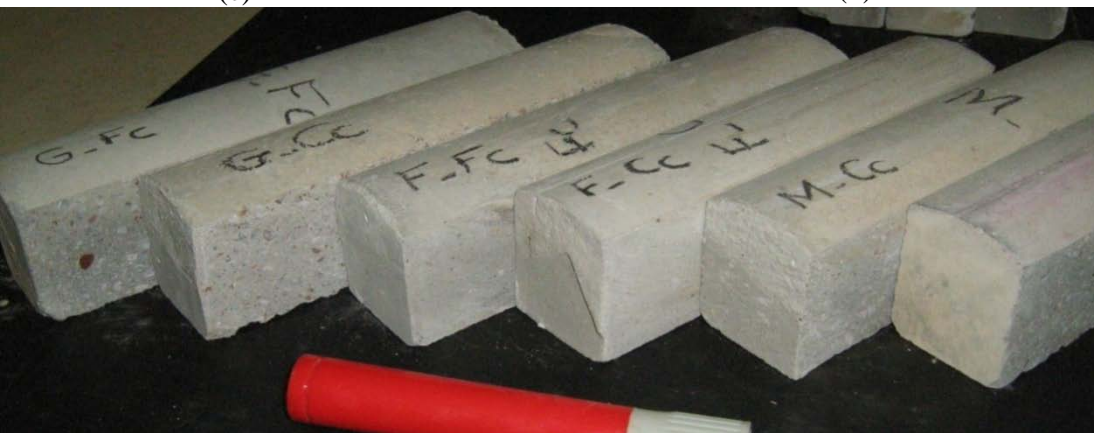
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura C. 2– Etapas para o preparo dos c.p.s prismáticos: (a) serra poliacorte utilizada no corte das peças, (b) primeiramente o c.p. foi partido ao meio, (c) e (d) foram cortados as duas faces adjacentes e perpendiculares à primeira face, descartando os dois excessos laterais, (e) formato final dos c.p.s.

1) **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL**

Tabela C 1 – Resultados da resistência à compressão axial para c.p.s prismáticos cortados (4x4,5x20 cm).

Tipo de Areia	Corpos-de-prova prismáticos (4x4x16 cm)						
	Traço	CP	Fc (N)	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AG1	G_C600	1	35.696,21	22,31	20,0	2,0	10,2%
		1	35.598,14	22,25			
		2	29.321,88	18,33			
		2	29.321,88	18,33			
		3	34.813,61	21,76			
		3	38.442,07	24,03			
		4	28.831,55	18,02			
		4	29.910,28	18,69			
	G_F30	1	46679,65	29,17	32,5	3,9	11,9%
		1	55799,84	34,87			
		2	50798,45	31,75			
		2	44326,06	27,70			
		3	61291,56	38,31			
		3	53544,31	33,47			
4		35696,21	22,31*				
4		31283,21	19,55*				
AF1	F_C600	1	35.598,14	22,25	19,5	3,8	19,7%
		1	37.069,14	23,17			
		2	38.834,33	24,27			
		2	25.203,09	15,75			
		3	33.440,68	20,90			
		3	31.185,15	19,49			
		4	25.301,16	15,81			
		4	22.555,30	14,10			
	F_F30	1	47268,05	29,54	27,0	2,2	8,3%
		1	39226,60	24,52			
		2	42364,73	26,48			
		2	56094,04	35,06*			
		3	47562,25	29,73			
		3	43051,19	26,91			
4		34519,41	21,57*				
4		47954,52	29,97				
AGF1	GF_C600	1	33.734,88	21,08	22,4	3,4	15,2%
		1	28.831,55	18,02			
		2	40.207,27	25,13			
		2	31.283,21	19,55			
		3	42.953,13	26,85			
		3	37.853,67	23,66			
		4	-	-			
		4	-	-			
	GF_F30	1	32656,14	20,41	24,5	2,9	11,7%
		1	40011,13	25,01			
		2	41580,20	25,99			
		2	42266,66	26,42			
		3	49033,25	30,65			
		3	42560,86	26,60			
4		32656,14	20,41				

Tabela C 2 – Resultados da resistência à compressão axial para c.p.s prismáticos moldado (4x4x16 cm).

Tipo de Areia	Corpos-de-prova prismáticos (4x4x16 cm)						
	Traço	CP	Fc (N)	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AG1	G_C600	-	-	-	-	-	-
	G_F30	-	-	-	-	-	-
AF1	F_C600	1	36.873,00	23,05	22,8	0,6	2,5%
		1	35.402,01	22,13			
		2	36.382,67	22,74			
		2	46.189,32	28,87*			
		3	23.143,69	14,46*			
		3	37.559,47	23,47			
	F_F30	1	37363,34	23,35	17,3	4,6	26,7%
		1	31871,61	19,92			
		2	28047,02	17,53			
		2	14121,58	8,83*			
3	21182,36	13,24					
3	19711,37	12,32					
AGF1	GF_C600	1	51.582,98	32,24	28,2	2,4	8,5%
		1	43.933,79	27,46			
		2	41.972,46	26,23			
		2	45.110,59	28,19			
		3	42.756,99	26,72			
		3	34.813,61	21,76*			
	GF_F30	1	33048,41	20,66*	26,0	2,2	8,3%
		1	40697,60	25,44			
		2	40011,13	25,01			
		2	37069,14	23,17			
3	45502,86	28,44					
3	44522,19	27,83					

Tabela C 3 – Resultados da resistência à compressão axial para c.p.s cilíndricos.

Tipo de Areia	Corpos-de-prova cilíndrico (5x10 cm)						
	Traço	CP	Fc (N)	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AG1	G_C600	-	-	-	-	-	-
	G_F30	-	-	-	-	-	-
AF1	F_C600	-	-	-	-	-	-
	F_F30	1	5360	26,6	30,87	3,9	12,6%
		2	6990	34,4			
		3	6800	34,0			
		4	7470	37,3*			
		5	4540	22,7*			
		6	5700	28,6			
AGF1	GF_C600	-	-	-	-	-	-
	GF_F30	1	4250	21,2	24,95	4,7	18,7%
		2	6250	31,2			
		3	4650	23,2			
		4	4030	20,1			
		5	6060	30,3			
		6	4730	23,6			
		7	3360	16,8			

Tabela C 4 – Resultados da resistência à compressão axial para c.p.s cilíndricos.

Tipo de Areia	Corpos-de-prova cilíndrico (10 x 20 cm)						
	Traço	CP	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Sd (Mpa)	CV(%)
AG1	G_C600	1	19770	24,4	25,49	1,5	5,8%
		2	20290	24,9			
		3	21330	27,2			
	G_F30	1	25390	29,6*	43,12	2,006	5,2%
		2	34410	41,7			
		3	36390	44,5			
AF1	F_C600	1	23690	30,0	27,60	2,8	10,0%
		2	22200	28,2			
		3	20170	24,6			
	F_F30	1	32210	43,2	42,08	1,6	4,2%
		2	33340	41,0			
		3	22140	26,8			
AGF1	GF_C600	1	29720	37,8	36,56	1,3	3,6%
		2	30250	36,7			
		3	29090	35,2			
	GF_F30	1	33450	40,4	38,42	2,5	6,6%
		2	31880	39,3			
		3	28990	35,6			

2) RESISTÊNCIA À TRACÃO NA FLEXÃO

Tabela C 5 – Resultados da resistência à tração na flexão para c.p.s prismáticos cortados (4x4,5x20 cm).

Tipo de Areia	Traço	CP	Ft (N)	Rf (Mpa)	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_C600	1	2726,249	6,21	6,1	0,1	1,2%
		2	2677,215	6,10			
		3	2667,409	6,08			
		4	2177,076	4,96*			
	G_F30	1	3000,835	6,84	6,9	0,7	10,5%
		2	3657,880	8,34*			
		3	2981,222	6,80			
		4	2441,856	5,57			
AF1	F_C600	1	2137,850	4,87*	6,7	0,8	12,2%
		2	2716,442	6,19			
		3	3353,874	7,64			
		4	2745,862	6,26			
	F_F30	1	2588,956	5,90	6,1	0,6	10,3%
		2	2991,028	6,82			
		3	3265,614	7,44*			
		4	2461,469	5,61			
AGF1	GF_C600	1	3089,095	7,04	6,5	0,5	7,1%
		2	2736,055	6,24			
		3	2736,055	6,24			
		4	-	-			
	GF_F30	1	2883,155	6,57	7,1	0,7	9,3%
		2	3393,101	7,73			
		3	3373,488	7,69			
		4	2873,348	6,55			

Tabela C 6 – Resultados da resistência à tração na flexão para c.p.s prismáticos moldados (4x4x16 cm).

Tipo de Areia	Traço	CP	Ft (N)	Rf (Mpa)	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
AG1	G_C600	-	-	-	-	-	-
	G_F30	-	-	-	-	-	-
AF1	F_C600	1	2147,66	4,90	4,7	0,2	4,7%
		2	1961,33	4,47			
		3	2098,62	4,78			
	F_F30	1	1853,46	4,22*	5,7	0,2	3,1%
		2	2432,05	5,54			
		3	2539,92	5,79			
AGF1	GF_C600	1	2392,823	5,45	5,2	0,3	4,9%
		2	2167,270	4,94			
		3	2284,949	5,21			
	GF_F30	1	2647,796	6,04	6,4	0,3	4,6%
		2	2892,962	6,59			
		3	2834,122	6,46			

3) MÓDULO DE ELASTICIDADE

Tabela C 7 – Módulo de elasticidade para as argamassas dosadas no Programa Experimental I.

Tipo de areia	Traço	CP	σ_a (MPa) 100kgf	σ_b (MPa)	ΔL_a (0,001mm)		ϵ_a		ΔL_b (0,001mm)		ϵ_b		E_{ci} (GPa)	MÉDIA (GPa)	Sd (Mpa)	CV (%)
					T.E	T.D	T.E	T.D	T.E	T.D	T.E	T.D				
AG1	G_C600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	G_F30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AF1	F_C600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F_F30	3	0,50	10,47	0,009	0,002	0,0018	0,0004	0,042	0,039	0,0084	0,0078	1,42	1,39	0,0	2,4%
		4	0,50	10,47	0,006	0,004	0,0012	0,0008	0,036	0,047	0,0072	0,0094	1,37			
5	0,50	10,47	0,012	0,000	0,0024	0,0000	0,049	0,036	0,0098	0,0072	1,37					
AGF1	GF_C600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	GF_F30	3	0,50	9,36	0,004	0,004	0,0008	0,0008	0,022	0,038	0,0044	0,0076	1,70	1,69	0,1	1,69
		4	0,50	9,36	0,000	0,011	0,0000	0,0022	0,004	0,063	0,0008	0,0126	1,58			
5	0,50	9,36	0,007	0,001	0,0014	0,0002	0,033	0,025	0,0066	0,0050	1,77					