



ELIÉZER LAISTER

**INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE CIMENTO E DA
RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO EM ARGAMASSAS
PARA A EXECUÇÃO DE ESTACA RAIZ**

**CAMPINAS
2012**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

ELIÉZER LAISTER

INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE CIMENTO E DA
RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO EM ARGAMASSAS
PARA A EXECUÇÃO DE ESTACA RAIZ

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração de Geotecnia.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ELIÉZER LAISTER ORIENTADO PELO PROF. DR. PAULO JOSÉ ROCHA DE ALBUQUERQUE.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

Laister, Eliézer

L146i Influência do consumo de cimento e da relação
água/cimento em argamassas para a execução de estaca
raiz / Eliézer Laister. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Paulo José Rocha de Albuquerque.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Argamassa. 2. Estacas de concreto. 3. Materiais de
construção. 4. Mecânica do solo. 5. Estacas (Engenharia
civil). I. Albuquerque, Paulo José Rocha de, 1964. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Influence of consumption of cement and of the
water/cement ratio in mortars to produce root piles.

Palavras-chave em Inglês: Mortar, Concrete piles, Construction Materials,
Soil Mechanics, Piles (Civil engineering).

Área de concentração: Geotecnia

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Gladis Camarini, George Paula Bernardes

Data da defesa: 24-08-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE CIMENTO E DA RELAÇÃO
ÁGUA/CIMENTO EM ARGAMASSAS PARA EXECUÇÃO DE
ESTACA RAIZ**

Eliézer Laister

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque
Presidente e Orientador – FEC/UNICAMP**



**Prof. Dra. Gladis Camarini
FEC - UNICAMP**



**Prof. Dr. George Paula Bernardes
UNESP**

Campinas, 24 de agosto de 2012.

Ao meu filho amado Pedro Henrique

Agradecimentos

A Deus pela vida, e por ter me guiado nesta trajetória.

À minha mãe, Olga Cherenka Laister, por sempre me incentivar nos estudos.

Ao meu pai, Silas Laister (in-memoriam), que abriu mão dos seus sonhos pelos desejos dos filhos. Obrigado pelo rico exemplo de vida e definição de prioridades.

Às minhas irmãs que sempre estiveram ao meu lado.

À minha esposa Ana Paula, pela compreensão nos momentos ausente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque, obrigado pela confiança, paciência, dedicação e orientação. Seus conselhos foram fundamentais, os quais levarei para o resto da vida.

À Profa. Dra. Gladis Camarini, obrigado pela confiança, pelas valorosas sugestões e seus conhecimentos transmitidos em suas disciplinas do programa de pós-graduação, agradeço também por ter aceitado compor a banca examinadora.

Ao Prof. Dr. David de Carvalho, muito obrigado pelo incentivo e sugestões dadas na banca de qualificação.

À Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), pela oportunidade de estudar na instituição.

A todos da Secretaria de Pós-Graduação da FEC/UNICAMP.

Às empresas Votorantim Cimentos e Sika, pela doação dos materiais.

À FUNDESP pela execução das estacas.

Às empresas Embrageo e Wyde, por permitirem a coleta das argamassas em campo.

Aos amigos da Votorantim Cimentos, Placido Francisco Gonçalves da Silva, Paulo Sérgio Mendes, Fernando de Carvalho Lima, Luciano Souza Nascimento, Adilson dos Santos, João Batista Viana Melo, Leandro Augusto Camargo Dias, Andreia Cristina Bento dos Santos, Patricia dos Santos Araújo, Evandro Thome e Maria Walesko pelo auxílio nos ensaios.

À Bernadete dos Anjos Lourenço e Jane Honda pelos ensaios na Sika.

Ao Prof Dr. José Antonio de Milito, da Faculdade de Engenharia de Sorocaba, pela liberação do equipamento de extração de corpos de prova.

Aos amigos Eng. Bruno Thome, Eng^a. Karina Hannel Carelli e Eng. Alexandre Vaz de Lima, pela ajuda nos ensaios de campo.

Aos meus antigos gestores da Votorantim Cimentos, Marco Aurélio Monteiro e Eng. Roberto Rodrigues, pela ajuda e incentivo.

Ao Prof. Thiago Tadeu F. de Oliveira, professor de língua portuguesa na ETEC Fernando Prestes, pela revisão do texto.

Enfim, a todos que contribuíram para esse trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“O Senhor é o meu pastor; nada me faltará.” Salmos 23:1.

RESUMO

LAISTER, Eliézer. **Influência do consumo de cimento e da relação água/cimento em argamassas para execução de estaca raiz.** Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2012, 168 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2012.

Para a confecção de argamassa para o preenchimento da estaca raiz, a norma vigente, NBR 6122/2010 recomenda uma resistência mínima de 20 MPa, consumo mínimo de cimento de 600 kg/m³, e relação A/C entre 0,5 a 0,6, porém a determinação de consumo mínimo de cimento é um tema polêmico quanto à garantia de durabilidade, no entanto, nessas condições, com um consumo de cimento nesse patamar, ter-se-á resistência à compressão axial acima dos 20 MPa exigidos por norma sem grande tecnologia para a confecção de argamassas. A presente pesquisa estudou a influência do consumo de cimento e da relação A/C por meio de ensaios de absorção capilar, avaliando seu desempenho para condições de consumo de cimento menor do que 600 kg/m³. Identificou-se que além do consumo de cimento e relação A/C, a distribuição granulométrica tem influência na absorção capilar, e que é possível obter argamassas com baixa absorção e consumos menores que 600 kg/m³, através do controle da distribuição granulométrica global e utilização de aditivos para o controle da relação A/C. A presente pesquisa também recomenda a utilização do mini slump em campo para o controle da exsudação das argamassas.

Palavras Chave: Argamassa, estaca raiz, absorção capilar, materiais para construção, geotecnia.

ABSTRACT

LAISTER, Eliézer. **Influence of consumption of cement and of the water / cement ratio in mortars to produce root piles.** Faculty of Civil Engineering – UNICAMP, 2012, 168 p. Master's Dissertation – Faculty of Civil Engineering, Architecture and Urbanism – UNICAMP, 2012.

The standard in force (NBR 6122/2010) for preparation of mortar to fill root piles recommends minimum resistance of 20MPa, minimum consumption of cement of 600 kg/m³, and W/C ratio between 0.5 and 0.6. However, determining the minimum consumption of cement to ensure durability is a controversial topic. Under these conditions, with a consumption of cement at this level, we will get resistance to axial compression above 20MPa as required by a standard without top technology to produce mortars. The present research reviewed the influence of consumption of cement and the W/C ratio by means of capillary absorption tests, and assessed their performance under conditions of consumption of amounts of cement smaller than 600 kg/m³. It was observed that, besides consumption of cement and the W/C ratio, the granulometric distribution also impacts capillary absorption and it is possible to get mortars with low absorption and consumptions below 600 kg/m³ through control of the global granulometric distribution and use of additives to control the W/C ratio. The present research also recommends the use of mini slumps on the field to control mortar exudation.

Key words: Mortar, root pile, capillary absorption, building materials, geotechnics.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS.....	20
LISTA DE SÍMBOLOS.....	23
1. INTRODUÇÃO.....	25
1.1 Objetivo	25
1.2 Justificativa	25
1.3 Delimitações.....	27
1.4 Metodologia	28
1.5 Estrutura do Trabalho	30
2. Evolução das Construções	33
2.1 História das Fundações no Brasil.....	38
2.2 Concreto como Material de Fundação	39
3. DURABILIDADE.....	41
3.1 Reações Químicas Deletérias à Pasta de Cimento	45
3.2 Permeabilidade	49
3.3 Absorção Capilar do Concreto	57
3.4 Requisitos de Durabilidade	61
3.5 Agressividade dos Solos.....	72
3.6 Fatores Mitigadores para o Ataque por Fontes de Sulfatos	76
3.7 Patologia das Fundações.....	80
3.8 Qualidade dos Materiais	84
4. ESTACA RAIZ	87

4.1 Histórico	87
4.2 Método de Execução	93
4.3. Argamassa para o Preenchimento de Estaca Raiz.....	98
4.4 Dosagem das Argamassas	105
4.5 Reologia das Argamassas	107
5. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.....	113
5.1 Primeira etapa: Estudo no Campo Experimental da Unicamp.	114
5.1.1 Composição da Argamassa Convencional	114
5.1.2 Composição da Argamassa Industrializada.....	116
5.2. Segunda etapa da pesquisa: Comparativo entre argamassas convencionais e industrializadas	118
5.2.1 Argamassa para Estaca Raiz Coletada em Campo.....	118
5.2.2 Argamassa Industrializada Tipo “Grout” (Moldada em Laboratório)	121
5.3 Terceira etapa da pesquisa: Estudo da influência do consumo de cimento na reologia da argamassa.....	126
5.4 Quarta etapa – Estudo da influência do consumo de cimento na absorção capilar	127
5.5 Ensaio de Abatimento Através do Mini Slump	132
5.6. Resistência à Compressão Axial (NBR7215/96).....	133
5.7. Extração de Corpos de prova (NBR7680/2007).....	137
5.8 Densidade de Massa no Estado Endurecido (NBR 13280/05)	138
5.9 Módulo Dinâmico por Ultra-Som (NBR 15630/08)	139
5.10. Absorção de Água por Capilaridade (NBR15259/05 / NBR 9779/95)	140
6. RESULTADOS E ANÁLISES.....	145
6.1 Resultados do Estudo no Campo Experimental da Unicamp.....	145

6.2 Resultados do Estudo da Reologia de Argamassas convencionais formuladas em Laboratório	146
6.3 Resultados do comparativo entre argamassas convencionais e industrializadas	149
7. CONCLUSÃO	157
7.1 Sugestões para futuras pesquisas	159
8. REFERÊNCIAS	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Projeção das emissões de CO ₂ para o futuro (MEHTA & MONTEIRO, 2008).....	26
Figura 1.2: Fluxograma das etapas da pesquisa.....	28
Figura 2.1: Pirâmide escalonada de Djoser, projetada pelo primeiro arquiteto da humanidade, Imhotep (2.750 a. C.) (HELENE & ANDRADE, 2007).	34
Figura 3.1: DEF – Formação de etringita tardia. (MEHTA & MONTEIRO, 2008)..	48
Figura 3.2: Variação da permeabilidade em função da relação A/C (KAKIZAKI et al., 2000).	50
Figura 3.3: Diminuição da porosidade capilar em função do grau de hidratação (Caso A) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).....	53
Figura 3.4: Diminuição da porosidade capilar em função da variação da relação A/C (Caso B) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).....	53
Figura 3.5: Fórmula de Powers para cálculo da porosidade e resistência em função da relação A/C (MEHTA & MONTEIRO, 2008).	55
Figura 3.6: Influência da relação A/C no coeficiente de permeabilidade dos concretos (MILITITSKY et al., 2005).	56
Figura 3.7: Relação entre acréscimo de massa por unidade de área e o tempo, usado para o cálculo da capilaridade (NEVILLE, 1997).	58
Figura 3.8: Absorção capilar até 24 horas de concreto confeccionado com cimento CPIII - alto-forno (AF) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (MARTINS, 2001).	59
Figura 3.9: Absorção capilar até 24 horas de concreto confeccionado com cimento CPV ARI RS (RS) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (MARTINS, 2001).....	59
Figura 3.10: Absorção capilar até 24 horas de concreto confeccionado com cimento CPV Plus (RS) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (MARTINS, 2001).	60

Figura 3.11: Coeficiente de absorção inicial aos 28 dias para os cimentos CPIII – alto-forno (AF), CPV ARI RS (RS) e CPV ARI Plus (Plus) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (Fonte adaptada de MARTINS, 2001).	60
Figura 3.12: Coeficiente de absorção inicial aos 180 dias para os cimentos CPIII – alto-forno (AF), CPV ARI RS (RS) e CPV ARI Plus (Plus) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (Fonte adaptada de MARTINS, 2001).	61
Figura 3.13: Influencia do consumo de cimento e C_3A na deterioração por ataque de sulfatos. Estudo realizado por Verbeck (1968 apud MEHTA & MONTEIRO, 2008).	78
Figura 3.14: Estudo da absorção capilar realizado por Schulze, 1999.....	80
Figura 3.15: Estudo da incidência das patologias de fundações no Rio Grande do Sul quanto a sua origem (Fonte adaptada de SILVA, 1993).	82
Figura 3.16: Incidência das patologias em fundações profundas no Rio Grande do Sul quanto a sua origem (Fonte adaptada de SILVA, 1993).	83
Figura 4.1: Execução de estaca raiz inclinada (FUNDESP, 2011).	88
Figura 4.2: Reforço de fundação com estaca raiz (FUNDESP, 2011).	89
Figura 4.3: Reforço de fundação com estaca raiz (FUNDESP, 2011).	89
Figura 4.4: Reforço de fundação com estaca raiz (FUNDESP, 2011).	90
Figura 4.5: Reticulado em estaca raiz para contenção de encostas (FUNDESP, 2011).	91
Figura 4.6: Reticulado de estaca raiz em terreno rochoso (FUNDESP, 2011).	91
Figura 4.7: Reticulado de estaca raiz em substituição de parede diafragma (FUNDESP, 2011).	92
Figura 4.8: Locação para perfuração da estaca raiz.	93
Figura 4.9: Perfuração da estaca raiz.	94
Figura 4.10: Preparo da argamassa convencional.	96
Figura 4.11: Preenchimento da estaca raiz com argamassa.	96

Figura 4.12: Retirada do revestimento.	97
Figura 4.13: Sequencia executiva da Estaca Raiz (FUNDESP, 2001).....	97
Figura 4.14: Ilustração esquemática da macro e microestrutura da argamassa (CARDOSO et al., 2005).	99
Figura 4.15: Fluxograma dos processos para argamassa mista preparada em obra (REGATIERI & SILVA, 2003).	101
Figura 4.16: Fluxograma dos processos para argamassa industrializa em sacos (REGATIERI & SILVA, 2003).	101
Figura 4.17: Esquema de funcionamento o sistema de argamassa granel em silo com misturadora acoplada (VOTORANTIM, 2011).	103
Figura 4.18: Gráfico da produtividade no processo de preenchimento da esta raiz (LAISTER et al., 2004).	104
Figura 4.19: Redução de volume da argamassa preparada em obra. (LAISTER et al., 2004).	105
Figura 4.20: Vista de planta do mini slump proposto por Kantro (1980).....	111
Figura 4.21: Vista da elevação do mini slump proposto por Kantro (1980).	111
Figura 5.1: Preparo da argamassa convencional.....	115
Figura 5.2: Silo com misturadora acoplada para armazenamento de argamassa industrializada.	117
Figura 5.3: Argamassa industrializada caindo na bomba.....	117
Figura 5.4: Detalhe do vazômetro.	118
Figura 5.5: Mistura da argamassa convencional – obra 1.....	120
Figura 5.6: Curva granulométrica – Grout 15 MPa.....	122
Figura 5.7 – Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria do Grout 15 MPa.	122
Figura 5.8: Curva granulométrica do Grout 20 MPa.....	123

Figura 5.9: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria do Grout 20 MPa.	123
Figura 5.10: Curva granulométrica do Grout 25 MPa.....	124
Figura 5.11: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria do Grout 25 MPa.	124
Figura 5.12: Curva granulométrica do grout 30 MPa.....	125
Figura 5.13: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria do Grout 30 MPa.	125
Figura 5.14: Curva granulométrica da argamassa Laboratório 336.	128
Figura 5.15: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria da argamassa Laboratório 336.....	129
Figura 5.16: Curva granulométrica da argamassa Laboratório 475.	129
Figura 5.17: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria da argamassa Laboratório 475.....	130
Figura 5.18: Curva granulométrica da amostra Laboratório 616.	130
Figura 5.19: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria da argamassa Laboratório 616.....	131
Figura 5.20: Curva granulométrica do cimento CPIIE40.	131
Figura 5.21: Ensaio de mini slump.	133
Figura 5.22: Formas para moldagem de corpos de prova de argamassa, detalhe da vedação para moldagem de corpos de prova e soquete de adensamento da argamassa.....	134
Figura 5.23: a) corpos de prova de argamassa moldados “in-loco”. b) em laboratório.	135
Figura 5.24: Cura dos corpos de prova de argamassa em tanque de imersão...	135
Figura 5.25: Capeamento do corpo de prova.	136

Figura 5.26: Ruptura à compressão axial dos corpos de prova de argamassa...	136
Figura 5.27: Extração de corpos de prova da estaca exumada.	137
Figura 5.28: Corpos de prova da estaca exumada.....	137
Figura 5.29: Pesagem do corpo de prova para determinação da massa específica aparente.	138
Figura 5.30: Equipamento de ultra-som.	139
Figura 5.31: Ensaio de absorção de água por capilaridade.	143
Figura 6.1: Fluidiez da argamassa dosada em laboratório, traço 1:4 com aditivo.	147
Figura 6.2: Fluidiez da argamassa dosada em laboratório, traço 1:2, com aditivo.	148
Figura 6.3: Gráfico da fluidiez pelo ensaio do mini slump para as argamassas coletadas em campo e para os “grouts”.	150
Figura 6.4: Resultados da resistência à compressão axial, para as argamassas coletadas em campo, “grouts” e de laboratório.	151
Figura 6.5: Resultados de absorção capilar para as argamassas convencionais e industrializadas.....	153
Figura 6.6: Resultados de absorção capilar para as argamassas convencionais e industrializadas, sem as misturas de laboratório 336 e 475.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resumo das quatro grandes revoluções na arte de projetar e construir estruturas (HELENE & ANDRADE, 2007).....	39
Tabela 3.1: Referência de absorção segundo ISAT para durabilidade do concreto (DHIR et al., 1994).	44
Tabela 3.2: Composição dos traços das Curvas de permeabilidade da Figura 3.2 (KAKIZAKI et al., 2000).	50
Tabela 3.3: Tempo necessário para interrupção da conectividade dos poros capilares.....	55
Tabela 3.4: Classes de agressividade ambiental (NBR 6118/2007).	62
Tabela 3.5: Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto (NBR6118/2007).....	63
Tabela 3.6: Classificação de severidade ao ataque por sulfatos (MEHTA & MONTEIRO, 2008).....	64
Tabela 3.7: Limites de durabilidade para o concreto – BS5328 (BARKER & MATTHEWS, 1994).....	65
Tabela 3.8: Requisitos de durabilidade segundo a ENV 206 (BARKER & MATTHEWS, 1994).....	66
Tabela 3.9: Requisitos de durabilidade segundo a norma EH-91 (SANCHEZ, 1998).	67
Tabela 3.10: Parâmetros de dosagem de concreto segundo o ambiente que está inserido. (EH-91) (SANCHEZ, 1998).....	68
Tabela 3.11: Tipo de exposição para estruturas duráveis (Guia CEB) (SANCHEZ, 1998).	69
Tabela 3.12: Parâmetros químicos para avaliação da agressividade de águas e solos para definição do nível de exposição ambiental tipo 5 (CEB) (SANCHEZ, 1998).	70

Tabela 3.13: Requisitos para concretos duráveis inseridos em ambientes agressivos ⁽⁵⁾ (CEB) (SANCHEZ, 1998).....	71
Tabela 3.14: Valores-limite para avaliação da agressividade dos solos (BAUER, 1985).....	74
Tabela 3.15: Agressividade da água devida a substâncias dissolvidas (BAUER,1985).....	75
Tabela 3.16: Classificação da severidade do ambiente de sulfato, baseado na ACI 201.2R-92 (NEVILLE, 1997).....	76
Tabela 3.17: Limites de concentração na água de amassamento para as substâncias nocivas a pasta de cimento (PETRUCCI, 1978).....	85
Tabela 4.1: Relação entre o diâmetro do tubo de perfuração com o diâmetro da estaca acabada.....	95
Tabela 5.1: Características do cimento utilizado para confecção da argamassa convencional.	114
Tabela 5.2: Traço utilizado para confecção da argamassa convencional.	115
Tabela 5.3: Características do Grout 20 MPa.	116
Tabela 5.4: Traço da argamassa utilizada na obra 1.	119
Tabela 5.5: Traço da argamassa utilizada na obra 2.	120
Tabela 5.6: Características da argamassa industrializada – Grout.	121
Tabela 5.7: Granulometria do Grout 15MPa.....	122
Tabela 5.8: Granulometria do Grout 20MPa	123
Tabela 5.9: Granulometria do Grout 25MPa.....	124
Tabela 5.10: Granulometria do Grout 30MPa.....	125
Tabela 5.11: Características do cimento CPIIE40 utilizado.....	126
Tabela 5.12: Dosagem de argamassa em laboratório com utilização de aditivo superplastificante.	127

Tabela 5.13: Dosagem de argamassa em laboratório sem a utilização de aditivo superplastificante.	127
Tabela 5.14: Características da amostra dosadas em laboratório com substituição de parte de cimento por filler calcário.....	128
Tabela 5.15: Granulometria da argamassa Laboratório 336.	129
Tabela 5.16: Granulometria da argamassa Laboratório 475.	130
Tabela 5.17: Granulometria da argamassa Laboratório 616.	131
Tabela 6.1: Resultados do comparativo entre a argamassa industrializada e convencional do CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP.	145
Tabela 6.2: Dosagem de argamassa em laboratório sem a utilização de aditivo superplastificante.	146
Tabela 6.3: Dosagem de argamassa em laboratório com utilização de aditivo superplastificante.	147
Tabela 6.4: Argamassas dosadas e laboratório. Base 1:2, com adição de filler calcário.....	149
Tabela 6.5: Resultados do ensaio de abatimento (mini slump) para as argamassas coletadas em campo e para os “grouts”.	150
Tabela 6.6: Resultados da resistência à compressão para as argamassas coletadas em campo e para os “Grouts”.	151
Tabela 6.7: Resultados da absorção capilar pelo método da NBR 9779/95, das argamassas coletadas em campo, experimentais e “grouts”.	152

LISTA DE SÍMBOLOS

i	Acréscimo de massa (g/mm ²)
t	Tempo em minutos
S	Sorção (mm/min ^{0,5})
CA	<i>Concreto armado</i>
CP	<i>Concreto protendido</i>
p	Traço da cal ou outro plastificante (em massa)
q	Traço do agregado, em massa
A/C	Relação água / cimento
C _c	Consumo de cimento
C _p	Consumo de cal
C _q	Consumo de areia
γ _{arg}	Massa específica da argamassa
ar	Teor de ar (%)
γ _c	Massa específica do cimento
γ _p	Massa específica da cal
γ _q	Massa específica do agregado
γ	Densidade aparente (kg/m ³)
m	Massa do corpo-de-prova (kg)
v	Volume do corpos-de-prova (m ³)
Ed	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)
V	Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (mm/μs)
μ	Coeficiente de Poisson
L	Comprimento do corpo de prova (mm)
A _t	Absorção de água por capilaridade cada o respectivo tempo (g/cm ²)
m _t	Massa do corpos de prova para o tempo ensaiado (g)
m ₀	Massa inicial do corpo de prova (g)
A	Área (cm ²)
C	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
B	Massa do corpo de prova seco (g)

1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista que o assunto de consumo mínimo de cimento para execução de estaca raiz é um tema polêmico no meio técnico quanto ao consumo de cimento, de no mínimo 600kg/m^3 , e nos últimos anos vem sendo discutido com mais frequência em função da forte tendência mundial a sustentabilidade, a presente pesquisa traz uma abordagem sobre o tema, estudando o comportamento no estado fresco e endurecido de diversas dosagens.

1.1 Objetivo

A presente pesquisa tem por objetivo investigar a influência do consumo de cimento e da relação água / cimento em argamassas para execução de estaca raiz, por meio de ensaios de absorção capilar visando avaliar seu desempenho e durabilidade para condições de consumo de cimento menor do que 600 kg/m^3 .

1.2 Justificativa

O desenvolvimento da humanidade tem gerado um alto crescimento da emissão de gás carbônico (CO_2). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a elevação de CO_2 passou de 280 partes por milhão em 1800, para 360 partes por milhão atualmente, tal elevação é responsável direta pelo aumento das temperaturas da Terra (JOHN, 2009). A fabricação de cimento é umas das principais fontes de emissão de CO_2 , portanto quanto mais consciente for seu consumo, mais estaremos contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável.

Segundo Agopyan & John (2011), não é possível falar de sustentabilidade sem tocar em toda a cadeia produtiva, desde grandes conglomerados industriais até pequenas empresas familiares, como também grandes construtoras, pequenas construções e autoconstruções. Para reverter o cenário atual é necessário visão

sistêmica do assunto. Para tanto a inovação vem de encontro às novas necessidades sustentáveis.

Mehta & Monteiro (2008), destacam que nossas escolhas tecnológicas têm se mostrado muito desperdiçadoras, pois se baseiam em decisões de curto prazo. A Figura 1.1 mostra as projeções das emissões de CO₂ para o futuro.

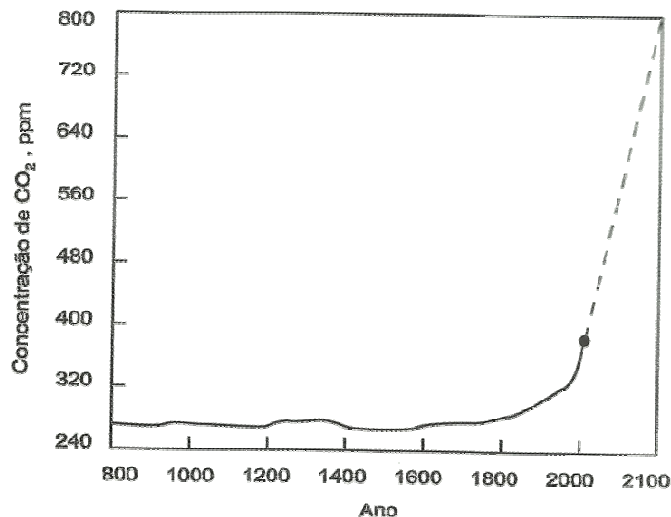


Figura 1.1: Projeção das emissões de CO₂ para o futuro (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Portanto é necessário reduzir esse crescimento e o único meio é diminuir as emissões de CO₂ na atmosfera. A produção de cimento contribui com uma parcela de 5% das emissões de CO₂ no mundo, assim as fábricas de cimento estão se modernizando, fabricando cimentos com mais adições, o que baixa a quantidade de clínquer por tonelada de cimento e consequentemente a emissão de CO₂, mas em contrapartida ainda há muito desperdício no processo construtivo. Otimizando a utilização do cimento de forma mais racional, ter-se-á contribuído para reverter esse quadro fazendo uso da engenharia na sua essência (JOHN, 2009).

Para John (2009), a simples otimização da dosagem de concreto, com o uso da quantidade apropriada do cimento, contribui decisivamente para a sustentabilidade no setor.

1.3 Delimitações

Para a confecção de argamassa para o preenchimento da estaca raiz, a Norma vigente, NBR 6122/2010 recomenda uma resistência mínima de 20 MPa, consumo mínimo de cimento de 600 kg/m³; e relação água/cimento entre 0,5 a 0,6, no entanto, nessas condições, com um consumo de cimento nesse patamar, ter-se-á resistência à compressão axial acima dos 20 MPa exigidos por norma sem grande tecnologia para a confecção de argamassas. Porém houve uma grande evolução nos materiais, o cimento passou a ter mais adições como exemplo: escória de alto forno, o que proporciona menor permeabilidade ao concreto por serem catalisadas pelo Ca(OH)_2 , disponível na hidratação do cimento, promovendo assim menor permeabilidade. Os cimentos também ficaram mais finos, proporcionando maior reatividade e logo maior resistência. Hoje se trabalha com cimentos de classe mínima de 32 MPa até àqueles que atingem cerca de 50 MPa como os do tipo CP-V. Dessa forma, se faz necessário reavaliar os parâmetros vigentes.

Wassermann et al. (2009), destacam três motivos porque as normas definem consumo mínimo de cimento:

- Reflexo de uma época em que se controlava a relação água/cimento através do consumo de cimento. Pouco se dispunha de recursos quanto a aditivos redutores de água.
- Garantir um mínimo de finos permitindo a trabalhabilidade e aumentando a coesão. Hoje já se trabalha com fechamento granulométrico global com adições de finos inertes.
- Garantir a proteção do concreto quanto à ação ao ataque de CO_2 , e este, está ligado à porosidade do concreto, e o qual, nessas condições, deve ser estudado mais detalhadamente.

1.4 Metodologia

As etapas de estudo da presente pesquisa é apresentada no fluxograma da Figura 1.2.

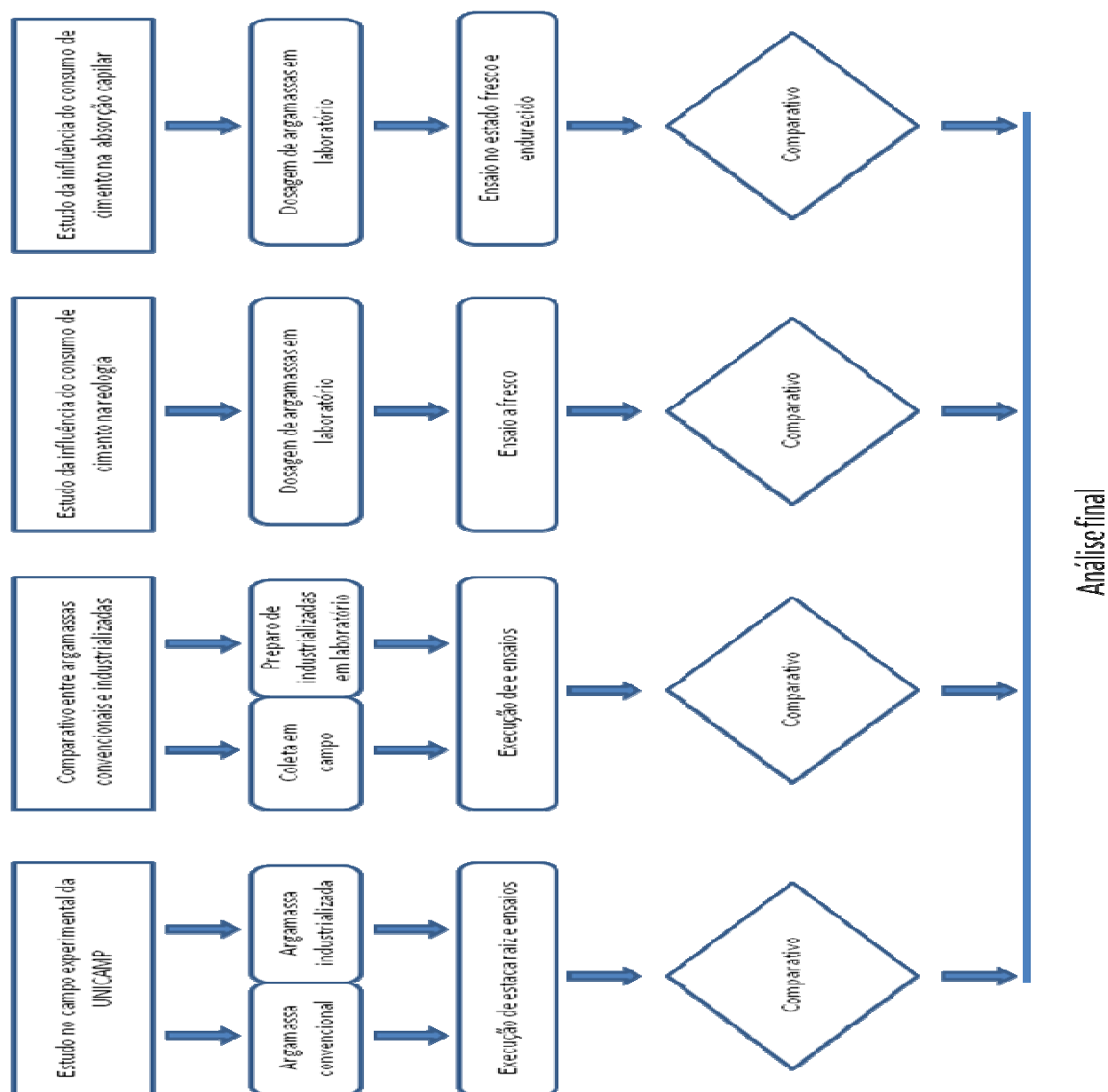


Figura 1.2: Fluxograma das etapas da pesquisa.

O presente trabalho estudou as propriedades de argamassas para o preenchimento de estaca raiz, comparando inicialmente (primeira etapa) a execução de duas estacas do tipo raiz, sendo uma preenchida com argamassa industrializada e outra com argamassa convencional. Nesta etapa estudaram-se as principais diferenças entre as argamassas, sendo que a argamassa industrializada utilizada foi dosada com consumo de cimento na ordem de 480 kg/m³. e a convencional na ordem de 640 kg/m³. Exumou-se a estaca executada com argamassa industrializada e nessa oportunidade extraíram-se corpos de prova para ensaios de resistência à compressão axial e absorção capilar, comparando com resultados obtidos através de ensaios com corpos de prova moldados com a respectiva argamassa convencional.

Na segunda etapa estudaram-se, em laboratório, as propriedades de quatro tipos de argamassas industrializadas, denominadas pelo fabricante como Grout, com consumo de cimento variando de 242 kg/m³ a 374 kg/m³, comparando suas propriedades com argamassas convencionais, confeccionadas conforme a NBR6122/1996 (esta etapa ocorreu no ano de 2010 antes da publicação a revisão da respectiva norma), coletadas e moldadas in-loco em duas obras locais, sendo uma na cidade de São Paulo – SP e outra em Cubatão – SP, sendo ambas executadas por empresas locais consagradas. Foram moldados 20 corpos de prova para cada tipo de argamassa.

Na terceira etapa testaram-se em laboratório algumas formulações, argamassa convencional, traços 1:2, 1:3 e 1:4 a fim de entender os limitantes reológicos de sua composição para a fluidez necessária à sua aplicação, variando o consumo de cimento e reduzindo o consumo de água através do emprego de aditivo superplastificante.

Na quarta etapa, estudaram-se três formulações de argamassas convencionais, quanto ao seu comportamento e à absorção capilar, dosadas em laboratório, utilizando como referência o traço 1:2, substituindo parte do cimento

por adição inerte (filler). Foram moldados 20 corpos de prova para cada formulação.

Nesta linha o presente trabalho estuda a influência do consumo mínimo de cimento de 600 kg/m^3 nas propriedades da argamassa para o preenchimento de estaca raiz, com base na absorção capilar (estado endurecido) e uma adaptação do cone de Kantro (KANTRO, 1980), denominado como mini slump, para obtenção dos parâmetros reológicos.

1.5 Estrutura do Trabalho

O capítulo 2 apresenta a evolução das construções, desde as primeiras construções do período Neolítico até os dias atuais, indicando que os materiais evoluem e com essa evolução os métodos construtivos também se alteram, sendo necessário rever os parâmetros normativos vigentes.

No capítulo 3 são apresentadas questões ligadas à durabilidade, pois se faz necessário o conhecimento das variáveis que interferem na durabilidade das argamassas e seus agentes agressores. O consumo mínimo de cimento é utilizado como fator determinante para durabilidade. Como esse tema é muito amplo, foi dividido da seguinte forma: reação deletéria ao concreto, na qual são detalhados os processos químicos deletérios e a pasta de cimento; permeabilidade e absorção capilar, que estão ligados à entrada de agentes agressivos na matriz cimentícia; requisitos de durabilidade proposto por normas nacionais e estrangeiras; agressividade dos solos e fatores mitigadores; patologia das fundações e por último é abordado o tema referente à qualidade dos materiais.

O capítulo 4 aborda o processo executivo da estaca raiz, desde seu método de execução, requisitos para a argamassa de preenchimento, e temas referentes aos tipos de argamassas, dosagem e reologia.

A investigação experimental é tratada no capítulo 5, neste capítulo são detalhadas as quatro fases da pesquisa, sendo apresentadas as características dos materiais utilizados e metodologia.

O capítulo 6 apresenta os resultados da pesquisa e com seus comentários , sendo eles: fluidez obtida pelo mini slump (KANTRO, 1980), e absorção capilar de corpos de prova cilíndricos ($5 \times 10\text{cm}^2$).

Os comentários finais e conclusões são apresentados no capítulo 7, em que se dá destaque à influência do consumo de cimento na durabilidade das argamassas baseada em resultados de absorção capilar. Também neste capítulo se fazem sugestões para futuras pesquisas.

2. EVOLUÇÃO DAS CONSTRUÇÕES

O homem por sua alta sensibilidade ao clima maior que outros animais do Paleolítico, habitou primeiramente em abrigos fornecidos pela natureza como as grutas, mas ao longo do tempo pôde desenvolver os materiais locais, evoluindo para as primeiras cabanas (período Neolítico), essas cabanas eram feitas basicamente de madeiras ou de pedra e eram construídas em regiões de muitos ventos e onde não se tinha a disponibilidade de madeira. Outro material bastante utilizado no início do período Neolítico foi o solo, usado para construir pequenos montes chatos e largos, em geral para jazigos. No Brasil encontraram-se os sambaquis ou casqueiros. Mas o início da idade do ferro foi marcado por proporcionar ferramentas de alto desempenho para perfuração do solo e para o trato dos materiais (encontrados também entre os Incas) (NETO, 1998).

Assim que o homem foi desenvolvendo suas técnicas de caça, tendo que cada vez mais se distanciar para novos pontos estratégicos em busca de alimento, surgia a necessidade de improvisar acampamentos. Assim foram se desenvolvendo as técnicas de abrigos que evoluíram de uma palhoça, maloca ou tendas para construções a base de barro, assentamento de rochas com barro, construções a base de barro e fibras vegetais, até a evolução para os tijolos crus ou adobe (CUNHA, 2009).

Em impérios do Oriente, os materiais de construção utilizados passaram a ser tijolos cerâmicos e pedra. Porém o maior problema era o solo que muitas das vezes cedia e após a demolição da construção existente eram erguidas novas obras sobre os escombros e assim sucessivamente até que a compactação causada pelas construções anteriores proporcionasse um aumento de capacidade de carga no solo compatível com a construção atual.

Perante as dificuldades em terrenos fracos, os antigos procuraram distribuir melhor as cargas da estrutura nas fundações, utilizando tijolos de barro seco ao sol (tijolo cru) e tijolos cozidos, que evoluíram depois para os assentados com

barro e às vezes em mistura de betume e mastique. Nesta evolução dos materiais, percebeu-se o ganho de adicionar palha a massa de tijolo evitando as retrações por secagem e melhorando sua resistência à tração. Posteriormente o processo evoluiu para queima em fornos (NETO, 1998).

Segundo Hellene & Andrade (2007), o alquimista Imhotep foi o primeiro a receber o título de arquiteto pela sociedade egípcia, sendo ele o responsável pela construção da primeira pirâmide durável do planeta, a Pirâmide escalonada de Djeser (Figura 2.1).



Figura 2.1: Pirâmide escalonada de Djeser, projetada pelo primeiro arquiteto da humanidade, Imhotep (2.750 a. C.) (HELENE & ANDRADE, 2007).

Segundo Neto (1998), a idade clássica foi marcada pelo desenvolvimento do trato de pedras em geral, mármore, calcário etc. Nesta época as construções chegavam até três pavimentos, fundadas sobre pedaços de rochas, paredes de tijolos crus com pilares de pedra e demais estruturas de madeira.

Dessa época datam as primeiras estradas calçadas por pedra, canais, aquedutos e pontes; sendo essas pontes de madeira, algumas com pilares de tijolos.

Com o avanço a tecnologia construtiva aumentava a concentração de cargas nas fundações, sendo assim tais fundações eram feitas com blocos de rochas superpostos. As partes inferiores dessa fundação, não visíveis, eram compostas por pedras menos aparelhadas e misturadas como cascalho. Sendo assim, essa composição na fundação proporcionava melhor travamento e consequentemente menor recalque diferencial.

Nas construções menores ao invés da fundação ser corrida, era composta por sapatas isoladas, porém essa solução era bastante complicada quando se tratava de solo menos resistente. Nesses casos se fazia a substituição de parte do solo da fundação por composições de solo com cinza de carvão, calcários e pedregulho. Em alguns casos eram usadas estacas de madeira cravadas por máquinas; acredita-se que tais máquinas eram adaptações de máquinas de guerra.

Apesar do avanço tecnológico o qual os gregos herdaram do velho império, foi em Roma que as técnicas construtivas mais avançaram, isto se deve à introdução do arco e das abóbadas, o que carregou mais as fundações. Foi neste período que se iniciou a utilização do cimento romano a partir da mistura de pozolana com calcário, e, por conseguinte o concreto, pela adição de fragmentos de pedra. Desta fase em diante o concreto começou a não só ser usado nas fundações, como também nos arcos e domos, dentre eles o do Panteão de Roma (110-125 D.C) (NETO, 1998). A introdução dos arcos permitiu a construção de imponentes aquedutos e pontes que juntamente com as estradas e portos marcaram o surgimento da engenharia civil e militar.

Na idade média, até o renascimento, os progressos técnicos alcançados durante a idade clássica foram deixados de lado e como consequência ocorreram diversos colapsos.

As construções medievais eram grandes, principalmente pelo porte dos castelos, para tais construções, desenvolveu-se o bate-estaca acionado por rodas de água. Em rios, quando a correnteza era muito forte para executar os pilares, optava-se por aumentar os vãos chegando nessa época a 70m.

Com o renascimento vieram os grandes gênios da engenharia, Leonardo da Vinci e Galileu. Leonardo da Vinci na arquitetura, na construção e até na engenharia, desenvolveu projetos de bate-estacas e ensecadeiras. Esse período foi marcado também por Galileu Galilei fundando a resistência dos materiais.

Estudando as construções que resistiram aos séculos, muitas apresentaram alguma patologia a respeito de suas fundações, em função de carregamento excêntrico, e de obras edificadas em cima de taludes naturais e assentadas sobre solos muito compressíveis.

Nos séculos XVII e XVIII foi estabelecida a separação entre o engenheiro e o arquiteto e esta separação foi marcada pelo avanço do domínio da engenharia de fundações e da mecânica dos solos. (NETO, 1998).

Através das fortificações e plataformas de artilharia, a engenharia se desenvolveu ao ponto de trazer sua experiência militar para os muros de arrimo, sendo desenvolvidos nessa época os conceitos de ângulo de atrito do solo e outras teorias. Sendo possível racionalizar a fundação por sapatas e estacas.

No início da revolução industrial, época em que os materiais de construção tiveram um maior avanço, começou-se a utilizar tijolos cerâmicos, além de argamassas e concreto, sendo o concreto utilizado para fundações, aqui se pode citar a obra do engenheiro John Smeaton, construtor do farol de Eddystone que descobriu que a mistura de calcário impurificado com argila, produzia um cimento “impermeável” como o pozolânico, sendo assim ele usou esse material na

fundação desse farol. Tal material gerou uma patente em 1796 com o nome de cimento romano, alusão às duradouras obras romanas (NETO, 1998).

Foi na Inglaterra que foram estudadas várias misturas empíricas até que Aspidin, através da calcinação de calcário mole com argila obteve um cimento batizado de Portland em razão da sua semelhança, quando endurecido, com as rochas calcária de Portland (Dorset), sendo patenteado em 1824 (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Nesses primeiros anos da patente do cimento Portland, Estados Unidos, Inglaterra e França já eram países bem desenvolvidos, mas poucas aplicações se teve, merecendo destaque as patentes dos franceses Louis Lambot e Joseph, em 1855, para construir barcos e a de Joseph Monier para construir vasos em 1867, e postes e vigas já em 1878, essas patentes eram para aplicação do que chamamos hoje de argamassa armada (HELENE & ANDRADE, 2007).

Helene & Andrade (2007), destacam que, para dar continuidade na difusão dessa nova tecnologia, o alemão Adolf Wayss compra a patente de Monier e passa a expandir essa técnica em todo o mundo, inclusive com influencia no Brasil através da empresa Wayss & Freytag. Nesta mesma época, em 1878 Thadeus Hyatt consegue a patente nos Estado Unidos do concreto armado e em 1893 constrói o primeiro edifício na Califórnia.

Quanto à história moderna, no tocante, a evolução das fundações é marcada pelo uso de estacas de areia em substituição as de madeira, bem como colchões de areia para adensar e aumentar a resistência dos solos lodosos e argilosos, e também pelos estudos da distribuição dos esforços aplicados ao solo e sua deformação, incluindo nesse estudo até provas de carga.

2.1 História das Fundações no Brasil

Segundo Vargas (1998) a igreja como base da colonização no Brasil teve grande influência nos processos construtivos, tanto é que foi publicado um documento sobre as técnicas construtivas pelo monge beneditino Dom Clemente Maria Silva-Nigra, referindo-se a biografia de frei Bernardo de São Bento, arquiteto renascentista, onde cita estudos sobre a profundidade da fundação, e a influencia dos variados tipos de solos.

A engenharia no Brasil se fortaleceu na construção das ferrovias. Porém as obras portuárias, mais elaboradas tiveram muitos fracassos em função dos terrenos extremamente moles. No tocante, a obras portuárias, o único sucesso no período do império, foi o projeto das Docas da Alfândega, no Rio de Janeiro, obra executada em alvenaria de pedra e cimento, fundada sobre estacas de madeira.

Através da utilização de concreto armado no início do século passado, as construções mudaram seus estilos, sendo possível construir prédios mais altos, logo, elevando as cargas pontuais nas fundações. Estudos mostram que no início dos anos 30, as estruturas de concreto se apoiavam sobre sapatas de concreto armado, ou blocos de concreto simples, que muitas vezes capeavam estacas de madeira ou mesmos pré-moldadas de concreto, porém em grandes obras já se utilizava outros tipos de fundações como as de ar comprimido, utilizada em obras portuárias, consequência da influência de empresas estrangeiras que traziam novas tecnologias.

As construções de hidroelétricas acompanhadas de suas torres de transmissão no início da década de 60 também trouxeram grandes avanços nos processos construtivos, como o caso da usina Jupiá em São Paulo, projetada pela Themag Engenharia Ltda, na qual foram executadas fundações por tubulões escavados a céu aberto (VARGAS, 1998).

Helene & Andrade (2007), apresentam na Tabela 2.1 as quatro grandes evoluções na arte de projetar e construir estruturas.

Tabela 2.1: Resumo das quatro grandes revoluções na arte de projetar e construir estruturas (HELENE & ANDRADE, 2007).

Grandes mudanças	Período	Obra emblemática	Projetista	Comentários
1ª revolução	2800 a.C a 2500 a.C.	Pirâmide escalonada de Djoser – Egito	Arquiteto, alquimista, político Imhotep - Egito	A Engenharia e a arquitetura de estruturas podiam construir obras duráveis, majestosas e de grandes proporções.
2ª revolução	1779	Iron Bridge em Coalbrookdale – Inglaterra.	Arquiteto T. M. Pritchard com aço produzido por Abraham Darby III – Inglaterra.	A Engenharia estrutural e a arquitetura podiam projetar obras antes inimagináveis, com muito mais velocidade, segurança para vencer grandes vãos e podia construir em altura como nunca dantes.
3ª revolução	1901	Edifício Hennebique Rue Danton n.1, Paris – França	Construtor François Hennebique - França	A Engenharia e a Arquitetura podiam ousar muito mais, pois descobriram como combinar dois materiais fantásticos. O concreto tinha a durabilidade da rocha, era compatível com o aço e ainda o protegia “eternamente”.
4ª revolução	1997	Edifício Petronas Tower, Kuala Lumpur - Malasia	Arquiteto Cesar Pelli – Argentina. Projeto Estrutural de Thornton Tomasetti – Estados Unidos.	A Engenharia estrutural e a Arquitetura descobrem as vantagens de rigidez do concreto de alto desempenho assim como seus benefícios para a sustentabilidade da construção civil.

2.2 Concreto como Material de Fundação

Com o domínio na produção de cimento Portland, a construção pôde avançar a passos largos, pois o cimento na preparação de argamassas e concretos promoveu uma revolução em termos de durabilidade para os materiais, por uma característica muito genuína, ser resistente à ação da água, muito diferente dos tijolos de barro cru. As argamassas e concretos à base de cimento

Portland mostraram-se estáveis sob ação da água colocando a construção num novo patamar de tecnologia.

Segundo Mehta & Monteiro (2008), em 1964, os cientistas Brunauer e Copeland, publicaram através da Scientific American um artigo que mudou a forma de pensarmos quanto ao concreto, no qual mostram que no ano anterior ao da publicação, o consumo de concreto no mundo foi de aproximadamente 3 bilhões de toneladas, o que na época representava 1 ton para cada habitante, neste artigo afirmavam que *“Não há material mais consumido pelo homem em tamanha quantidade, com exceção da água”*.

Mehta & Monteiro (2008), destacam ao menos três grandes vantagens da utilização do concreto:

- Excelente resistência à ação da água, comparado aos outros materiais como madeira e aço comum;
- Fácil possibilidade de moldagem em diversas condições e formas;
- Baixo custo, comparado a outras tecnologias e soluções.

O concreto como material estrutural de fundações se mostrou muito flexível às mais diversas adversidades deste processo, desde o processo de preenchimento de uma simples estaca até o preenchimento de estacas tipo hélice contínua e hélice de deslocamento, como também para as argamassas para estaca raiz, nas quais o preenchimento acontece em condições submersas.

Geralmente a escolha pela utilização de estaca raiz, está ligada diretamente às condições do solo, geralmente em condições instáveis, estando abaixo do nível do lençol freático, onde além do preenchimento submerso, em função do processo de execução, as condições de cura e trabalho também será sob ação da água. Quando ainda tanto o solo quanto a água podem estar contaminados com substâncias nocivas ao concreto / armadura, neste caso, o pleno conhecimento das condições em que a argamassa será exposta e com o pleno domínio de sua dosagem podem promover maior durabilidade com baixo custo.

3. DURABILIDADE

Segundo Milititsky et al. (2005), para elementos de engenharia enterrados, em contato com solo / água, devem ser levados em consideração na etapa de projeto os efeitos de componentes agressivos nos materiais de fundações, podendo ser identificado através da resistividade do solo, pH, teor de sulfatos e cloretos.

Portanto, quanto mais impermeável for o concreto sujeito a esses agentes agressivos, mais durável será. Silva (1993) destaca que a permeabilidade do concreto é um indicador direto de durabilidade.

Wassermann et al. (2009) avaliaram a influência no consumo de cimento na durabilidade de concretos, eles estudaram concretos com consumos de cimento na ordem de 230 a 450 kg/m³ e relações A/C variando de 0,45 a 0,70, e identificaram que o consumo de cimento não é parâmetro para garantia de durabilidade. Para consumos menores de cimento, houve redução na absorção capilar, isso se justifica pelo refinamento na matriz dos poros devido ao uso de aditivos superplastificantes.

Segundo Mehta & Monteiro (2008) os efeitos químicos deletérios que influenciam negativamente o concreto são: lixiviação da pasta por soluções ácidas, reações expansivas envolvendo ataque por sulfatos, reação álcali-agregado, corrosão do agregado e corrosão da armadura no concreto.

A NBR6118 cita quatro mecanismos considerados preponderantes para a deterioração do concreto, sendo eles:

- *Lixiviação: por ação de águas puras, carbônicas agressivas ou ácidas que dissolvem e carregam os compostos hidratados da pasta de cimento;*

- *Expansão por ação de águas e solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado;*
- *Expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos;*
- *Reações deletérias superficiais de certos agregados decorrentes de transformações de produto ferruginosos presentes na sua constituição mineralógica.*

A água está presente em quase todo o tipo de deterioração de concretos e argamassas. Nesta linha, ela conduz componentes agressivos para dentro da microestrutura da pasta de cimento, a permeabilidade desta definirá a taxa de deterioração, pois através da lixiviação por soluções ácidas e expansivas ocorre ataque por sulfatos, cloreto, reação álcali-agregado e corrosão da armadura. Em ambientes marinhos, a atenção se dobra, pois as condições são muito mais severas, sendo a capacidade do concreto / argamassa de resistir a essas ações, denominada como durabilidade (MILITITSKY et al., 2005).

De acordo com Mehta & Monteiro (2008), as moléculas da água são muito finas, conseguindo penetrar nos materiais, e a água como solvente se destaca por dissolver muito mais substâncias do que qualquer outro líquido, isso se justifica em função da presença de íons e gases o que as torna agressivas aos concretos e argamassas.

Portanto, a durabilidade está ligada diretamente com a permeabilidade do concreto e argamassa, por sua vez a permeabilidade, ou mais especificamente o coeficiente de permeabilidade, está ligado a diversos fatores, como condições de cura, levando em consideração as microfissuras, e relação A/C, pois o excesso de água na mistura, evapora, deixando um espaço vazio dentro da pasta de cimento, esses espaços vazios serão a porta de entrada para a água e conseqüentemente seus meios agressivos.

Mehta & Monteiro (2008), define que todo ambiente com pH menor que 12,5, teoricamente deve ser considerado agressivo para o concreto / argamassa.

O concreto e argamassa sob ação da água não necessariamente geram uma patologia, a não ser a reação álcali-agregado. O maior problema é que numa pasta de cimento bem hidratada, composta por hidratos de cálcio relativamente insolúveis como C-S-H, CH e C-A-S-H está em equilíbrio, a solução dos poros desta pasta. Dependendo da concentração de Na^+ , K^+ e OH^- , pode ter variação no pH entre 12,5 e 13,5, ou seja, teoricamente com pH abaixo de 12,5 já se tem um desequilíbrio nessa estrutura, portanto a durabilidade do concreto / argamassa se dará através do pH da água de ataque e da permeabilidade do concreto / argamassa. (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Segundo Dhir et al. (1994), os engenheiros ainda projetam suas estruturas “duráveis” com base em características indiretas a durabilidade. Numa primeira etapa, o concreto é dimensionado em termos de resistência e trabalhabilidade, e num segundo momento é dimensionado quando a sua durabilidade, quando é confrontado com duas questões importantes:

- A vida útil não é bem definida pelo cliente;
- Se tem poucas informações sobre os agentes agressivos onde o concreto será inserido.

Neste caso o projetista vai buscar em sua experiência, e em respectivas normas, respaldo para determinar o quão durável deve ser essa estrutura. Porém essas normas, em sua grande maioria especificam:

- Tipo de cimento, mínimo consumo de cimento e máxima relação A/C;
- Resistência mínima, espessura de cobrimento e grau de compacidade;
- Um determinado tipo de cura por um determinado tempo.

Isto para a produção de um concreto durável não está incorreto, porém é incompleto. Faz-se necessária uma medida objetiva e clara quanto à durabilidade, na qual possa mensurá-la, que seja simples e confiável. Testes de durabilidade acelerada são restritos a laboratórios especializados e além de demandar tempo são caros. Como a durabilidade está ligada diretamente com a porosidade da pasta, ensaios de permeabilidade dão boas correlações.

O estudo de Dhir et al. (1994) baseia-se no ensaio do initial surface absorption (ISAT) como referência de durabilidade para o concreto, independente da cura ou composição. Os autores utilizam os valores na leitura de 10 min como referência para durabilidade (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Referência de absorção segundo ISAT para durabilidade do concreto (DHIR et al., 1994).

Classificação de durabilidade	Valores de ISAT-10 (ml/m ² /s x 10 ⁻²)	Considerações adicionais
1	<50	Difusão por cloretos: com adição de escória ou pozolana ganha-se no ranking 2 divisões. Carbonatação: com adição de escória ou pozolana perde-se no ranking 1 divisão.
2	51 a 70	
3	71 a 90	
4	91 a 110	
5	>110	

O ensaio de ISAT mostrou-se compatível para especificar a classificação de durabilidade do concreto, através de comparações em ensaios de carbonatação e difusão por cloretos, podendo ser utilizado como fator de especificação e controle do concreto.

3.1 Reações Químicas Deletérias à Pasta de Cimento

- HIDRÓLISE DOS COMPONENTES DA PASTA DE CIMENTO

Segundo Mehta & Monteiro (2008), as águas em geral possuem em sua composição pequenas quantidades de cloretos, sulfatos e bicarbonatos de cálcio e magnésio, denominadas como águas duras, essas em geral não atacam a pasta de cimento, mas águas de condensação ou de vapor e de chuvas, geralmente não possuem íons de cálcio. Essa água em contato com os produtos da hidratação do cimento reage buscando um equilíbrio químico, no qual a hidrólise da pasta é interrompida depois que todo o hidróxido de cálcio seja eliminado por lixiviação, deixando os produtos da pasta de cimento endurecida sujeitos à decomposição química.

- REAÇÕES DE TROCA CATIONICA

Mehta & Monteiro (2008), destacam três formas de deterioração da pasta por reações de troca catiônica:

- Formação de sais solúveis de cálcio;

A formação de sais solúveis de cálcio se dá através do ataque de soluções ácidas à pasta de cimento, como por exemplo: ácido clorídrico, sulfúrico ou nítrico, muito presentes em efluentes industriais, como também os ácidos acético, fórmico ou láctico que são encontrados em muitos produtos alimentícios, ou também o ácido carbônico presente em refrigerantes e águas naturais com alta concentração de CO_2 , e desta reação resulta o aumento de sais solúveis de cálcio que podem ser lixiviados.

- Formação de sais de cálcio insolúveis e não expansivos;

A reação entre o hidróxido de cálcio e os ácidos oxálicos, tartáricos, tânico, húmicos, hidrofluóricos ou fosfóricos, formam sais de cálcio insolúveis e não-expansivos. Ou seja, há o ataque da pasta por resíduos de animais e plantas em decomposição (ácido húmico).

- Reações por ataque de sais de magnésio.

O ataque por íons de magnésio na pasta reage principalmente com o hidróxido de cálcio presente na pasta, porém, muita das vezes esse ataque se estende ao C-S-H, principal componente do cimento, tirando cálcio deste componente e desestabilizando sua estrutura causando sérios danos à pasta, por perda de íons de cálcio, pois essa perda é substituída por íons de magnésio, formando um silicato de magnésio hidratado, o qual não tem propriedades cimentícias.

- ATAQUE POR SULFATOS

Nos solos, geralmente encontra-se sulfato na forma de gipsita $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (normalmente de 0,01 a 0,05% expresso como SO_4). Nessas concentrações não há problemas para a pasta de cimento, porém em águas subterrâneas podem-se encontrar concentrações maiores, na forma de sulfato de magnésio, sódio e potássio. Maiores concentrações também podem ser encontradas devido à utilização do local, em terras agrícolas, pela utilização de fertilizantes, como também em áreas industriais em que houve algum tipo de vazamento, ou também por ações naturais como em pântanos, mangues ou mesmo em função de esgoto, onde o material em decomposição gera gás H_2S , o qual se transforma em ácido sulfúrico pela ação bacteriana.

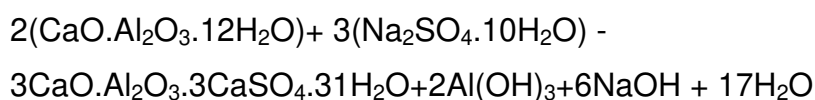
Segundo Neville (1997), nos solos e águas freáticas é comum encontrar sulfatos de sódio, potássio, magnésio e cálcio, esses sulfatos em sua grande maioria tem origem natural, mas podem também ser provenientes de efluentes

industriais, de fertilizantes utilizados no solo e outros. A seguir têm-se alguns exemplos de como essas fontes podem degradar a pasta de cimento endurecida:

Ataque por sulfato de sódio ao Ca(OH)_2 :

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} + 8\text{H}_2\text{O}$ se houver água corrente esse componente pode ser lixiviado ou se estável será somente fonte de sulfatos.

A reação com o aluminato de cálcio pode ser representada como segue abaixo:



Sendo que o sulfato de cálcio ataca somente o aluminato de cálcio hidratado, formando sulfoaluminato de cálcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$), conhecido no meio cimenteiro como etringita.

Neville (1997), também ressalta que o sulfato de magnésio também ataca os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e também o aluminato de cálcio hidratado.

O hidróxido de cálcio e outros cristais hidratados da pasta que contém alumínio são mais vulneráveis ao ataque por íons sulfato. Esse ataque por íons sulfato gera uma etringita tardia, a qual provoca fissuras na pasta, e consequentemente aumentando a permeabilidade, que por sua vez vai expor a pasta a mais ataques por sulfatos gerando mais etringita tardia, nessa linha, deteriorando cada vez mais o concreto / argamassa. A Figura 3.1 apresenta o esquema de formação da etringita secundária.

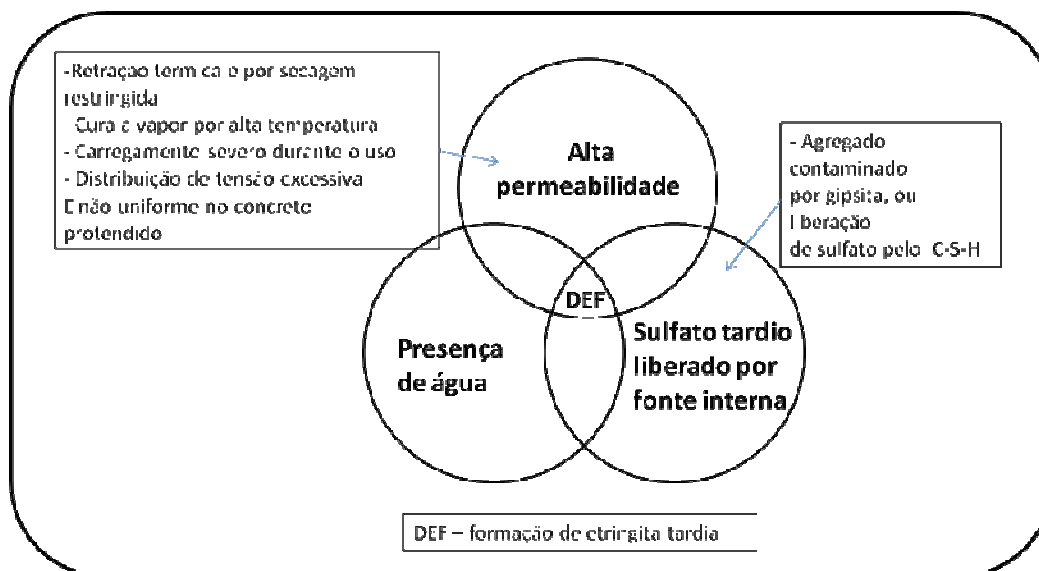


Figura 3.1: DEF – Formação de etringita tardia. (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta & Monteiro (2008), a melhor proteção contra os ataques de fontes de sulfatos são: baixa permeabilidade, espessura adequada do concreto, alto consumo de cimento e baixa relação A/C, adensamento adequado do concreto e uma cura adequada, e se possível o uso de um cimento resistente a sulfatos.

- Ataque do concreto por ácidos

A pasta de cimento, por ser alcalina, por sua natureza não resiste ao ataque de ácidos fortes. O produto da hidratação mais suscetível ao ataque é o Ca(OH)_2 , mas o C-S-H pode ser atacado também, dependendo do grau de exposição.

Águas provenientes do lençol freático que contenham CO_2 livre ou que contenham sulfeto de hidrogênio podem atacar o concreto.

Em linhas gerais, líquidos com pH abaixo de 6,5 atacam o concreto, mas o ataque é mais severo quando o pH é menor que 5,5, mas ainda se o pH estiver abaixo de 4,5, o ataque é muito severo. (NEVILLE, 1997).

Segundo Neville (1997), quanto menor a relação A/C, mais tempo levará para que o concreto seja degradado por ataque de sulfatos.

3.2 Permeabilidade

Quando se fala em durabilidade do concreto, logo estuda-se sua permeabilidade, pois através da permeabilidade é que a água juntamente com os meios agressivos atravessa o concreto levando consigo sulfatos, cloretos e outros componentes deletério aos concreto.

Segundo Silva (1993), a permeabilidade do concreto está relacionada diretamente com o tamanho, distribuição e continuidade dos poros da pasta, tendo influencia também a permeabilidade dos agregados, zona de transição, condições de lançamento e cura.

De acordo com Kakizaki et al. (2000), a relação A/C interfere diretamente na permeabilidade do concreto e quando se utilizada adições como fly ash a diminuição da permeabilidade é mais acentuada ainda. Em pesquisa realizada pelos autores, quando não se utiliza adições, há uma variação na permeabilidade até a relação $A/C=0,46$, depois disso a permeabilidade se torna constante.

Quando se utilizou aditivos superplastificantes e agentes de redução de segregação não houve grandes variações, sendo que a adição de fly ash foi mais impactante na permeabilidade ao ar. Portanto, quando se utiliza adição de fly ash no concreto, na ordem de 60 a 150 kg/m³ se obtém uma redução na permeabilidade ao ar de 70 a 50% comparado ao concreto sem fly ash. A Figura 3.2 ilustra a variação da permeabilidade em função da relação A/C. Onde a constituição das curvas A, B e C são dadas em função da Tabela 3.2.

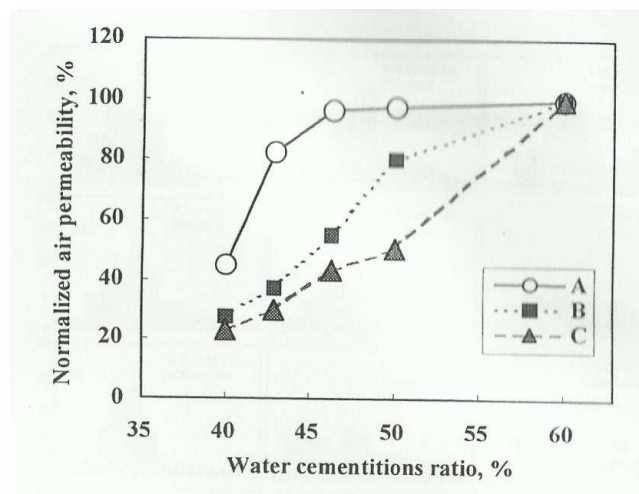


Figura 3.2: Variação da permeabilidade em função da relação A/C (KAKIZAKI et al., 2000).

Tabela 3.2: Composição dos traços das Curvas de permeabilidade da Figura 3.2 (KAKIZAKI et al., 2000).

Tipo do concreto	a/c	(kg/m³)			Tipo de aditivo			
		Água	Cimento	Fly ash	SP(%)		SC(%)	
					Mt	Nt	Ce	P
A1	0,6	180	300	0	3,5		0,5	
A2	0,5		360		2,9		0,5	
A3	0,462		390		2,6		0,4	
A4	0,429		420		2,5		0,3	
A5	0,4		450		2,5		0,2	
B1	0,6	180	300	0	3,5		0,5	
B2	0,5			60	3,0		0,5	
B3	0,462			90	2,7		0,4	
B4	0,429			120	2,6		0,3	
B5	0,4			150	2,6		0,2	
C1	0,6	180	300	0		5,5		5
C2	0,5			60		3,4		5
C3	0,462			90		3,4		4
C4	0,429			120		3,4		3
C5	0,4			150		3,4		2

Sendo:

SP – Aditivo superplastificante;

SC – Aditivo de controle de segregação;

Mt – Aditivo a base de melanina;

Nt – Aditivo a base de naftaleno;

Ce – Aditivo de éter de celulose solúvel em água;

P – Policrilamina (polylcrylamide)

Segundo Neville (1997), os principais fluídos que podem penetrar no concreto são: água (pura ou contaminada com íons agressivos), dióxido de carbono e o próprio oxigênio, dessa forma a durabilidade de uma argamassa ou concreto está diretamente ligada com sua permeabilidade, pois dependendo da facilidade com que os fluídos se deslocam no interior do concreto / argamassa, maior será a exposição da pasta de cimento a meios agressivos. Sendo assim a permeabilidade do concreto / argamassa é governada pelo sistema de poros do interior da pasta e da interface com o agregado, mais conhecido como zona de transição.

Segundo Silva (1993), os poros da matriz são divididos conforme abaixo:

- Poros grandes ou macroporos (dimensão maior que $5 \times 10^4 \text{ \AA}$), sendo provenientes de defeitos na execução do concreto e dosagem (relação A/C maior que a necessária);
- Poros capilares (dimensão maior que 500 \AA),
- Mesoporos (dimensão entre 26 a 500 \AA), juntamente como os poros capilares estão relacionados com a estrutura do C-S-H;
- Microporos (dimensão menor que 26 \AA).

Obs.: sendo que os poros menores não são interconectados.

O estudo dos poros na pasta é bastante complexo, pois para uma pasta com a mesma quantidade e tamanho de poros, mas sendo eles descontínuos, a permeabilidade será menor. Neville (1997) destaca três principais fenômenos de transporte que governam a entrada de fluídos no concreto:

- Permeabilidade: que é o escoamento sob diferencial de pressão, sendo característico de material saturado;
- Absorção capilar: sucção da água por forças capilares de poros abertos, sendo que este fenômeno só ocorre em concretos parcialmente secos;
- Difusão: é o deslocamento de fluído por diferença de concentração, além dos gases e íons agressivos.

A água é fundamental para a hidratação dos componentes do cimento Portland, mas somente uma pequena parte desta água é necessária para a hidratação, a maior parte é adicionada ao concreto apenas para promover trabalhabilidade, e esse excesso de água, o qual os componentes do cimento não utilizam, vai ficar livre dentro da pasta / concreto ou evaporar, deixando espaços vazios os quais são a porta de entrada para sua degradação.

O grau de hidratação também influencia na porosidade da pasta / permeabilidade, pois quanto mais curado, menores serão os vazios. A qualidade da cura influencia diretamente na permeabilidade (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Powers (1962, apud MEHTA & MONTEIRO, 2008) estudou a variação na porosidade capilar com diferentes graus de hidratação em pastas do cimento, contendo diferentes relações A/C. Com base neste trabalho, Mehta & Monteiro (2008) ilustram o processo de redução de porosidade capilar com o aumento no grau de hidratação Figura 3.3 (caso A) e com a redução na relação A/C, Figura 3.4 (caso B).

CASO A: 100 cm³ de cimento, a/c constante = 0,63, diferentes graus de hidratação (como mostrado)

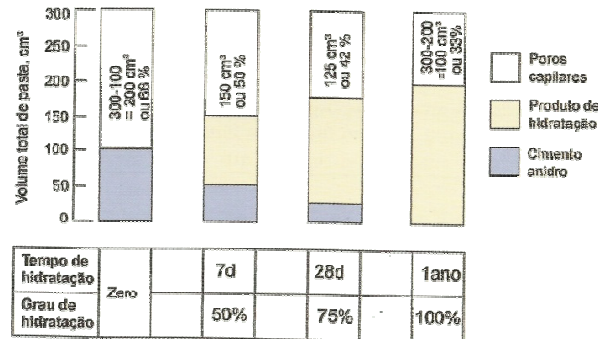


Figura 3.3: Diminuição da porosidade capilar em função do grau de hidratação (Caso A) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Conforme mostra a Figura 3.3, uma pasta com relação A/C= 0,63 e 100cm³ de cimento requer 200cm³ de água, totalizando 300cm³. Dessa forma o volume de sólidos após a cura é de 150, 175 e 200cm³ e o espaço vazio se dá em função da diferença entre o espaço total disponível menos o volume total de sólidos, resultando em 50, 42 e 33%, respectivamente. Isso baseado nas condições descritas pela ASTM C31, a qual considera uma cura úmida a 23±1° C até a o momento do ensaio o que proporciona um grau de hidratação aos 7, 28 e 365 dias de 50, 75 e 100% respectivamente.

CASO B: 100 cm³ de cimento, 100% de hidratação, diferentes relações a/c (como mostrado)

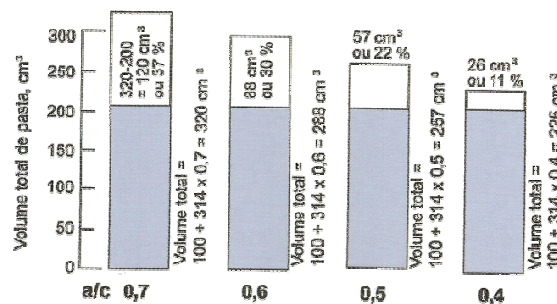


Figura 3.4: Diminuição da porosidade capilar em função da variação da relação A/C (Caso B) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Para o caso B, considera-se um grau de hidratação total de 100% para as respectivas pastas de cimento, com uma relação A/C variando de 0,7, 0,6, 0,5 e 0,4, no qual para um determinado volume de cimento fixo, a pasta com maior quantidade de água promoverá um maior volume de poros, porém todas as pastas terão o mesmo volume de produto hidratado. Nesta linha, 100cm³ de cimento produziram 200cm³ de produto hidratado para as pastas, mas como as pastas têm diferentes quantidades de água, 0,7, 0,6, 0,5 e 0,4, obteve-se um espaço vazio total calculado de 320, 288, 257 e 225cm³ o que corresponde a um vazio capilar de 37, 30, 22 e 11% respectivamente. Ou seja, se considerarmos uma pasta de cimento com relação A/C de 0,32, não haverá poros capilares, sendo que uma pasta de cimento genericamente precisaria de apenas 32% de água para sua total hidratação. Ou seja, a relação A/C influencia diretamente na absorção capilar do concreto / argamassa (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Powers (1962, apud MEHTA & MONTEIRO, 2008) mostra que a função exponencial $f_c = ax^3$ representa a variação da resistência à compressão em função da variação da relação sólidos-espaço (x), na qual “a” é uma constante igual a 234 MPa. Portanto, dependendo do grau de hidratação, 25, 50, 75 e 100%, é possível calcular o efeito da variação da relação A/C na porosidade e na resistência utilizando a fórmula de Powers. Conforme a Figura 3.5.

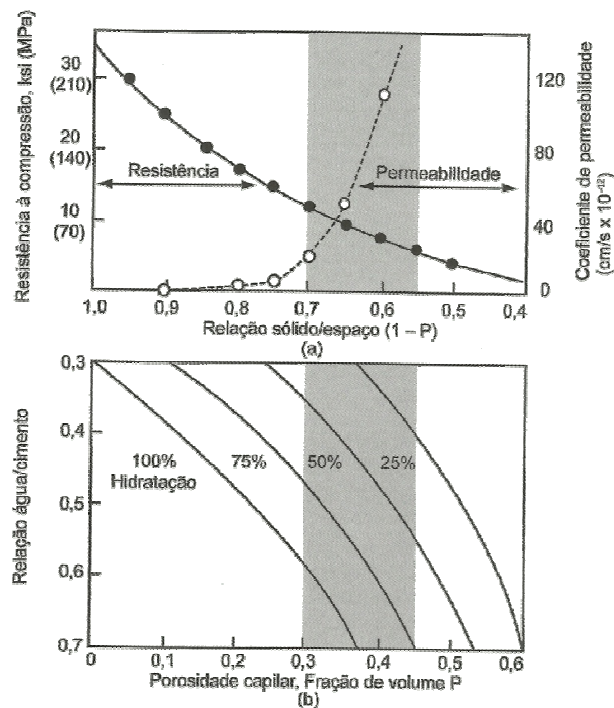


Figura 3.5: Fórmula de Powers para cálculo da porosidade e resistência em função da relação A/C (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

SILVA, 1993, destaca que em pastas, a descontinuidade da rede capilar é dada quando a porosidade capilar total está em torno de 30%, variando além do período de cura também em função da relação A/C conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Tempo necessário para interrupção da conectividade dos poros capilares.

Relação a/c	Idade em dias*
0,40	3
0,45	7
0,50	14
0,60	180
0,70	365
>0,70	Impossível

*Tempo em dias através de cura úmida contínua.

Segundo Neville (1997), a permeabilidade do concreto não é uma função simples da porosidade, em função da dimensão, tortuosidade e descontinuidade dos poros. A porosidade da pasta varia também em função de seu grau de hidratação, ou seja, em função do tempo, sendo que a redução do coeficiente de permeabilidade é mais rápida com menores relações A/C da pasta.

Neville (1997), destaca que com o aumento do consumo de cimento, ou seja menor relação A/C a permeabilidade é menor para o mesmo tempo de maturação da pasta.

A Figura 3.6 mostra a relação da absorção capilar em função da relação A/C.

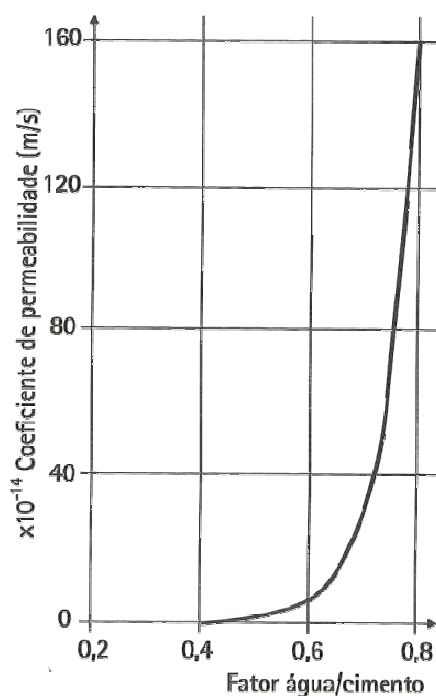


Figura 3.6: Influência da relação A/C no coeficiente de permeabilidade dos concretos (MILITITSKY et al., 2005).

3.3 Absorção Capilar do Concreto

Segundo Mehta & Monteiro (2008), a absorção capilar é uma boa medida de qualidade do concreto, pois está ligada diretamente com sua durabilidade, pois quanto menor a absorção, os íons agressivos terão maior dificuldade em penetrar no concreto, sendo comprovado de que quanto menor a relação A/C menor será a absorção capilar.

A absorção é influenciada pelo volume e pela conectividade dos poros capilares da matriz da pasta de cimento. A permeabilidade aumenta quando os poros estão secos, porque se tem um aumento na conectividade destes (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Em função das dificuldades para medir a absorção da matriz, na qual os erros de ensaio levam a resultados que não representam a realidade, e da permeabilidade na qual se força um fluxo de água sob pressão, e que pode não representar um modelo de durabilidade, desenvolveu-se o ensaio de Absorção capilar, o qual mede a velocidade da absorção capilar da matriz (Sorção). (NEVILLE, 1997).

Neville (1997), cita que o acréscimo de massa pode ser expresso como:

$$i = St^{0,5} \quad (3.1)$$

Onde:

i= acréscimo de massa (g/mm²), a partir do início do ensaio, por unidade de área transversal em contato com a água, e nesse caso como o ensaio é realizado em água, 1g equivale a 1mm³ “i” pode ser expresso em “mm”;
t= tempo em minutos no momento da determinação da massa;
S=sorção (mm/min^{0,5}).

Os valores do acréscimo de massa pode ser expresso em função da raiz quadrada do tempo conforme o gráfico da Figura 3.7.

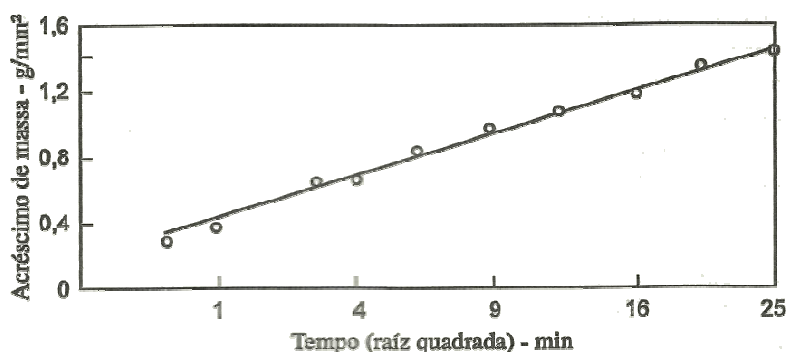


Figura 3.7: Relação entre acréscimo de massa por unidade de área e o tempo, usado para o cálculo da capilaridade (NEVILLE, 1997).

Neville (1997) sugere que alguns valores típicos de absorção capilar como para concretos de relação A/C na ordem de 0,4 a absorção capilar é de $0,09\text{mm}/\text{min}^{0,5}$.

Martins (2001) estudou a absorção capilar (com base na NBR 9779/95) em concretos com três tipos de cimentos, sendo eles: cimento Portland de alto-forno (com alta adição de escória), cimento Portland de alta resistência inicial (sem adição de escória) e cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (teor médio de adição) num traço com relação A/C de 0,42 e consumo de cimento na ordem de $375\text{ kg}/\text{m}^3$ em que observou-se o desempenho quanto à absorção capilar aos 28 dias para os respectivos cimentos, conforme Figuras 3.8 a 3.10.

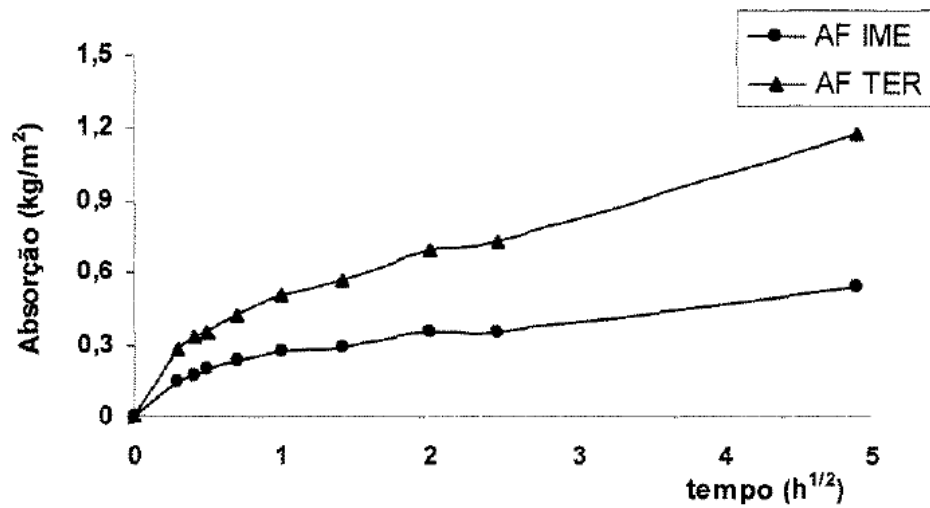


Figura 3.8: Absorção capilar até 24 horas de concreto confeccionado com cimento CPIII - alto-forno (AF) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (MARTINS, 2001).

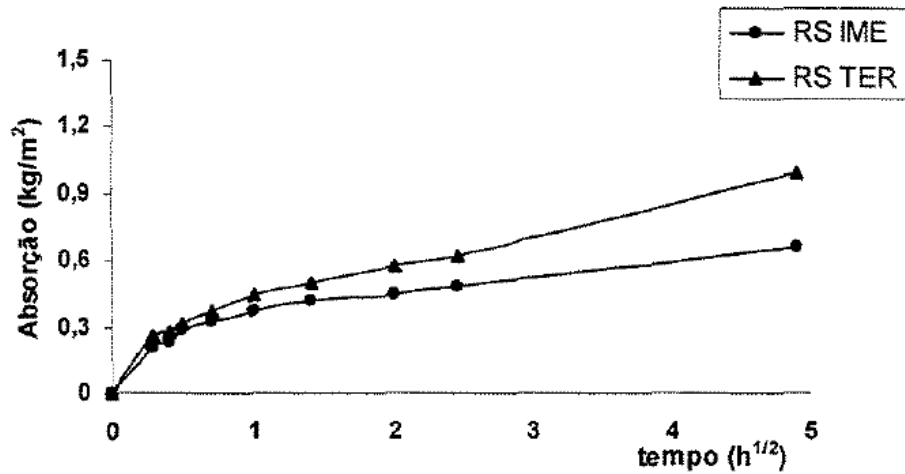


Figura 3.9: Absorção capilar até 24 horas de concreto confeccionado com cimento CPV ARI RS (RS) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (MARTINS, 2001).

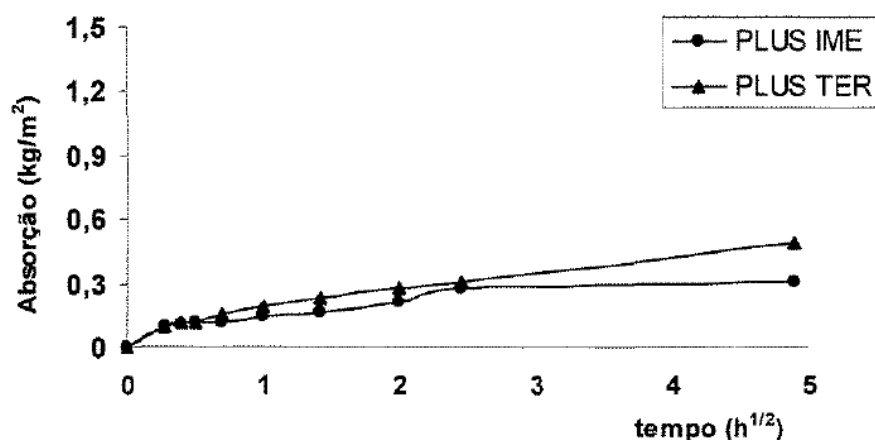


Figura 3.10: Absorção capilar até 24 horas de concreto confeccionado com cimento CPV Plus (RS) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (MARTINS, 2001).

Segundo Martins (2001), o volume de água adsorvida por poros menores que 10µm foi maior quanto maior a adição de escória. Abaixo segue o resumo do coeficiente de absorção capilar dos respectivos cimentos, Figura 3.11.

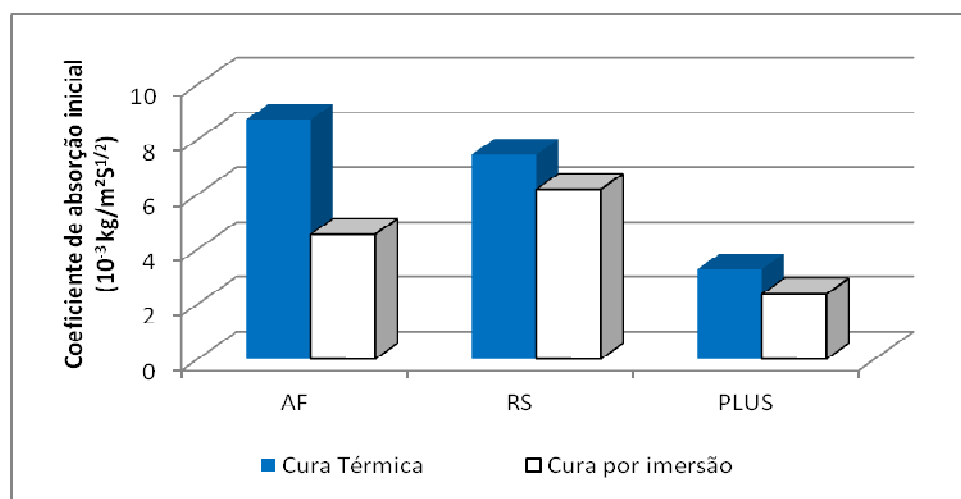


Figura 3.11: Coeficiente de absorção inicial aos 28 dias para os cimentos CPIII – alto-forno (AF), CPV ARI RS (RS) e CPV ARI Plus (Plus) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (Fonte adaptada de MARTINS, 2001).

Aos 180 dias as respectivas diferenças diminuem, conforme observa-se no gráfico da Figura 3.12.

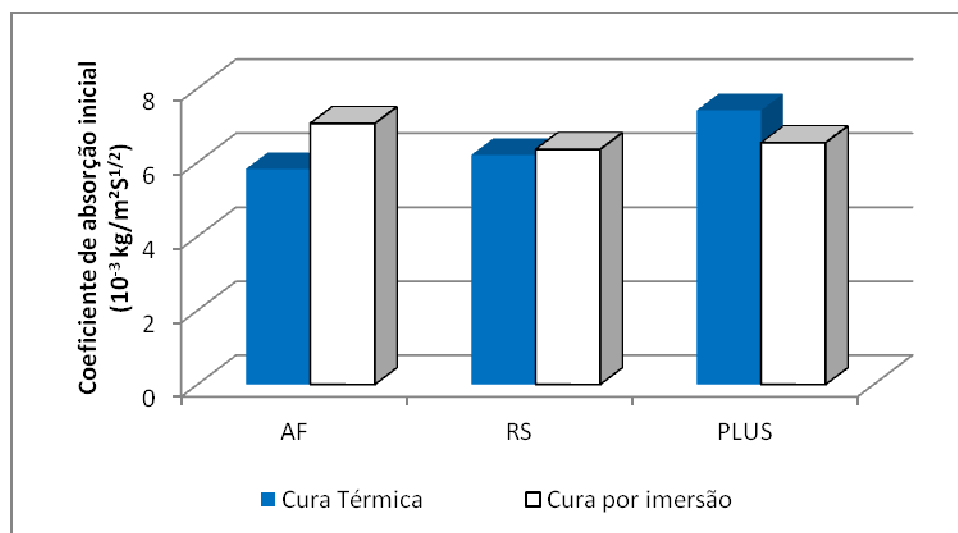


Figura 3.12: Coeficiente de absorção inicial aos 180 dias para os cimentos CPIII – alto-forno (AF), CPV ARI RS (RS) e CPV ARI Plus (Plus) para cura térmica (TER) e imersa (IME) (Fonte adaptada de MARTINS, 2001).

Obs.: A resistência à compressão axial mínima encontrada aos 28 dias pela autora foi de 40MPa.

3.4 Requisitos de Durabilidade

A NBR6118 (ABNT, 2007) contextualiza que a durabilidade é o tempo durante o qual as estruturas se mantêm com as características iniciais de construção, sem exigir medidas extras de reparo. Após esse período a estrutura começa a mostrar sinais de degradação.

As fundações por estarem enterradas, interagem diretamente com o solo em todos os sentidos na questão essencial de sua concepção, transferindo as cargas da estrutura ao solo. Também sofrem diretamente as ações deletérias ao material de sua constituição, conforme as condições em que estão inseridas no

presente, quando há contaminantes existentes, ou mesmo através de contaminações futuras que possam vir a ocorrer dependendo da área de risco.

Realizando um paralelo com as estruturas de concreto armado, a NBR 6118/2007 classifica alguns ambientes em função de seu grau de agressividade ao concreto conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Classes de agressividade ambiental (NBR 6118/2007).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1) 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1) 2)}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{1) 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

Onde:

¹⁾Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e área de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em : obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes e indústrias químicas.

Quando se fala em durabilidade, entende-se que a estrutura seja durável por um determinado tempo, o qual denomina-se vida útil do projeto, por isso é muito importante conhecer em quais condições a estrutura estará exposta durante sua vida útil. Segundo a NBR6118/2007, na falta de ensaios comprobatórios de durabilidade para as condições de agressividade, pode-se levar em consideração a relação A/C e resistência à compressão para mitigar ações deletérias ao concreto, conforme especificações da Tabela 3.5, baseado na classificação de agressividade do ambiente no qual o concreto ficará exposto já descrito na Tabela 3.4.

Tabela 3.5: Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto (NBR6118/2007).

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Onde:

- O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655/06.
- CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado;
- CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido;

Mehta & Monteiro (2008) destacam as principais recomendações desenvolvidas pela U.S. Bureau of Reclamation, para com a exposição a fontes de sulfatos, dividida em 4 classes conforme Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Classificação de severidade ao ataque por sulfatos (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Classificação	Sulfato no solo (%)	Sulfato na água (ppm)	Recomendações
Ataque negligenciável	<0,1	<150	Não há restrição quanto ao tipo de cimento nem da relação água / cimento.
Ataque moderado	0,1 a 0,2	150 a 1.500	Deve ser utilizado cimentos com adições de escória ou pozolana e relação água / cimento menor do que 0,5
Ataque severo	0,2 a 2,0	1.500 a 10.000	Deve ser utilizado cimentos com alto teor de adição (escória ou pozolana) e relação água / cimento menor que 0,45
Ataque muito severo	>2,0	>10.000	Deve ser utilizado cimentos com alto teor de adição (escória ou pozolana) mais uma adição extra de pozolana relação água / cimento menor que 0,45 e uma resistência aos 28 dias de no mínimo 29 MPa.

Segundo Barker & Matthews (1994) no Reino Unido, para garantir a durabilidade de um concreto, as normas tratam esse tema em função das condições de exposição, a relação máxima A/C, teor de mínimo de cimento e resistência mínima do concreto (BS5328), conforme Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Limites de durabilidade para o concreto – BS5328 (BARKER & MATTHEWS, 1994).

Condição de exposição	Tipo de concreto	Máxima relação a/c	Consumo de cimento mínimo	Classe de resistência mínima
Leve	Sem reforço – não estrutural	-	-	-
	Sem reforço - estrutural	0,8	220	C20
	Reforçado	0,65	275	C30
	Protendido	0,6	300	C35
Moderado	Sem reforço – não estrutural	-	-	-
	Sem reforço - estrutural	0,65	275	C30
	Reforçado e protendido	0,6	300	C35
Severo	Sem reforço	0,6	300	C35
	Reforçado e protendido	0,55	325	C40
Muito severo	Todos	0,55	325	C40
Mais do que severo	Sem reforço	0,50	350	C45
	Reforçado e protendido	0,45	400	C50
Abrasivo	Todos	0,5	350	C45

A Norma Europeia, ENV 206, apresenta os mesmos requisitos, porém com valores de consumo mínimo de cimento diferentes da BS5328, a qual apresenta valores menores de consumo de cimento para um determinado grau de agressividade, conforme Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Requisitos de durabilidade segundo a ENV 206 (BARKER & MATTHEWS, 1994).

Classe de exposição		Máxima relação a/c		Consumo de cimento mínimo	
		estrutural	protendido	estrutural	protendido
Seco		0,65	0,6	260	300
Úmido	a) sem congelamento	0,6	0,6	280	300
	b) congelamento	0,55	0,55	280	300
2b + sais de degelo		0,5	0,5	300	300
Água do mar	a) sem congelamento	0,55	0,55	300	300
	b) congelamento	0,5	0,5	300	300
*agressividade química	a) leve	0,55	0,55	280	300
	b) moderado	0,5	0,5	300	300
	c) severo	0,45	0,45	300	300

* Utilizar cimento resistente a sulfatos quando teor de sulfatos for > que 500 mg/kg (água) e >3.000 mg/kg (no solo)

Barker & Matthews (1994) estudaram as propriedades dos concretos quanto à durabilidade e observou-se menor desempenho em termos de durabilidade para dosagens com relações A/C variando entre 0,46 a 0,63 do que séries com a relação fixa em 0,60, mostrando que a relação A/C não é a única garantir a propriedade de durabilidade para o concreto para uma grande variedade de tipos de cimento.

Portanto para o estudo, os autores identificaram que a influência da composição do cimento influenciou mais na durabilidade do que a relação A/C. Portanto para definir parâmetros de durabilidade, os autores sugerem criar um fator k para o tipo de cimento, variando conforme sua adição.

No ensaio de permeabilidade ao oxigênio, cimentos mais puros apresentaram menor permeabilidade do que cimentos contendo 70% de adição de escória, porém esses, quando curados de 1 a 3 dias a mais em cura úmida, apresentam decréscimo na permeabilidade. Porém em 56 dias, o tipo de cura, tipo de cimento teve pouca influência.

Embora a resistência à compressão não seja garantia única de baixa permeabilidade e de durabilidade, é melhor indicador do que somente a relação A/C quando se trabalha com diversos tipos de cimento. Os autores sugerem que a relação A/C máxima seja determinada em função do tipo de cimento (BARKER & MATTHEWS, 1994).

Sanchez (1998) apresenta os requisitos de durabilidade sugeridos pela norma Europeia EH-91, conforme Tabela 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9: Requisitos de durabilidade segundo a norma EH-91 (SANCHEZ, 1998).

Tipos de ambiente	Descrição	Espessura de cobrimento (mm)
Ambiente I	Estruturas em interiores de edifícios com baixa umidade relativa do ar, não passa de 60% em mais de 90 dias do ano.	20
Ambiente II	Estruturas em ambientes normais, não agressivos e em contato com águas normais em terrenos comuns.	30
Ambiente III	Estruturas em atmosferas agressivas, industrial e marinha, ou em contato com solos agressivos ou com águas salinas ou ligeiramente ácidas.	40

Os valores podem diminuir se:

- em placas, peças protegidas ou pré-fabricadas: 5mm;
- em concretos de $250 \leq f_{ck} < 400$ kPa/cm²: 5mm;
- em concretos de $f_{ck} \geq 400$ kPa/cm²: 10mm.

Tabela 3.10: Parâmetros de dosagem de concreto segundo o ambiente que está inserido. (EH-91) (SANCHEZ, 1998).

AMBIENTE	RELAÇÃO A/C MÁXIMA	CONSUMO MÍNIMO DE CIMENTO (kg/m ³)	
		Concreto simples	Concreto armado
I	0,65	150	250
II	0,60	175	275
IIh	0,55	175	300
IIIf ⁽²⁾	0,50	200	300
III	0,55	200	300
IIIh	0,50	200	300
IIIIf ⁽²⁾	0,50	200	325
Quimicamente agressivo ⁽³⁾	0,50	200	325

Onde:

IIh e IIIh – condições de geada;

IIIf e IIIIf – utilização de sais para degelo.

Segundo Sanchez (1998) a classificação de agressividade ambiental mais conceituada é a elaborada pelo grupo de trabalho nº20 do Comitê Eurointernacional do Concreto (CEB), publicado em 1989 como boletim nº 182 do CEB com o título: Guia CEB de estruturas de concreto duráveis, conforme Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Tipo de exposição para estruturas duráveis (Guia CEB) (SANCHEZ, 1998).

Tipo de exposição		Condições ambientais
1		<p>Ambientes seco, ex:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interior de edifícios - Exterior de edifícios não expostos ao vento nem a intempéries do solo e da água.
2	a	<p>Ambiente úmido sem gelo, ex:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interior de edifícios com alta umidade - Elementos externos expostos a vento e a toda intempéries menos geadas. - Elementos em contato com solos e a águas agressivas mas não expostos a geadas.
	b	<p>Ambientes com gelo, ex:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elementos exteriores expostos ao vento e a intempéries, solos agressivos e ou águas e gelo
3		<p>Ambientes úmidos com gelo e agentes de degedo, por exemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elementos exteriores expostos ao vento e as intempéries dos solos não agressivos e/ ou água e gelo e sais de degelo.
4	a	<p>Ambiente de água do mar, por exemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elementos na zona de interface água e ar - Elementos em áreas costeiras sujeitas a maresia.
	b	<p>Ambientes com água do mar com gelo, por exemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elementos na zona de interface água e ar; - Elementos em áreas costeiras sujeitos a maresia
5 ⁽⁴⁾	a	Ambientes químicos ligeiramente agressivo.
	b	Ambiente químico moderadamente agressivo.
	c	Ambiente químico altamente agressivo.

⁽²⁾ Nesses casos devem ser utilizados incorporadores de ar que gerem cerca de 4,5% de ar incorporado.

⁽³⁾ Em caso particular de existência de sulfatos, o consumo mínimo de cimento para concretos simples, deve ser de 250kg/m³. Para teores de sulfatos na ordem de 3.000mg/kg no solo ou 400mg/l na água deve ser utilizado um cimento resistente a sulfatos.

⁽⁴⁾ Para o ambiente tipo 5, a definição dos ambientes é dado pelas Tabelas 3.12 e 3.13.

Tabela 3.12: Parâmetros químicos para avaliação da agressividade de águas e solos para definição do nível de exposição ambiental tipo 5 (CEB) (SANCHEZ, 1998).

Parâmetros químicos de agressividade	Tipo de exposição			
	5a	5b	5c	
	Ataque fraco	Ataque moderado	Ataque forte	Ataque muito forte
Água:				
Valor do pH	6,5 a 5,5	5,5 a 4,5	4,5 a 4,0	<4,0
CO2 agressivo (Mg CO ₂ /l)	15 a 30	30 a 60	60 a 100	>100
Íons de amônia (mg NH ₄ ⁺ /l)	15 a 30	30 a 60	60 a 100	>100
Íons de magnésio (Mg Mg ²⁺ /l)	100 a 300	300 a 1500	1500 a 3000	>3000
Íons de sulfatos (Mg SO ₄ ²⁻ /l)	200 a 600	600 a 3.000	3.000 a 6.000	>6.000
Solos				
Grau de acidez segundo Baumann-Gully	>20	-	-	-
Íons sulfatos (Mg SO ₄ ²⁻ /kg de solo seco)	2.000 a 6.000	6.000 a 12.000	12.000	-

Tabela 3.13: Requisitos para concretos duráveis inseridos em ambientes agressivos ⁽⁵⁾ (CEB) (SANCHEZ, 1998).

Tipo de exposição	4 ^a	4b	5a			5b	5c	
Grau de ataque	-	-	Fraco			Médio	Forte	Muito Forte
- Tipo de cimento	MR ⁽⁶⁾	MR ⁽⁶⁾	CEM ⁽⁷⁾	CEM ⁽⁷⁾	SR ⁽⁶⁾	SR ⁽⁶⁾	SR ⁽⁶⁾	SR ⁽⁶⁾
- Relação água cimento máxima	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45	0,45
Consumo mínimo de cimento (kg/m³)	300	300	300	330	300	330	370	370
Penetração máxima de água (mm)	30	30	50			30	50	Não se aplica
-Proteção adicional ao concreto	Não é necessária							Necessária

⁽⁵⁾Quando o teor de sulfatos for maior que 400mg/litro na água e 3.000mg/kg no solo.

⁽⁶⁾Cimentos com características especiais “SR” a “MR”, segundo a UNE 80303:1996.

⁽⁷⁾Cimento comum “CEM”, segundo UNE 80301:1996, sem requisitos especiais para sua composição.

Sanchez (1998) destaca três formas de degradação do concreto para ambientes marinhos:

1 – Degradação por lixiviação do hidróxido de cálcio livre e hidrólise do silicato de cálcio;

2 – Degradação por formação de produtos secundários, solúveis, formados pela ação de sais de magnésio contidos na água com os componentes do cimento;

3 – Degradação pela formação de componentes expansivos através de ataques de fontes de sulfatos ao aluminato de cálcio do cimento.

Se analisados os três mecanismos de degradação isoladamente, poderia se dizer que não é possível utilizar concreto de cimento Portland nessas condições. Porém todos esses componentes agindo de forma simultânea reduzem substancialmente o grau de deterioração. Isso se dá em função da presença conjunta de íons de cloro e concentração de sulfatos, os íons de cloro inibem, até certo ponto, a ação do sulfato e são capazes de reagir com o aluminato de cálcio, formando o cloro aluminato de cálcio hidratado (sal de Friedel) o qual não é expansivo, assim o cloro que reage com o aluminato formando o sal de Friedel bloqueia a formação de etringita secundária.

3.5 Agressividade dos Solos

Segundo Karmann (2003) a água é a substância mais abundante na superfície do planeta, sendo ela participante ativo no processo de intemperismo do solo, modelando pela dissolução os materiais terrestres. Denominando a água como o melhor e mais comum solvente disponível na natureza, dessa forma a água tem um papel fundamental no intemperismo químico através da hidrólise.

Toledo et al. (2003) relata que o ciclo da água tem grande influência no intemperismo químico, sendo a água de chuva o principal agente do intemperismo químico, pois essa água, rica em O_2 , em interação com o CO_2 da atmosfera, adquire caráter ácido, e em contato com o solo, onde a respiração das plantas pelas raízes e a oxidação de material orgânico enriquecem o ambiente com CO_2 , diminui ainda mais o pH solo.

Segundo Toledo et al. (2003) a maioria das rochas são formados por silicatos, que podem ser caracterizados como sais de um ácido fraco (H_4SiO_4) e de bases fortes ($NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$) e quando em contato com a água, os silicatos sofrem hidrólise resultando numa solução alcalina. A hidrólise ocorre com o pH na faixa de 5 a 9.

A estabilidade das ligações de um cimento endurecido pode ser prejudicada ou mesmo desaparecer por ação de reações químicas como a lixiviação do cimento endurecido ou através de expansão geralmente provocada pela formação de novas combinações sólidas no cimento endurecido. A lixiviação pode ocorrer por água doce, por ácidos, por sais ou por graxas e óleos. Quanto às expansões elas se dão através de ataques por sulfatos. Portanto, pode ocorrer a hidrólise e também a formação de cristais expansivos simultaneamente pela passagem de águas que contenham diversas substâncias agressivas pela pasta de cimento hidratada (BAUER, 1985).

Portanto da mesma forma que o solo sofre as ações da movimentação da água no subsolo, também o concreto / argamassa de composição das estacas sofrerão com as ações do intemperismo, tais ações agem diretamente na pasta de cimento hidratada, sendo ela mais suscetível ao ataque. Assim, é de suma importância o conhecimento das características do solo e a escolha dos materiais constituintes do concreto / argamassa e sua melhor dosagem a fim de aumentar o desempenho desta fundação.

Segundo Bauer (1985) o mais importante ainda do que saber quais substâncias deletérias à pasta de cimento existente no solo, é necessário conhecer sua concentração, dessa forma classificando o grau de agressividade em faixas.

Toledo et al. (2003) sugere o exame dos solos para o conhecimento das variáveis e indica que os solos agressivos são reconhecidos pela coloração, que pode variar de castanho a castanho-amarelado para solos normais, de cor negra até cinza, principalmente os que apresentam manchas de ferrugem (vermelho castanho), esses podem ser classificados como solos suspeitos, os que apresentam camadas de cor cinza-claro até branca, sob solos vegetais castanho-escuro até negros indicam um caráter ácido. Sendo as condições mais extremas descritas abaixo:

- Solos com sulfatos: aparecem principalmente em formações de mineração, período jurássico, era terciária, cujas sedimentações levam anidrita e gesso.
- Solos pantanosos: os solos pantanosos, turfas e lodaçais, geralmente possuem substâncias que são deletérias a pasta de cimento como o gás carbônico, que dissolve a cal, ácidos minerais livres, principalmente em forma de ácido sulfúrico, sulfatos e ácidos orgânicos.
- Aterros de Resíduos: solos contaminados com resíduos industriais podem conter quantidades expressivas de ácidos livres, sulfetos, sulfatos, determinados tipos de sais e outros componentes deletérios a pasta de cimento endurecida.

Nas Tabelas 3.14 e 3.15, Bauer (1985) define valores para a avaliação da agressividade dos solos.

Tabela 3.14: Valores-limite para avaliação da agressividade dos solos (BAUER, 1985).

Exame		Intensidade da agressividade	
		Fraca agressividade	Forte agressividade
1	Grau de acidez, segundo Baumann-Gully	acima de 20	-
2	Sulfato (SO_4^{2-}) em mg/kg de solo seco ao ar	2.000 a 5.000	acima de 5.000

Obs.: Para teores de sulfatos acima de 3.000 mg SO_4^{2-} / kg de solo seco ao ar deve ser empregado cimento de alta resistência ao sulfato (BAUER, 1985).

Tabela 3.15: Agressividade da água devida a substâncias dissolvidas (BAUER,1985).

Agressividade da água		A				B							C		
		Ação principal: hidrólise dos compostos cálcicos do concreto e lixiviação				Ação principal: troca química, Ação secundária: lixiviação							Ação principal: reações químicas e fissuras.		
		Resíduo de evaporação				Ação ácida, Troca iônica			Troca iônica, Ação ácida				Etringita e gesso	Gesso e etringita	Gesso mg (OH) ₂ sais amônicos
		Resíduo de evaporação de água filtrada mg/l	Presença simultânea de carbônico agressivo e pH		Teor de CaO mg/l	pH	Agressão do carbônico à cal CO ₂ agressivo		Mg ⁺⁺ mg/l Magnésio	Amônio NH ₄ ⁺ mg/l		Sulfetos sulfurosos S ⁼ mg/l	(ml/g) sulfatos SO ₄ ²⁻		
CO ₂ Mg/l	pH		CO ₂ agresivo mg/l	Dureza dos carbonatos graus alemães			Para NO ₃ ⁻ ≤ 150 mg/l	Para NO ₃ ⁻ ≥ 150 mg/l		Mg ⁺⁺ < 100mg/l NH ₄ ⁺ < 100 mg/l			Mg ²⁺ ≥ 100mg/l HN ₄ ⁺ ≥ 100 mg/l		
										Cl ⁻ <1000 mg/l	Cl ⁻ ≥ 1000 mg/l				
I	Nula	>150	-	-	>100	>6	<10		<100	<100	<50	<1	< 200	< 250	<100
II	Debilmente agressiva	150 a 50	0 a 5	≥6	100 a 50	6,0 a 5,5	<10	>0,2	100 a 150	100 a 150	50 a 100	1 a 10	200 a 350	250 a 400	100 a 200
							10 a 40	> 2,0							
III	Agressividade média	150 a 50	>6	<6	<50	5,5 a 5,0	<10	<0,2	150 a 250	150 a 250	100 a 150	> 10	350 a 600	400 a 700	200 a 350
							10 a 40	0,2 a 2,0							
							40 a 90	>2,0							
IV	Forte Agressividade	<50	0 a 5	>5, 5	-	5,0 a 4,0	10 a 40	<0,2	250 a 500	250 a 500	150 a 250	-	600 a 1200	700 a 1500	350 a 600
							40 a 90	>2,0							
							>90	Seja qualquer dureza							
V	Fortemente Agressiva	<50	>5	<5, 5	-	4,0 a 3,0	-	-	> 500	> 500	> 250	-	> 1200	> 1500	> 600

Neville (1997) apresenta uma classificação segundo à severidade da concentração de sulfatos segundo a ACI 201.2R-92, conforme a Tabela 3.16.

Tabela 3.16: Classificação da severidade do ambiente de sulfato, baseado na ACI 201.2R-92 (NEVILLE, 1997).

Exposição	Concentração de sulfatos solúveis em SO_4	
	No solo (%)	Na água (ppm)
Leve	<0,1	<150
Moderada	0,1 a 0,2	150 a 1.500
Severa	0,2 a 2,0	1.500 a 10.000
Muito Severa	>2,0	>10.000

3.6 Fatores Mitigadores para o Ataque por Fontes de Sulfatos

Segundo Neville (1997) deve-se dar uma grande importância para o conhecimento da severidade em que será inserido o concreto para criar mecanismos de proteção a fim de prolongar a vida útil. Basicamente pode-se atuar em duas linhas quanto ao cimento:

- Utilizar cimentos com teor de C_3A limitado;
- Utilizar cimentos que gerem menor teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou seja que contenham adições a fim de consumir esse hidróxido de cálcio hidratado;
- Trabalhar com uma relação A/C máxima;
- Trabalhar com uma resistência à compressão mínima;
- Trabalhar com um teor de cimento mínimo.

Porém Neville (1997) destaca que não se tem base científica para assegurar de que o teor mínimo de cimento assegure uma melhora no desempenho contra ataque a sulfatos.

De acordo com a Building Research Establishment Digest (1981, apud MEHTA & MONTEIRO, 2008), para concentrações de sulfatos de forma severa,

devem ser utilizados cimentos com resistências a sulfatos, uma relação A/C de no máximo 0,45 e um consumo de cimento mínimo de 370 kg/m³ e também deve aplicar uma camada protetora no concreto.

Mas somente o consumo mínimo não garante a durabilidade, Mather (1976, apud NEVILLE, 1997) exemplifica que com um concreto com 356 kg/m³ de cimento Portland comum é possível obter resistências de 14 a 41MPa, dependendo é claro da relação A/C e do abatimento, e por sua vez esses concretos terão resistência ao ataque a sulfatos bem distintas.

De acordo com Mehta & Monteiro (2008) o ataque por sulfatos é mais expressivos em peças que ficam em contato parcial com o solo / atmosfera como muros de arrimo, porões e lajes sobre o solo, sujeito à evaporação da água, que por sua vez concentra os íons sulfatos, do que estruturas que estejam enterradas sujeitas à ação de águas com sulfatos por todas as direções como as fundações e estacas.

Um estudo feito por Verbeck (1968 apud MEHTA & MONTEIRO, 2008) mostra a influência do consumo de cimento e do teor de C₃A do cimento na deterioração por ataque de sulfatos, onde o gráfico da Figura 3.13 mostra um estudo realizado em Sacramento, Califórnia. Corpos de prova ficaram expostos a solo sulfatado (contendo 10% de Na₂SO₄) o qual mostra que a baixa permeabilidade do concreto em função do alto consumo de cimento é mais importante que o teor de C₃A no combate ao ataque por sulfatos.

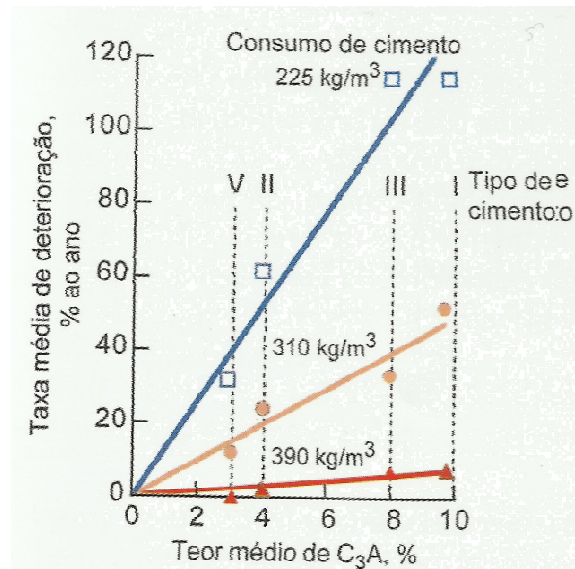
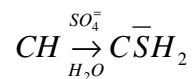


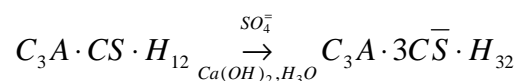
Figura 3.13: Influência do consumo de cimento e C₃A na deterioração por ataque de sulfatos. Estudo realizado por Verbeck (1968 apud MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Portanto Mehta & Monteiro (2008) destacam que a baixa permeabilidade é a melhor proteção contra o ataque por sulfato, sendo que o alto consumo de cimento, baixa relação A/C, adensamento adequado e uma boa cura proporcionará um concreto mais durável e mais resistente ao ataque por fontes de sulfatos.

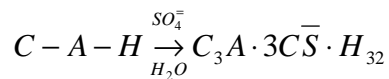
Segundo Borsoi et al. (2000) concretos expostos a fontes de sulfatos formam dois subcomponentes que prejudicam a matriz, etringita e taumasita. Primeiramente a fonte de sulfatos em contato com o hidróxido de cálcio livre do cimento forma o “gesso”:



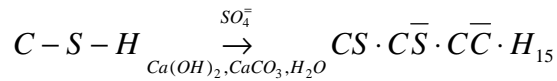
- Etringita:



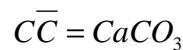
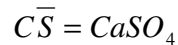
- Etringita:



- Taumasita:



Onde:



Para manter as características do concreto quanto ao ataque de sulfatos, Borsoi et al. (2000) apresenta duas estratégias a serem seguidas:

- Adotar uma baixa relação A/C para se ter baixa porosidade diminuindo assim a penetração de sulfatos para dentro do concreto;
- Utilizar cimento resistente a sulfatos.

A recomendação da ACI, normas Europeias e normas japonesas sugerem a adoção de baixas relações A/C, na ordem de 0,55 a 0,50 para concretos inseridos em ambientes de moderada concentração de sulfatos ($SO_4^{2-} < 1.000$ mg/L na água). Para concretos inseridos em ambientes de alta concentração de sulfatos ($SO_4^{2-} < 3.000$ mg/L na água), deve utilizar relações A/C na ordem de 0,50 a 0,45 combinado com a utilização de cimento resistente a sulfatos.

Segundo Schulze (1999), a absorção capilar das argamassas é função da relação A/C e teor de cimento. O autor estudou uma gama de dosagens de argamassas, variando a relação A/C e consumo de cimento, conforme gráfico da Figura 3.14.

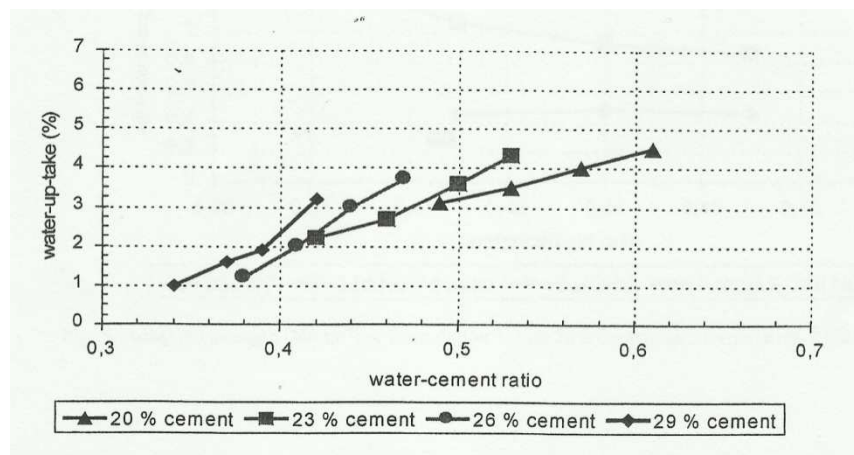


Figura 3.14: Estudo da absorção capilar realizado por Schulze, 1999.

Quanto menor a relação A/C menor será a absorção capilar, e com o acréscimo de cimento mantendo a relação constante há uma diminuição da absorção capilar.

3.7 Patologia das Fundações

Segundo Helene et al. (2004), um dos agravantes para as fundações é que elas estão enterradas, sendo quase impossível a identificação de falhas sem o auxílio de equipamentos / técnicas avançadas. Também qualquer intervenção além de muito onerosa, é de difícil acesso o que complica ainda mais o tratamento de patologias.

Helene et al. (2004) classifica as patologias das fundações em:

- Problemas devido às falhas no projeto: falhas de dimensionamento, escolha inadequada da fundação, falta de conhecimento sobre o comportamento do solo entre outros;
- Problemas devido às falhas na execução: execução fora dos parâmetros especificados no projeto, desaprumo, excentricidade e outros;
- Problemas devido à má qualidade dos materiais utilizados na etapa de execução: problemas na especificação dos materiais, utilização de materiais inadequados ou contaminados;

- Problemas devidos a fatores externos (etapa de uso): problemas devido ao teor de umidade do solo, escavação de terrenos vizinhos, ataques por agentes agressivos e outros;
- Problema devido à mudança de uso da edificação: carregamentos não previstos no projeto e outros;

Quando se fala em patologia do concreto em fundações, resumem-se em três fatores: execução, materiais e fatores externos. Portanto conhecendo bem a agressividade adequada, ter-se-á projetos mais bem elaborados com menor chance de gerar uma patologia.

Silva (1993) resume os principais problemas de fundações referentes ao concreto, conforme listado abaixo:

- Etapa de execução.
 - Má concretagem ou inadequado adensamento do concreto: levam a existência de ninhos de concretagem, reduzindo a capacidade de carga e aumentando a permeabilidade do concreto.
 - Má dosagem do concreto resultando em um material inadequado causando segregação, exsudação do concreto, consequentemente com baixa resistência mecânica e alta porosidade;
 - Erro na locação das armaduras, falta de espaçadores gerando um cobrimento inadequado;
 - Falta de rigidez das armaduras o que resulta na flambagem das armaduras e perda de espessura mínima de cobrimento;
 - Excesso de armadura e insuficiente trabalhabilidade do concreto resultam na redução da seção do fuste;
 - Procedimento inadequado de concretagem provoca o desmoronamento de parte da escavação que se mistura com concreto o que prejudica a resistência e durabilidade;

- Etapa de execução - materiais.
 - Uso de materiais de baixa qualidade que resulta em concreto com características inadequadas;
 - Uso de areia contaminada causa reações expansivas deletérias no concreto (sulfatos) e/ou corrosão das armaduras da fundação (cloretos);
 - Uso de agregados reativos, com risco de expansão por reação álcali-agregado;
 - Uso de água contaminada (água do mar, águas salobras), prejudica a pega e consequentemente a resistência do concreto como também a corrosão;
- Fatores externos:

Ataques por agentes agressivos que causam expansão como por sulfatos ou corrosão da armadura no caso de cloretos.

A Figura 3.15, mostra o resultado de uma pesquisa realizada por Silva (1993) no Rio Grande do Sul, a qual mostra as principais causas de patologia nas fundações.

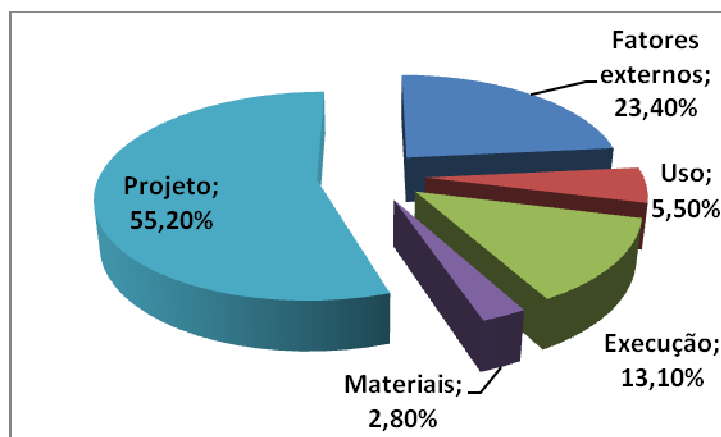


Figura 3.15: Estudo da incidência das patologias de fundações no Rio Grande do Sul quanto a sua origem (Fonte adaptada de SILVA, 1993).

Segundo Helene et al. (2004), o valor de patologias mostrado no gráfico da Figura 3.15 pode ser maior, pois há pouco estudo desses casos. Mas quando se

fala somente em fundações profundas há um ligeiro aumento no percentual de patologias provenientes da execução e materiais, conforme Figura 3.16.

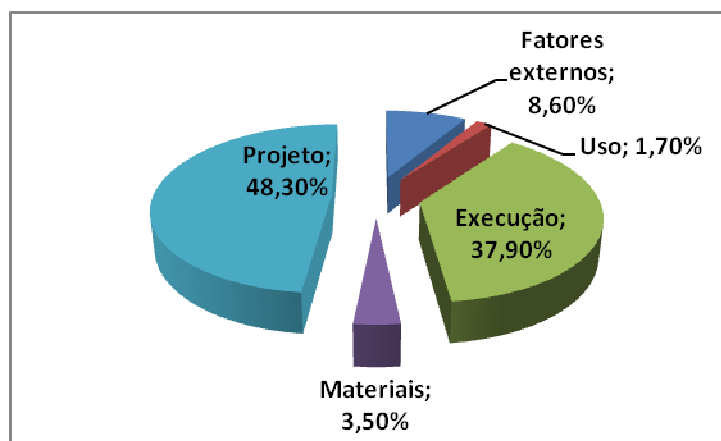


Figura 3.16: Incidência das patologias em fundações profundas no Rio Grande do Sul quanto a sua origem (Fonte adaptada de SILVA, 1993).

Helene et al. (2004) descreve que esse aumento nos problemas quanto ao material não deveria ocorrer, pois para fundações profundas se utiliza maior tecnologia acompanhada.

Segundo Maña (1978), o uso do concreto bem dosado, na consistência correta e aplicado de forma criteriosa promoverá estacas mais eficientes e duráveis.

Estudos realizados por Montoya (2001) destacam a importância da ciência dos materiais de preenchimento das fundações, porém identificou-se que esta questão é de responsabilidade distante da engenharia de fundações, o que afasta ainda mais da tecnologia do concreto reduzindo a interação entre eles deixando com que problemas que poderiam ser resolvidos se repitam.

3.8 Qualidade dos Materiais

A qualidade dos materiais vai influenciar diretamente no desempenho da argamassa tanto no estado fresco como no endurecido. As argamassas para preenchimento de estaca raiz são compostas por três componentes, cimento, areia e água.

Os cimentos, por serem produtos industrializados, possuem um grande controle de qualidade e os fabricantes disponibilizam seus respectivos boletins de qualidade, os quais devem ser compatíveis com as recomendações das respectivas normas em que o cimento se classifica.

Já quando se fala nas areias, o assunto fica um pouco mais complicado, porque as areias nem sempre possuem certificados de qualidade e muitas vezes, dependendo da localidade já podem vir contaminadas com produtos orgânicos já na sua extração. Petrucci (1987) comenta que, uma areia contaminada por material pulverulento como argilas e siltes, pode dificultar o contato efetivo do grão de areia com a pasta de cimento, promovendo baixa resistência à compressão. O mesmo ocorre se a areia estiver contaminada por material orgânico como húmus, que além de tudo inibe a reação do cimento dependendo de seu grau de contaminação.

A água para o amassamento deve ser potável. Segundo Petrucci (1978), toda a água utilizada para beber pode ser utilizada para confecção de concretos e argamassas, porém a recíproca não é verdadeira, pois algumas águas que não causam problemas ao concreto podem não ser ideais para o consumo humano.

Na Tabela 3.17, Petrucci (1978) descreve os limites de concentração na água de amassamento para as substâncias nocivas à pasta de cimento.

Tabela 3.17: Limites de concentração na água de amassamento para as substâncias nocivas a pasta de cimento (PETRUCCI, 1978).

Impurezas	Concentração máxima tolerável na água de amassamento
Carbonatos e bicarbonatos de sódio e potássio	1.000 ppm (0,1%)
Cloreto de sódio	20.000 ppm (2%)
Sulfato de sódio	10.000 ppm (1%)
Bicarbonato de cálcio e magnésio	400 ppm (0,04%)
Cloreto de cálcio	10.000 ppm (1%)
Sais de ferro	40.000 ppm (4%)
Iodato de sódio, fosfato de sódio, arseniato de sódio e borato de sódio	500 ppm (0,05%)
Sulfito de sódio	10.000 ppm (1%)
Ácidos inorgânicos, tais como clorídricos, sulfúrico e etc.	10.000 ppm (1%)
Hidrato de sódio	10.000 ppm (1%)
Partículas em suspensão	2.000 ppm (0,2%)
Água do mar (sais)	30.000 ppm (3%)
Águas industriais (sólidos)	4.000 ppm (0,4%)
Águas de esgoto (matéria orgânica)	20 ppm (0,002%)
Açúcar	500 ppm (0,05%)

4. ESTACA RAIZ

4.1 Histórico

Segundo a NBR 6122/2010, “a estaca raiz é *uma estaca armada e preenchida com argamassa de cimento e areia, moldada in loco, executada através de perfuração rotativa ou rotopercussiva, revestida integralmente no trecho em solo, por um conjunto de tubos metálicos recuperáveis*”.

A estaca raiz se diferencia das demais por diversos aspectos, pois podem ser executadas em diversos ângulos, de zero a 90°. Geralmente possuem uma taxa de armadura maior do que as demais, pois seu processo permite perfurações profundas em rochas ou solos moles. Como são armadas, podem trabalhar tanto a compressão quanto a tração, desde que o fuste esteja devidamente armado. A utilização desse tipo de estaca se deu na década de 50, quando o prof. Fernando Lizzi requereu na Itália a primeira patente. A partir da década de 70, depois de expirada essa patente, seu uso foi difundido para uso em reforço de fundações e melhoramento de solos (ALONSO, 1998).

Em 1952 o prof. Fernando Lizzi patenteou a “Pali Radice”, e essa solução era fortemente utilizada pela empresa italiana Fundedile para reforço de função como para novas fundações (LIZZI, 1970).

De acordo com Amann (2000), essa técnica ficou conhecida internacionalmente a partir do X Convegno di Geotecnica, realizado em Bari na Itália em 1970, sendo que nessa época começaram a expirar as patentes, o que difundiu essa tecnologia pelo mundo através de diversas empresas que chegaram até a realizar algumas alterações baseadas na mesma técnica de injeção.

Com o conceito inicial de criar com tais estacas um reticulado, denominado “pali radice”, com estacas inclinadas em várias direções, transformando um solo

normal em um solo armado, daí partiu para sua evolução em termos de aplicação, sendo utilizada como estacas normais para fundação, principalmente por permitirem que a carga de trabalho tanto na tração quanto na compressão seja a mesma. A Figura 4.1 apresenta a execução de uma estaca raiz inclinada.

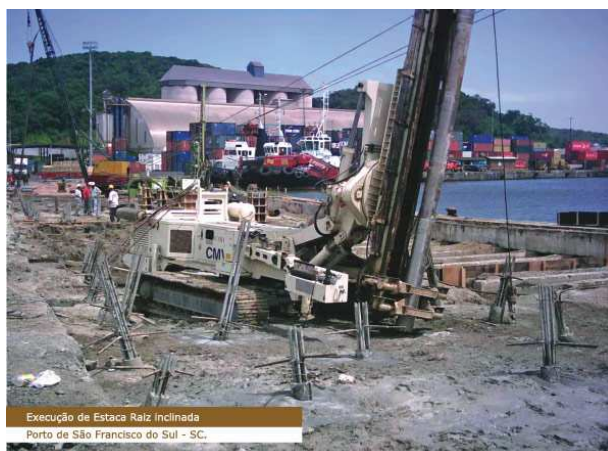


Figura 4.1: Execução de estaca raiz inclinada (FUNDESP, 2011).

Inicialmente esse tipo de estaca era denominada como estaca de pequeno diâmetro, mas isso mudou, hoje sua utilização chega a diâmetros de 50cm. (ALONSO, 1998).

De acordo com o manual técnico da Fundesp (2001), o processo de execução de estaca raiz não promove vibrações e nem qualquer tipo de descompressão no terreno, e pela mobilidade do equipamento pode ser utilizada para as mais diversas obras, tais como:

1 – Fundações em locais de difícil acesso:

Terrenos e encostas íngremes tais como fundações para linhas de transmissão de energia.

2 – Fundações em terrenos com antigas fundações:

A estaca raiz pode ultrapassar qualquer obstáculo proveniente de antiga construção de forma rápida e eficiente.

3 – Reforço de fundações:

Devido às pequenas dimensões do equipamento, pode ser utilizado em áreas restritas, com pé direito reduzido. As Figuras 4.2 a 4.4 ilustram exemplos de reforços de fundações.



Figura 4.2: Reforço de fundação com estaca raiz (FUNDESP, 2011).

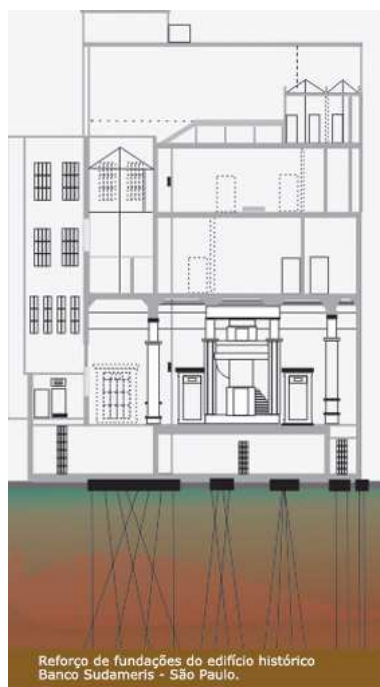


Figura 4.3: Reforço de fundação com estaca raiz (FUNDESP, 2011).



Figura 4.4: Reforço de fundação com estaca raiz (FUNDESP, 2011).

4 – Fundações em locais próximos a construções em estado precário ou com restrições de barulho:

O nível de barulho é baixo e o processo de perfuração com camisa, revestido, não causa descompressão, dessa forma não coloca em risco as construções ao redor.

5 – Estabilização de encostas:

Pode-se executar um reticulado de estacas no reforço de taludes e contenções, sendo que o terreno pode ser somente de solo, misto de rocha e solo ou rocha (Figuras 4.5 e 4.6).

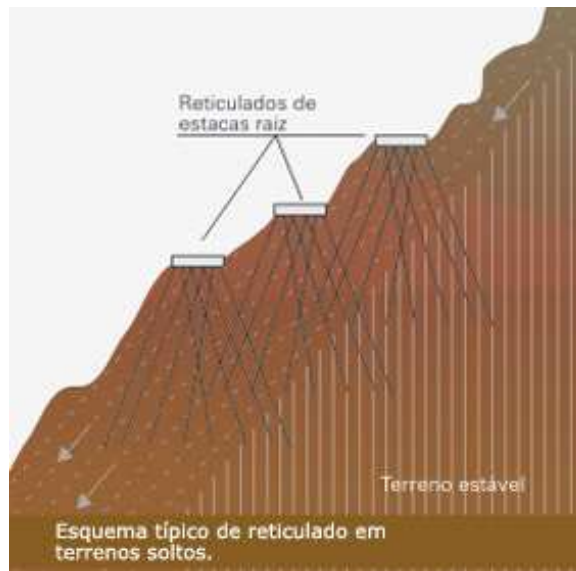


Figura 4.5: Reticulado em estaca raiz para contenção de encostas (FUNDESP, 2011).

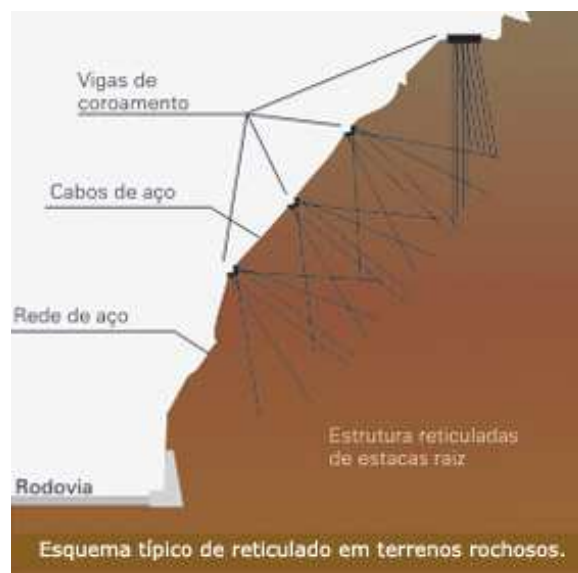


Figura 4.6: Reticulado de estaca raiz em terreno rochoso (FUNDESP, 2011).

6 – Estaca raiz em substituição de parede diafragma:

Pode-se executar um reticulado de estacas com intuito de formar uma estrutura de contenção quando não for possível executar uma parede diafragma (Figura 4.7).

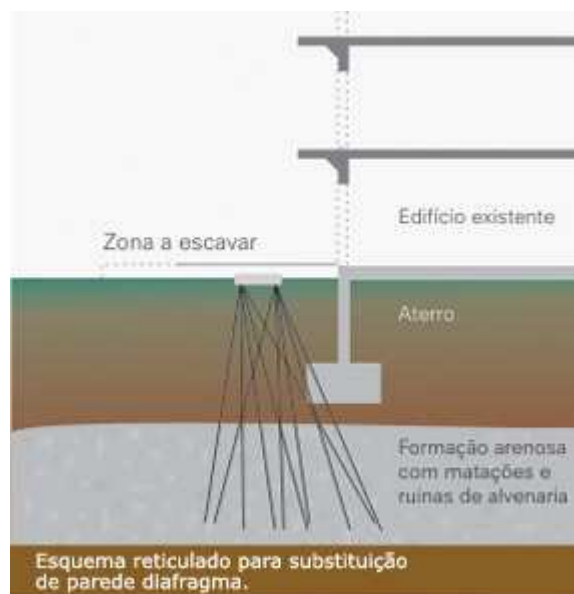


Figura 4.7: Reticulado de estaca raiz em substituição de parede diáfagma (FUNDESP, 2011).

7 – Fundações de equipamentos industriais:

Pode ser executada para instalação de novos equipamentos em áreas de acesso restrito e com construções existentes.

8 – Estaca raiz em rocha:

Quando há camadas de rochas e de solos de pouca resistência sobrejacentes ao tipo rochoso. Dessa forma utiliza-se o sistema de perfuração roto-percussão com martelo de fundo (dow-the-hole) e bits de vídea.

Através de equipamentos modernos é possível a execução de estaca raiz com altas e médias profundidades e o uso de carga de trabalho de até 2.000 kN (FUNDESP, 2011).

4.2 Método de Execução

- **Locação:**

A locação é o posicionamento correspondente das estacas na obra através do respectivo projeto (Figura 4.8). A perfeita locação é fundamental para o bom desempenho da fundação, pois um erro de locação pode ocasionar uma carga excêntrica gerando momentos que não foram previstos durante o projeto. Ou mesmo até perder a estaca tendo que executar outra ao lado. O processo de locação sempre deve ser acompanhado por um engenheiro.



Figura 4.8: Locação para perfuração da estaca raiz.

- Perfuração:

Após posicionamento da perfuratriz, acopla-se o revestimento inicial, dotado de dispositivo de corte (diamantado) na extremidade que entrará em contato com o solo, inicia-se o processo de perfuração, sempre em conjunto com fluxo de água, conforme avança a perfuração, são conectados novos segmentos do revestimento, permitindo assim que o fuste sempre fique revestido. Como o processo de perfuração sempre segue com fluxo de água, a água vai removendo o material escavado levando-o para fora do revestimento.

Esse processo de perfuração gera uma grande quantidade de lama no qual o seu escoamento deve ser previsto antes de iniciar a perfuração. Durante o processo de perfuração vai adicionando-se os segmentos do revestimento conforme vai avançando com a perfuração (Figura 4.9). Caso sejam encontrados matacões ou segmentos de rocha, ou mesmo esteja prevista a perfuração em rocha, acopla-se o perfurador interno que dará continuidade à perfuração.



Figura 4.9: Perfuração da estaca raiz.

A Tabela 4.1 mostra a relação do diâmetro do tubo de perfuração com o diâmetro da estaca acabada.

Tabela 4.1: Relação entre o diâmetro do tubo de perfuração com o diâmetro da estaca acabada.

Diâmetro final da estaca (mm)	100	120	150	160	200	250	310	410
Diâmetro externo do tubo (mm)	89	102	127	141	168	220	273	356

- Limpeza do fuste e instalação da armadura:

Após o termino da perfuração, o fuste é limpo injetando-se água dentro do revestimento, de forma que a circulação de água lave o fuste, deixando-o pronto para receber a argamassa. Para não haver contaminação da argamassa com resíduos de lama, é necessário que a água do fuste esteja relativamente limpa, para isso a limpeza é realizada com água limpa, sendo que para a perfuração pode-se reaproveitar a água do tanque de decantação. Nesse momento instala-se a armadura, sempre tomando cuidado para que ela não se encoste ao fundo da estaca. Deve-se promover um cobrimento de pelo menos 2cm.

- Preparo e injeção da argamassa:

A argamassa é misturada através de um misturador, geralmente de eixo vertical (Figura 4.10), e transportada até a estaca através de uma bomba de argamassa. Neste ponto o mangote da bomba de argamassa é introduzido no fuste da estaca e inicia-se o processo de enchimento da estaca, este processo ocorre debaixo d'água, e como a argamassa possui uma densidade maior do que a da água, conforme vai sendo injetada argamassa dentro do fuste, a água vai sendo expulsa (Figura 4.11). O processo de injeção é interrompido apenas quando a argamassa sai limpa sem sinais de contaminação e detritos. Após todo o processo de enchimento do fuste, é aplicada uma carga pneumática na ordem de

0,5MPa com o intuito de garantir que a argamassa preencha todos os espaços do fuste.



Figura 4.10: Preparo da argamassa convencional.



Figura 4.11: Preenchimento da estaca raiz com argamassa.

- Retirada do revestimento:

A próxima etapa é a retirada do revestimento, que consiste em sacar os segmentos do revestimento, e conseqüentemente completar a argamassa do fuste, pois conforme os segmentos saem, o nível de argamassa abaixa, porque a

argamassa vai ocupando o espaço do revestimento e imperfeições do solo. A retirada dos segmentos é seguida por aplicações de cargas de ar no fuste garantindo assim a acomodação da argamassa em todo o fuste (Figura 4.12).

Segundo o Manual da ABEF (2004), a equipe para execução de estaca raiz deve contar com engenheiro para supervisionar, encarregado geral, operador de perfuratriz, injetador e auxiliares gerais.



Figura 4.12: Retirada do revestimento.

A Figura 4.13 mostra a sequência de execução da estaca raiz.

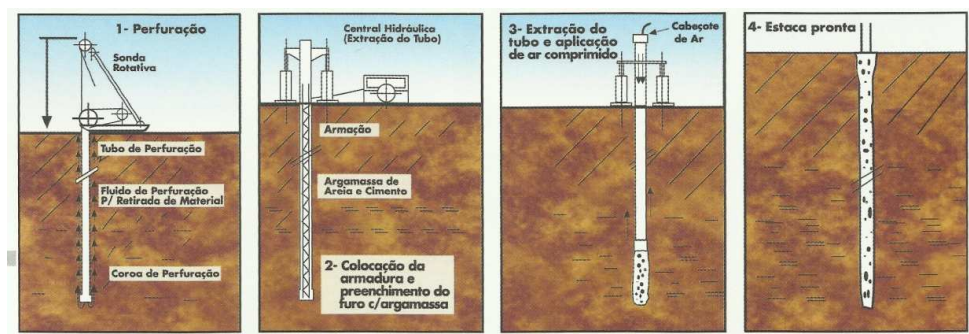


Figura 4.13: Sequencia executiva da Estaca Raiz (FUNDESP, 2001).

4.3. Argamassa para o Preenchimento de Estaca Raiz

Segundo a NBR 6122/2010, a argamassa para injeção de estaca raiz deve ter consumo mínimo de cimento na ordem de 600 kg/m³ e uma resistência de no mínimo 20 MPa, a relação A/C deve estar entre 0,5 a 0,6.

Porém não se tem mais informações quanto às características reológicas dessa argamassa para o preenchimento de estaca raiz. Segundo Venâncio (2008), o aumento no consumo de água neste tipo de argamassa melhora a trabalhabilidade, porém após um determinado ponto, que pode variar de acordo com os materiais disponíveis para seu preparo, haverá segregação dos materiais não sendo trabalhável e saudável para o fuste da estaca. Portanto para cada dosagem deve-se procurar o ponto de equilíbrio, ou seja, o máximo de tempo de escoamento sem prejuízo de segregação e consequentemente de resistência.

Venancio (2008) observou melhor desempenho em campo quando utilizada uma mistura de dois tipos de areia, isso promoveu uma boa rugosidade e enraizamento do fuste o que é a essência dessa tecnologia de estaca. O autor destaca que o consumo de cimento nas argamassas para o preenchimento de estaca raiz é função do alto consumo de água necessário para dar trabalhabilidade.

Alonso (1998) indica que a mistura da argamassa deve ser feita através de um misturador de alta turbulência para garantir a homogeneidade da argamassa, levando em conta que a argamassa é muito fluída, uma mistura mais simples poderia ocasionar a segregação já no misturador.

Segundo Carasek (2007), argamassas são materiais de construção obtidos a partir da mistura de um ou mais aglomerantes, agregados miúdos (areia) e água, podendo ainda conter aditivos e / ou adições minerais.

De acordo com Venancio (2008), a argamassa pode ser considerada uma suspensão aquosa, composta por agregados miúdos (areia) imersos em um fluido viscoso denominada como pasta de cimento ou matriz. A pasta é um fluido heterogêneo composto por cimento e água.

Cardoso et al. (2005), apresentam um modelo esquemático da estrutura da argamassa (Figura 4.14).

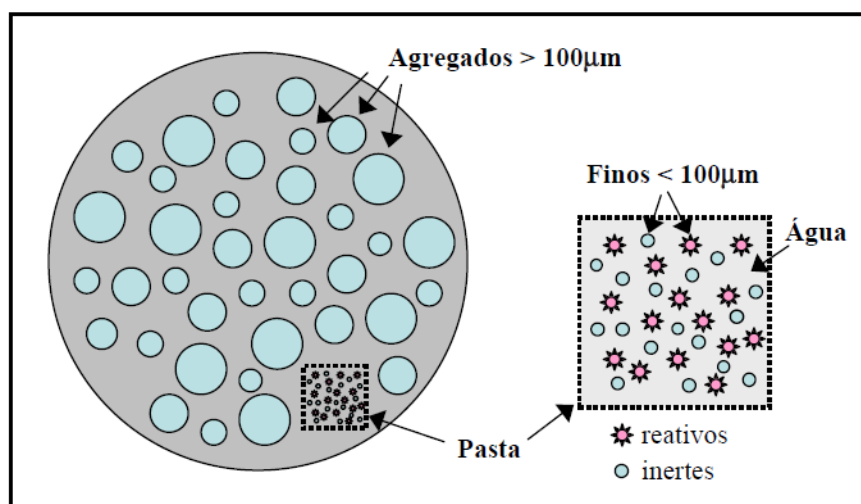


Figura 4.14: Ilustração esquemática da macro e microestrutura da argamassa (CARDOSO et al., 2005).

A utilização da argamassa é muito ampla, sendo seu principal uso para assentamento de alvenarias e nas etapas de revestimentos das construções como emboço, reboco ou revestimento de camada única de paredes e tetos, além de contrapisos para regularização de pisos, assentamento e rejuntamento de revestimentos de cerâmica e pedra.

Porém as argamassas tiveram um outro foco de utilização no passado, principalmente porque não era dominada a confecção de concretos e muito menos se tinha desenvolvido o cimento Portland, nessa linha, os primeiros registros de emprego de argamassa como material de construção são da pré-história (há cerca

de 11.000 anos). Foi descoberto em 1985 no sul da Galiléia, em Israel, um piso polido de 180m² feito com pedras e uma argamassa de cal e areia, estima-se que foi construído entre 7.000 a.C e 9.000 a.C. O segundo registro mais antigo é de 5.600 a.C, sendo uma laje de aproximadamente 20 cm de espessura, executada com argamassa de cal e areia (pátio da Vila de Lepenske – Vir – atual Iugoslávia), posteriormente encontram-se registros da utilização desta tecnologia pelos egípcios, gregos, etruscos e romanos.

Atualmente as argamassas são constituídas de cimento Portland, cal e areia, além de aditivos orgânicos que melhoram a trabalhabilidade, tais como incorporadores de ar ou aditivos retentores de água, os quais regulam a perda de água da argamassa para o ambiente e substrato. Essas argamassas evoluíram tanto que já no final do século XIX surgiram na Europa e Estados Unidos as argamassas industrializadas, que são misturas prontas, feitas industrialmente, sendo necessária apenas a adição de água no momento do uso. (CARASEK, 2007).

As argamassas devem atender às características necessárias para sua aplicação (estado fresco), denominadas como trabalhabilidade e após a aplicação (estado endurecido) devem promover durabilidade. Porém se deparam com problemas em função das características dos materiais e dosagens as quais ainda são tratadas de forma empírica (VENANCIO, 2008).

A NBR 13529/1995 define a argamassa como uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, com aditivos ou não. Também define dois tipos de argamassas:

- Preparadas em obra: que são aquelas em que a medição e a mistura dos materiais ocorrem no próprio canteiro de obra, podendo ser medidos em volume ou em massa.

- Industrializadas: são aquelas em que a dosagem ocorre em uma indústria e são entregues ou disponibilizadas para a obra no estado seco, mistura homogênea, e para seu preparo, basta adicionar água. As argamassas industrializadas podem conter aditivos, ou não, para melhorar suas características no estado fresco e endurecido.

Regatieri & Silva (2003) apresentam um fluxograma de preparo de argamassa em obra e industrializada (Figuras 4.15 e 4.16).

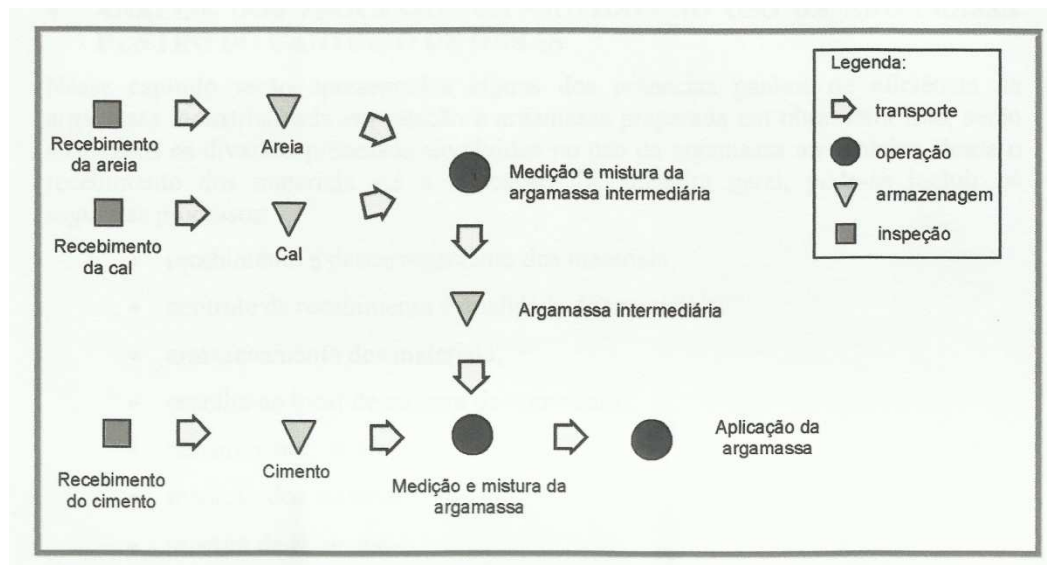


Figura 4.15: Fluxograma dos processos para argamassa mista preparada em obra (REGATIERI & SILVA, 2003).



Figura 4.16: Fluxograma dos processos para argamassa industrializada em sacos (REGATIERI & SILVA, 2003).

Portanto, quando se utiliza a argamassa preparada na obra é necessário maior número de pessoas envolvidas, controle na compra e recebimento dos insumos, espaço para estocagem de forma a garantir a integridade do material adquirido e controle na dosagem correta. Sendo que ao mesmo tempo, com a argamassa industrializada, a escolha e dosagem dos insumos ficam por conta da indústria que é especializada nisso, baseadas em rigorosos estudos de qualidade para a definição e controle dos traços, deixando para a obra apenas a responsabilidade de estocar de forma correta e dosar a quantidade de água pré-definida, podendo ser fornecida tanto em sacos (argamassas básica, grautes e colantes) como a granel, em silos (somente argamassas básicas e grautes).

O uso da argamassa industrializada vem ganhando cada vez mais espaço no mercado pela sua praticidade, pois se pode comprar exatamente o que vai ser utilizado, evitando desperdício, pois o rendimento das argamassas industrializadas é amplamente estudado pelos fabricantes. Também se tem menor possibilidade de erro no preparo, pois o operador tem que apenas colocar a quantidade de água requerida na embalagem, sendo este um fator muito importante quando se trata de uma mão de obra extremamente desqualificada.

Quando fornecida a granel, a argamassa industrializada pode ser estocada em silos e estes acoplados em vários sistemas de preparo, como:

- Misturadora acoplada: uma misturadora de eixo contínuo fica acoplada diretamente no silo, bastando o operador apertar o botão para que a argamassa saia pronta, “caindo” diretamente no carrinho de mão (Figura 4.17).



Figura 4.17: Esquema de funcionamento o sistema de argamassa granel em silo com misturadora acoplada (VOTORANTIM, 2011).

No processo de fornecimento de argamassa a granel o transporte da argamassa é feito através de caminhões silo (“cebolão”) os quais transferem a argamassa da carreta para o silo através da pressurização do sistema da carreta silo.

Apesar da facilidade e tecnologia das argamassas industrializadas, elas ainda são pouco utilizadas, segundo Penna (2011), no Brasil, de toda argamassa utilizada, apenas 1,5% é industrializada, sendo que em São Paulo esse percentual chega a 4%.

Para as obras de geotecnia, nas quais geralmente não há local para estocagem de areia, ou mesmo de difícil acesso, pode-se utilizar argamassa industrializada, desde que atenda aos requisitos da NBR6122/2010, obtendo ganho de qualidade e produtividade.

Em estudo realizado em 2003, no Campo Experimental da Unicamp observou-se ganho de produtividade no preenchimento de estaca raiz utilizando argamassa industrializada a granel, produzida através de uma misturadora acoplada ao silo, conforme gráfico da Figura 4.18, onde convencional é

denominada argamassa confeccionada em obra e Matrix denomina-se o sistema de argamassa utilizada neste estudo, sendo nas ordenadas indicado o tempo para o preenchimento da estaca (min/m^3) (LAISTER et al., 2004).

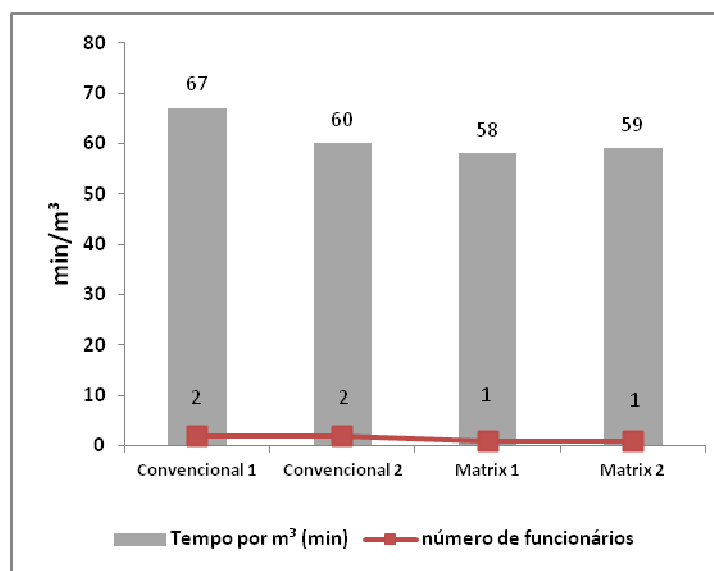


Figura 4.18: Gráfico da produtividade no processo de preenchimento da esta raiz (LAISTER et al., 2004).

Observa-se no gráfico da Figura 4.18 que o tempo para o preenchimento é basicamente igual, porém com 1 ajudante a menos.

Neste estudo, com a utilização da argamassa industrializada identificou-se uma economia de 5,6% em material e 50% na mão de obra do preparo. A economia no material deve-se à redução de volume da argamassa preparada em obra após a adição de água. A redução de volume é mais acentuada em função do inchamento da areia; como na maioria das vezes dosa-se a areia em volume, o inchamento da areia é determinante na redução de volume, conforme exibido na Figura 4.19, na qual a foto da esquerda mostra os insumos, cimento e areia úmida, nas condições da obra, dosados e misturados conforme especificações para uso, e a foto da direita mostra o volume reduzido após a adição da quantidade de água. Neste caso utilizou-se o traço equivalente a: 160kg de

cimento, 84 litros de areia e 84 litros de água, com areia a 6,8% de umidade. Redução total de volume apresentado foi de 33%. (LAISTER et al., 2004).

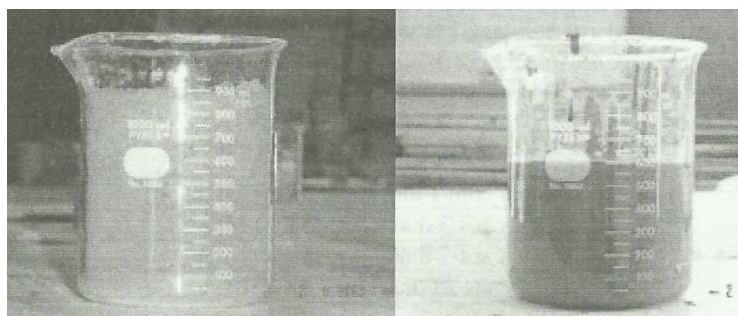


Figura 4.19: Redução de volume da argamassa preparada em obra. (LAISTER et al., 2004).

Esse mesmo experimento foi realizado para a argamassa industrializada no qual apresentou 14% de redução de volume, portanto pode-se dizer que a argamassa industrializada rendeu 19% a mais do que a convencional. (LAISTER et al, 2004).

Segundo Regatieri & Silva, (2003), a argamassa industrializada aumenta a eficiência no processo de utilização de argamassas, reduzindo a mão de obra, ganhando em prazos caso se mantenha a mão de obra, minimizando as perdas aumentando a competitividade da Construção Civil.

4.4 Dosagem das Argamassas

Para um boa dosagem de argamassa é necessário levar em consideração suas características no estado fresco e endurecido, sendo que no estado fresco é necessário ter trabalhabilidade e no estado endurecido tem que apresentar características físicas compatíveis com o projeto estrutural.

Segundo Carasek (2007), a trabalhabilidade é uma propriedade muito complexa, resultante do conjunto de outras propriedades como: consistência,

plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação e densidade de massa. A importância de cada uma delas varia em função da aplicação.

Diferentemente do concreto, no qual se tem vários métodos nacionais consagrados para sua dosagem, para as argamassas não se tem um método consagrado (CARASEK, 2007). Talvez porque a dosagem do concreto seja mais complexa e por se tratar de um material de uso estrutural na sua grande maioria, a comunidade científica tenha se dedicado mais a esse assunto, até porque se pode dizer que a argamassa é um caso particular do concreto em todos os aspectos, porém com detalhes que ainda não se tem domínio como os ligados a sua reologia.

Como na argamassa basicamente se trabalha com aglomerante / agregado miúdo, pode-se desenvolver curvas empíricas adicionando a quantidade de água necessária para obter-se a trabalhabilidade desejada, obtendo uma variedade de misturas com a variação do percentual aglomerante / agregado miúdo, fixando sempre sua consistência através de algum método consagrado, podendo ser este através da mesa de flow table, Squeeze-Flow, Penetração do cone, ou Vane Test. Para o medir as características no estado endurecido pode-se adotar como referência o ensaio de resistência à compressão axial, resistência à tração, módulo de elasticidade e outros.

Definido o traço, Carasek (2007), propõem uma metodologia para o cálculo dos insumos conforme as equações abaixo:

$$\text{Traço: } 1:p:q:A/C \text{ (em massa)} \quad (4.1)$$

$$C_c = \frac{\gamma_{\text{arg}}}{1 + p + q + A/C} \quad (4.2)$$

Ou

$$C_c = \frac{1000 - ar}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{p}{\gamma_p} + \frac{q}{\gamma_q} + A/C} \quad (4.3)$$

$$C_p = C_c \cdot p \quad (4.4)$$

$$C_q = C_c \cdot q \quad (4.5)$$

Onde:

p=traço da cal ou outro plastificante (em massa) caso haja.

q=traço do agregado, em massa;

A/C=relação água / cimento;

C_c=consumo de cimento

C_p=consumo de cal;

C_q=consumo de areia;

γ_{arg}=massa específica da argamassa;

ar=teor de ar (%)

γ_c=massa específica do cimento;

γ_p=massa específica da cal;

γ_q=massa específica do agregado;

4.5 Reologia das Argamassas

Machado (2002) define a reologia como a ciência que estuda como o material se deforma ou escoar em função da ação de forças externas.

Cardoso et al. (2005) ressaltam que a argamassa é um material bifásico (agregado + pasta) de análise muito complexa, pois a pasta é reativa, e sua reologia depende do agregado, pasta, forma de mistura e aplicação.

Segundo Venancio (2008), as argamassas no estado fresco podem ser consideradas um material intermediário entre um fluído e partículas úmidas empacotadas, sendo um material homogêneo e incompressível que pode ser estudado pela ciência da reologia desde que obedeça aos seguintes critérios: que não segregue durante o escoamento, que seja incompressível e que tenha a trabalhabilidade desejada. O autor ressalta também que a pasta de cimento tem um papel muito importante na argamassa além da função como aglomerante, no estado fresco, ela separa as partículas de agregado entre si, evitando assim seu contato, mas as mantém juntas em seu estado disperso e atua como um material lubrificante, entre as partículas de agregado melhorando assim a trabalhabilidade. Como a argamassa para o preenchimento de estaca raiz passa por um processo de bombeamento e injeção submersa, as características reológicas dessa argamassa devem ser muito bem definidas para que não se tenha falhas por segregação, exsudação ou perda d'água durante este processo. Portanto a argamassa deve ter uma boa trabalhabilidade para ser bombeada e aplicada, mantendo suas características bem íntegras após todo o processo de trabalho. Na reologia da argamassa para o preenchimento de estaca raiz destacam-se: exsudação, retenção de água, trabalhabilidade e bombeabilidade.

Quanto mais bem distribuída for a granulometria da areia, melhor é o entrosamento entre as partículas sendo maior seu ângulo de atrito. Em argamassas onde na fração da areia predominam grãos finos, toda a mistura fica envolvida pela massa de partículas finas tendo pouco entrosamento, mas quando predomina-se uma fração de grãos grossos, aumenta o entrosamento, uma vez que os grãos finos preenchem os espaços vazios aumentando assim o ângulo de atrito (PINTO, 2000).

Segundo Souza (2005), os aglomerantes possuem um papel fundamental na reologia das argamassas, sendo que a pasta formada por eles envolvem a areia interferindo diretamente na trabalhabilidade, teores reduzidos de pasta levam à perda de fluidez. Porém com uma quantidade muito grande de finos na

argamassa, proveniente do aglomerante e também da areia, pode-se elevar a quantidade de água livre necessária para molhar os grãos e conseqüentemente prejudicar a trabalhabilidade.

Carasek (2007) detalha os conceitos de exsudação, retenção de água, trabalhabilidade e bombeabilidade.

Exsudação: É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Argamassas de maior fluidez tendem a exsudar com maior facilidade.

Retenção de água: É a capacidade com que a argamassa fresca mantém sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que podem provocar perda d'água.

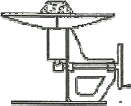
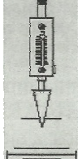
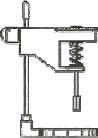
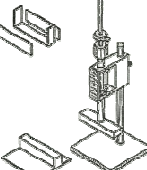
Trabalhabilidade: É a facilidade com que a argamassa pode ser misturada, transportada, aplicada, consolidada e acabada, mantendo sua condição de homogeneidade e desempenho para qual foi concebida.

Bombeabilidade: é a capacidade de um material ser transportado através de um duto sob pressão, mantendo suas características e homogeneidade.

Segundo Carasek (2007), não é fácil, avaliar, quantificar e prescrever valores de trabalhabilidade das argamassas por meio de ensaios, mas com a evolução desses métodos pode-se interpretar o tão complexo mundo da reologia, como por exemplo, os reômetros que vêm sendo utilizados com mais frequência, mas por ser um equipamento caro e de difícil transporte e instalação restringe-se o seu uso.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo dos principais métodos para avaliar a consistência e a plasticidade das argamassas.

Tabela 4.2: Principais métodos empregados para avaliar a consistência e a plasticidade de argamassas (CARASEK, 2007).

Método	Norma	Esquema	Propriedade avaliada	Parâmetro reológico que controla o fenômeno*
Mesa de consistência (flow table)	NBR 7215 NER 13276		Consistência e plasticidade	Viscosidade*
Penetração do cone	ASTM C 780		Consistência	Tensão de escoamento*
Vane teste	BS 1377 a ASTM D 4648 (selos)		Consistência	Tensão de escoamento*
Glee test	---		Consistência, plasticidade e coesão	Tensão de escoamento e viscosidade

Kantro (1980) propõe a utilização do mini slump para verificação da consistência e plasticidade de pastas de cimento. As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam as medidas originais propostas na época. O ensaio consiste em moldar uma pasta de cimento no tronco de cone, em uma só camada, apoiado em uma placa lisa e impermeável, de preferência de vidro, após o preenchimento ergue-se o molde no eixo vertical deixando com que a pasta escoe totalmente, medindo o diâmetro formado pelo escoamento em função do tempo.

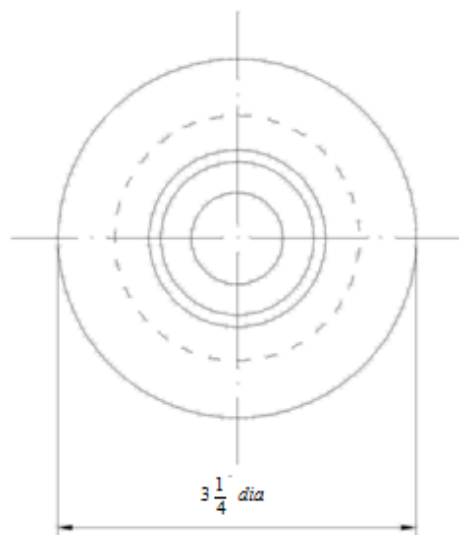


Figura 4.20: Vista de planta do mini slump proposto por Kantro (1980).

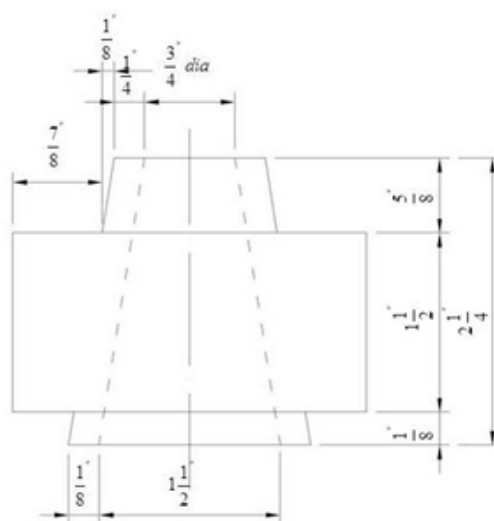


Figura 4.21: Vista da elevação do mini slump proposto por Kantro (1980).

5. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Primeira etapa da pesquisa foi denominada como ESTUDO NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP: Foram avaliadas as características físicas da argamassa para execução de estaca raiz. Foram comparadas duas argamassas no campo experimental da Unicamp, no qual se executou estacas do tipo raiz preenchida com argamassa convencional e industrializada. A estaca executada com argamassa industrializada foi exumada permitindo seu estudo por meio de corpos de prova extraídos ao longo do fuste. Essa etapa da pesquisa foi muito importante para entender as necessidades / dificuldades e oportunidades de melhoria para o processo de confecção e preenchimento de argamassa neste tipo de estaca.

A segunda etapa foi denominada como COMPARATIVO ENTRE ARGAMASSAS CONVENCIONAIS E INDUSTRIALIZADAS. Essa etapa teve como objetivo avaliar o comportamento de duas argamassas coletadas em campo, em duas obras que executaram estacas raiz conforme as recomendações da NBR 6122. Porém, como essa etapa ocorreu no ano de 2010, ano de lançamento da revisão da respectiva norma, foram seguidas as recomendações da versão anterior. Essas argamassas foram comparadas quanto à absorção capilar, com argamassas industrializadas, sendo essas preparadas em laboratório com diferentes consumos de cimento e relação A/C, denominadas como Grout 15, 20, 25 e 30 MPa.

A terceira etapa foi denominada ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE CIMENTO NA REOLOGIA DA ARGAMASSA. Estudando a possibilidade de reduzir o consumo de cimento em argamassas dosadas em laboratório, na terceira etapa da pesquisa estudou-se o impacto do consumo de cimento na reologia das argamassas, sendo selecionada uma dosagem que mostrou a fluidez mais próxima da utilizada para o preenchimento de estaca raiz sendo esta refeita com a relação A/C controlada por meio de aditivo superplastificante.

A quarta etapa foi denominada ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE CIMENTO NA ABSORÇÃO CAPILAR. Nessa quarta e última etapa da pesquisa, com base nos resultados de reologia da terceira etapa, foram dosadas três argamassas em laboratório, variando o consumo de cimento, relação A/C e mantendo a fluidez através de adição de finos (filler calcário) em substituição ao consumo de cimento.

5.1 Primeira etapa: Estudo no Campo Experimental da Unicamp.

Foram executadas duas estacas do tipo raiz, sendo uma preenchida com argamassa convencional, seguindo as orientações da NBR6122/1996 (etapa anterior ao lançamento da revisão de 2010) e a outra preenchida com argamassa industrializada, tipo Grout 20MPa.

5.1.1 Composição da Argamassa Convencional

- Cimento:

Utilizou-se o cimento CPV ARI RS conforme Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Características do cimento utilizado para confecção da argamassa convencional.

Resistência à compressão - 1 dia (MPa)	25,6
Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	35,0
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	39,0
Resistência a compressão - 28 dias (MPa)	49,0
Início de Pega (min)	255
Fim de pega (min)	322
Adição de pozolana (%)	11
Densidade real (g/cm³)	2,97
Blaine (cm²/g)	5.248

- Traço:

Utilizou-se um traço no qual a empresa executante da estaca já tinha experiência comprovada por meio de ensaios laboratoriais, conforme Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Traço utilizado para confecção da argamassa convencional.

Material	Traço / m³
Cimento CPV ARI RS	640 kg
Areia média de rio *	1.612 kg
Água	336 litros
Relação A/C	0,525

*Umidade da areia: 6,4%

Sendo representado a seguir na forma unitária:

- 1 : 2,20 : 0,73 (traço unitário em volume);
- 1 : 2,52 : 0,525 (traço unitário em massa);

A argamassa foi preparada no momento da aplicação. A mistura foi realizada mecanicamente por misturador mecânico de eixo vertical e bombeada até a estaca para seu preenchimento (Figura 5.1).



Figura 5.1: Preparo da argamassa convencional.

Foi coletada amostras de argamassa convencional, no estado fresco, diretamente do misturador, para moldagem de corpos de prova.

5.1.2 Composição da Argamassa Industrializada

Utilizou-se uma argamassa tipo Grout 20MPa conforme características descritas pelo fabricante (Tabela 5.3).

Tabela 5.3: Características do Grout 20 MPa.

Classe	Cimento (kg/m ³)	Água (litros)	Relação a/c
Grout 20MPa	480*	334	0,70

Este “grout” é industrializado e segundo o fabricante foi composto por cimento Portland, areia artificial de origem calcária, com granulometria controlada e aditivos químicos para melhorar sua trabalhabilidade. Sendo indicado para o preenchimento de alvenaria estrutural. Este material especificamente foi utilizado no ano de 2003, sendo a formulação vigente da época.

Obs.: A quantidade de areia e aditivo não foram fornecidas pelo fabricante.

*O fabricante utilizou o cimento CPIIF32 para fabricação deste Grout.

A respectiva argamassa foi fornecida a granel, mistura seca, transportada por meio de caminhão do tipo silo “cebola”, e armazenada na obra em silo com misturadora acoplada, conforme Figura 5.2.



Figura 5.2: Silo com misturadora acoplada para armazenamento de argamassa industrializada.

O silo foi conectado a uma rede de água e ao acionar o comando do equipamento o misturador fez o preparo da argamassa, soltando-a diretamente na bomba (Figura 5.3).



Figura 5.3: Argamassa industrializada caindo na bomba.

O controle da quantidade de água para mistura foi feita por meio de um vazômetro (Figura 5.4) instalado no equipamento.



Figura 5.4: Detalhe do vazômetro.

Foi coletada amostras de argamassa industrializada, no estado fresco, para moldagem de corpos de prova. Realizou-se a coleta na saída do misturador de argamassa.

5.2. Segunda etapa da pesquisa: Comparativo entre argamassas convencionais e industrializadas

5.2.1 Argamassa para Estaca Raiz Coletada em Campo

Para entender melhor as condições de preparo e desempenho da argamassa para o preenchimento de estaca raiz, tanto no estado fresco como no

estado endurecido, foram selecionadas duas obras para análise, nas quais foram observados o traço, a mistura e a consistência, também foram moldados corpos de prova para análise em laboratório.

- Obra 1:

Na Tabela 5.4 tem-se as características da argamassa coletada na obra 1.

Tabela 5.4: Traço da argamassa utilizada na obra 1.

Material	Traço / m ³ (teórico)	Traço (real)
Cimento CPIIE32	605 kg	605 kg
Areia grossa de rio *	1.041 kg	999,4 kg
Água	405 litros	446,6 litros
Relação a/c	0,67	0,74
Mini slump (30min)	85 mm	

*Areia com 4% de umidade.

Obs.: O traço teórico foi o declarado pelo construtor, porém o traço “real” leva em consideração a umidade da areia.

A mistura foi realizada num misturador de eixo vertical (Figura 5.5), e depois de misturada foi bombeada até a estaca.

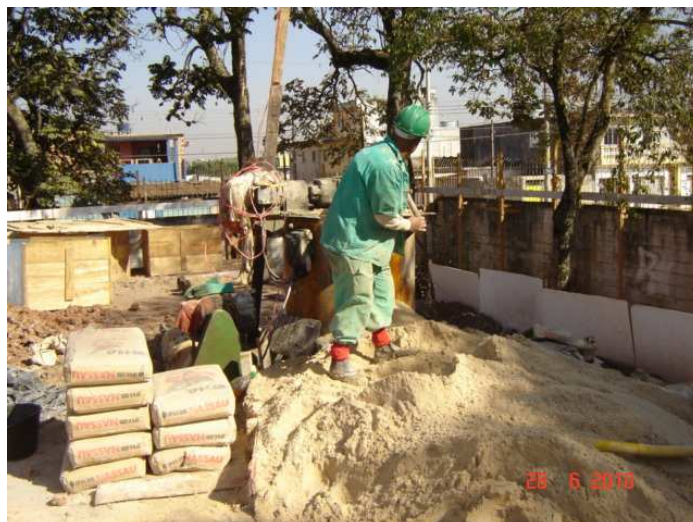


Figura 5.5: Mistura da argamassa convencional – obra 1.

- Obra 2:

Na Tabela 5.5 são apresentadas as características da argamassa coletada na obra 2:

Tabela 5.5: Traço da argamassa utilizada na obra 2.

Material	Traço / m³ (teórico)	Traço (real)
Cimento CPIIE32	636 kg	636 kg
Areia de rio tipo grossa*	961 kg	864,9 kg
Água	426 litros	522,1 litros
Relação a/c	0,67	0,82
Mini slump (30min)	93 mm	

*Areia com 10% de umidade.

Obs.: O traço teórico foi o declarado pelo construtor, porém o traço “real” leva em consideração a umidade da areia.

A mistura foi realizada num misturador de eixo vertical e depois de misturada foi bombeada até a estaca.

5.2.2 Argamassa Industrializada Tipo “Grout” (Moldada em Laboratório)

Foram avaliados Grouts de 4 classes, 15, 20, 25 e 30 MPa, preparados e moldados em laboratório, com suas composições descritas na Tabela 5.6.

Este “grout” é industrializado e, segundo o fabricante, é composto por cimento Portland, areia artificial de origem calcária, com granulometria controlada e possui aditivos químicos para melhorar sua trabalhabilidade. Sendo indicado para o preenchimento de alvenaria estrutural.

Tabela 5.6: Características da argamassa industrializada – Grout.

Classe	Cimento (kg/m ³)*	Água (litros)	Relação a/c
Grout 15 MPa	242	264	1,09
Grout 20 MPa	286	264	0,92
Grout 25 MPa	330	264	0,80
Grout 30 MPa	374	264	0,71

Obs.: A quantidade de areia e aditivo não são fornecidas pelo fabricante.

*O fabricante utilizou o cimento CPIIE40 para fabricação deste Grout.

As Figuras 5.6 a 5.13 apresentam as curvas granulométricas dos grouts e do material passante na peneira nº 100 (0,15mm), realizada por meio de granulometria a laser.

As Tabelas 5.7 a 5.10 apresentam o módulo de finura, diâmetro máximo e o retido no fundo do conjunto de peneiras.

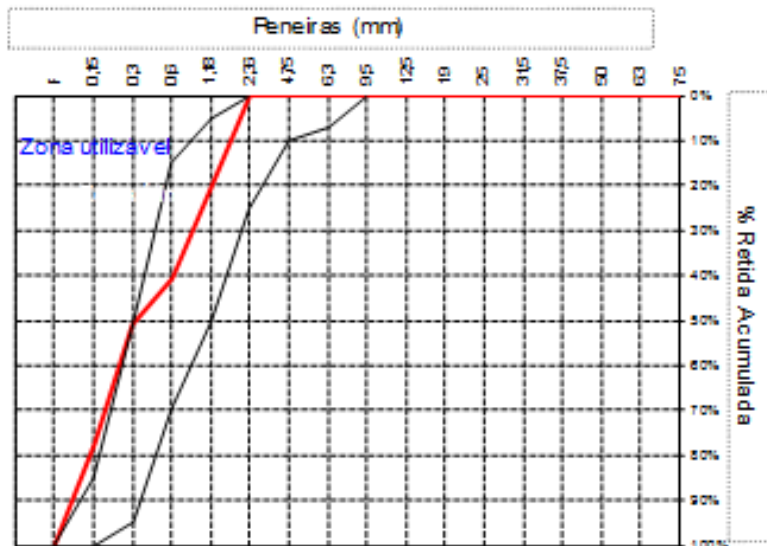


Figura 5.6: Curva granulométrica – Grout 15 MPa.

Tabela 5.7: Granulometria do Grout 15 MPa.

Módulo de Finura	1,90
Diâmetro máximo (mm)	2,40
Fundo (%)	22,70

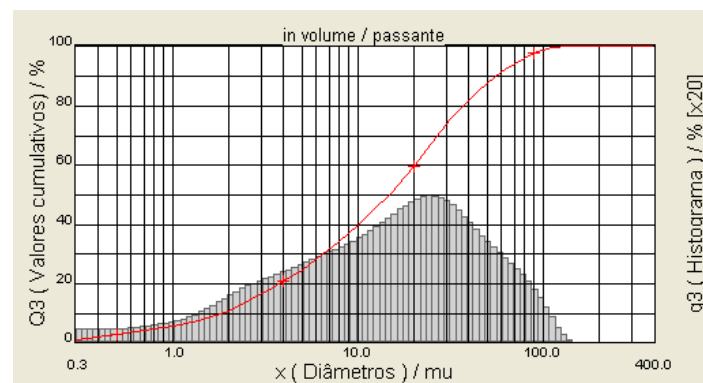


Figura 5.7 – Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria do Grout 15 MPa.

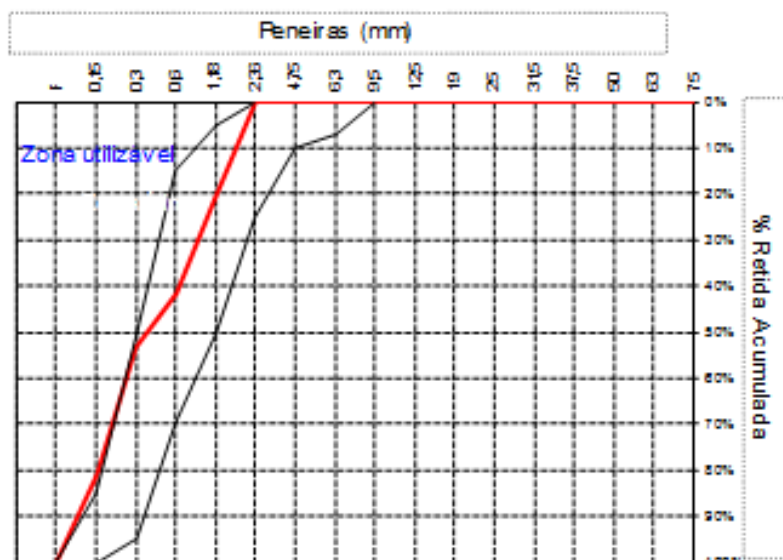


Figura 5.8: Curva granulométrica do Grout 20 MPa.

Tabela 5.8: Granulometria do Grout 20 MPa

Módulo de Finura	1,97
Diâmetro máximo (mm)	2,40
Fundo (%)	19,00

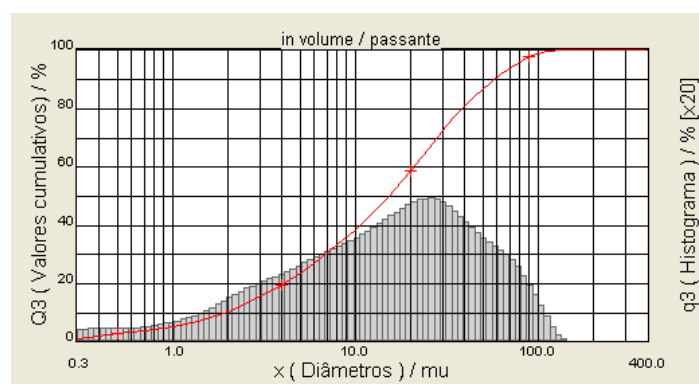


Figura 5.9: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria do Grout 20 MPa.

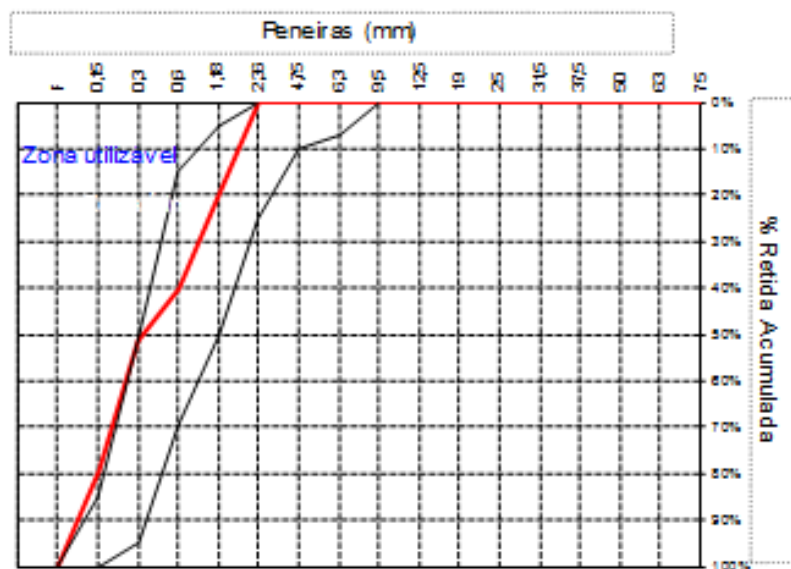


Figura 5.10: Curva granulométrica do Grout 25 MPa.

Tabela 5.9: Granulometria do Grout 25 MPa.

Módulo de Finura	1,92
Diâmetro máximo (mm)	2,40
Fundo (%)	20,6

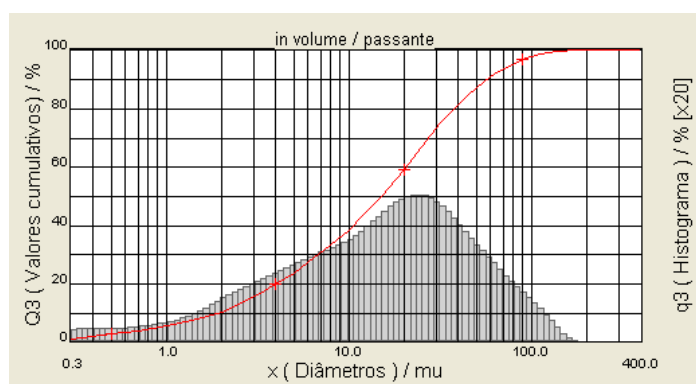


Figura 5.11: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria do Grout 25 MPa.

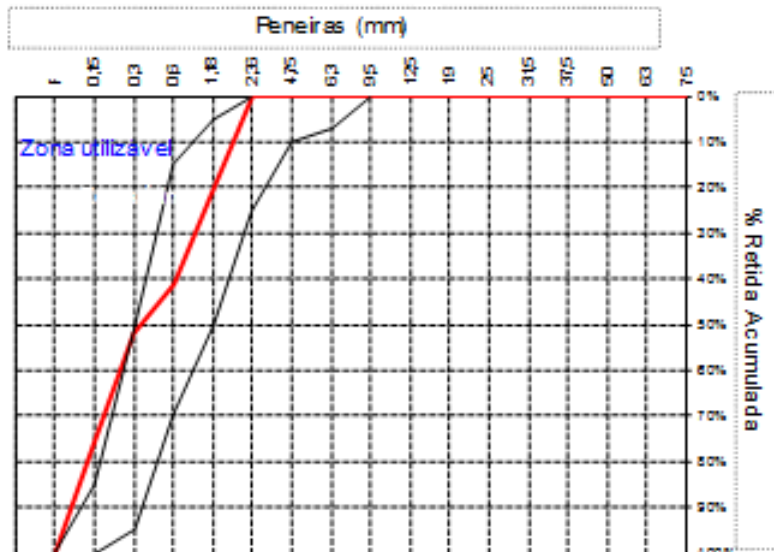


Figura 5.12: Curva granulométrica do grout 30 MPa.

Tabela 5.10: Granulometria do Grout 30 MPa.

Módulo de Finura	1,89
Diâmetro máximo (mm)	2,40
Fundo (%)	25,10

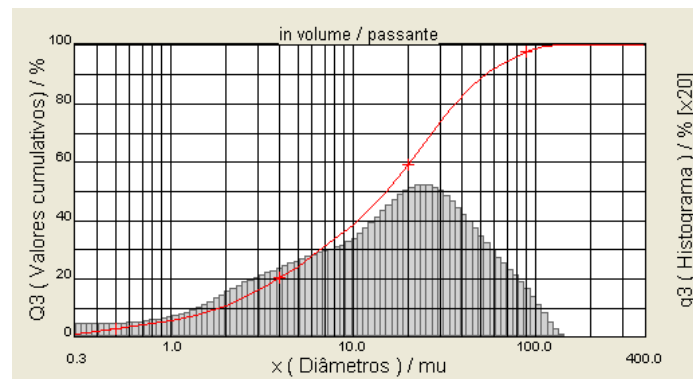


Figura 5.13: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria do Grout 30 MPa.

Observa-se que as curvas granulométricas dos grouts são muito parecidas. Mesmo com a redução no consumo de cimento, a quantidade de finos é mantida.

5.3 Terceira etapa da pesquisa: Estudo da influência do consumo de cimento na reologia da argamassa

Para estudar a influência do consumo de cimento na reologia da argamassa, foram dosadas argamassas em laboratório, variando o consumo de cimento conforme Tabela 5.12 e 5.13, com e sem aditivo superplastificante, respectivamente. Para esse experimento utilizou-se cimento CPIIE40 (conforme características descritas na Tabela 5.11) e areia normal brasileira, produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) conforme NBR7214/82. Sendo a areia utilizada para o experimento composta por quatro partes igualmente distribuídas das respectivas areias (IPT), grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100).

Tabela 5.11: Características do cimento CPIIE40 utilizado.

Resistência a compressão - 3 dias (MPa)	28,3
Resistência a compressão - 7 dias (MPa)	37,5
Resistência a compressão - 28 dias (MPa)	48,8
Início de Pega (min)	176
Fim de pega (min)	231
Adição de escória (%)	20%
Densidade real (g/cm ³)	3,01
Blaine (cm ² /g)	4.091

O critério de dosagem iniciou-se com o traço 1:4 e relação A/C de 0,936 e depois para os traços 1:3 e 1:2 apenas adicionando mais cimento na mesma argamassa.

Tabela 5.12: Dosagem de argamassa em laboratório com utilização de aditivo superplastificante.

Traço	Cimento kg/m ³	Aditivo	Relação a/c	Mini slump (mm)	Observação
1:4	358	1%	0,936	60	segregou
1:3	466	0,7%	0,67	60	Segregou
1:2	670	0,5%	0,4	130	Não segregou

Tabela 5.13: Dosagem de argamassa em laboratório sem a utilização de aditivo superplastificante.

Traço	Cimento kg/m ³	Aditivo	Relação a/c	Mini slump (mm)	Observação
1:4	327	0%	1,20	65	Não segregou
1:3	430	0%	0,85	65	Não segregou
1:2	592	0%	0,6	110	Não segregou

Nesta etapa observou-se que o cimento influenciou diretamente a reologia da argamassa, pois o único traço que proporcionou a fluidez adequada foi o de 1:2, considerando fluidez mínima de 85 mm por meio do ensaio de mini slump (valor baseado no menor valor de fluidez encontrado em argamassa de campo, conforme Tabela 5.4).

5.4 Quarta etapa – Estudo da influência do consumo de cimento na absorção capilar

Com base no melhor traço da etapa anterior, 1:2, foram dosadas três argamassas substituindo parte do cimento por filler calcário e utilizando aditivo superplastificante, sendo que a adição do filler teve a intenção de diminuir o consumo de cimento sem faltar finos para a argamassa, e o superplastificante foi utilizado para diminuir a relação A/C. A Tabela 5.14 apresenta as características dessas argamassas.

Tabela 5.14: Características da amostra dosadas em laboratório com substituição de parte de cimento por filler calcário.

Argamassa	Teor de substituição Filler (%) ¹	Traço ²	Cimento Kg/m³	Aditivo	Relação a/c	Mini slump (mm)	Consumo de água L/m³
Laboratório 336	50%	1:1:4	336,50	1%	0,80	70	269,20
Laboratório 475	30%	1:0,43:2,86	475,10	1%	0,57	85	270,81
Laboratório 616	10%	1:0,11:2,33	616,00	1%	0,44	115	271,04

¹ Teor de substituição de filler calcário sobre a base de cimento (traço base 1:2).

² Traço: cimento: filler: Areia normal brasileira (IPT) 25% de cada (#16, #30, #50 e #100).

As Figuras 5.14 a 5.19 apresentam as curvas granulométricas das argamassas dosadas em laboratório.

As Tabelas 5.15 a 5.17 apresentam o módulo de finura, diâmetro máximo e o retido no fundo do conjunto de peneiras.

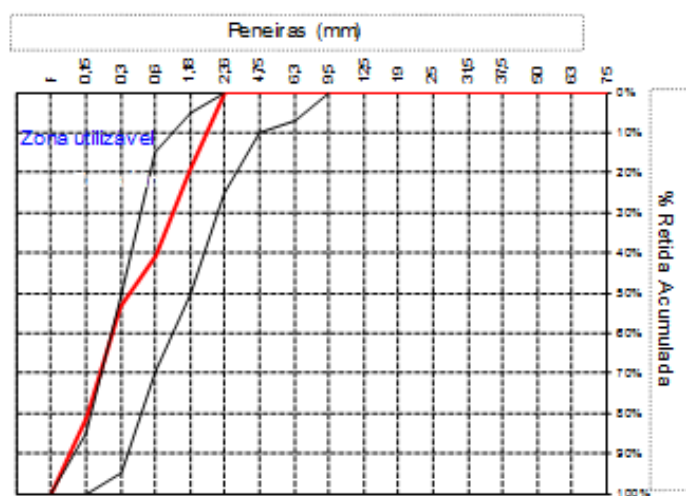


Figura 5.14: Curva granulométrica da argamassa Laboratório 336.

Tabela 5.15: Granulometria da argamassa Laboratório 336.

Módulo de Finura	1,94
Diâmetro máximo (mm)	2,40
Fundo (%)	19,3

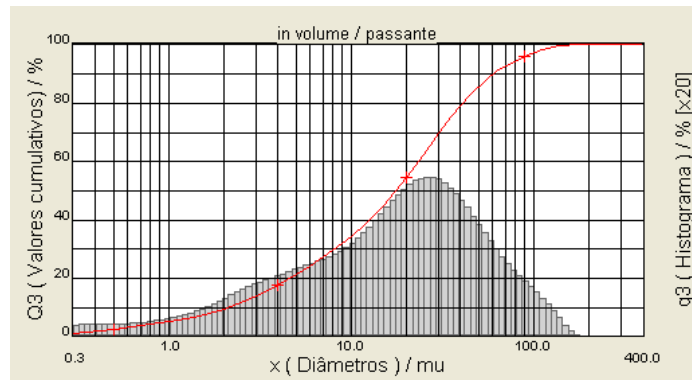


Figura 5.15: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria da argamassa Laboratório 336.

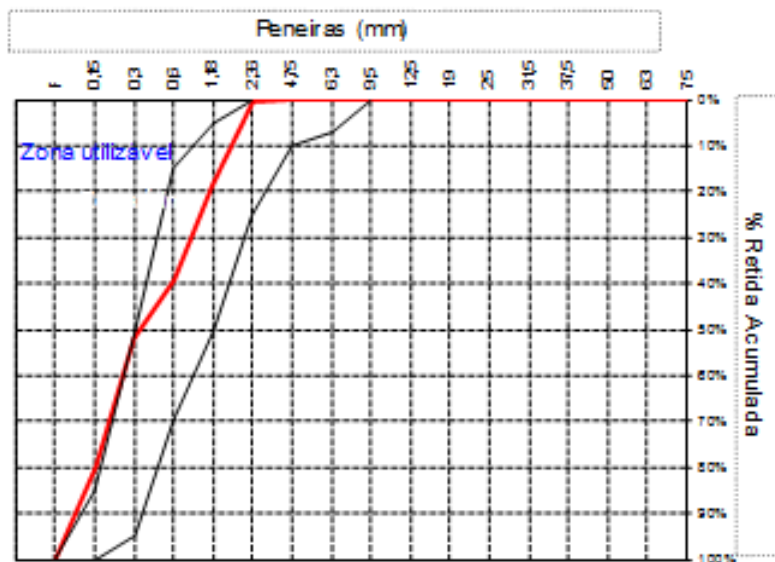


Figura 5.16: Curva granulométrica da argamassa Laboratório 475.

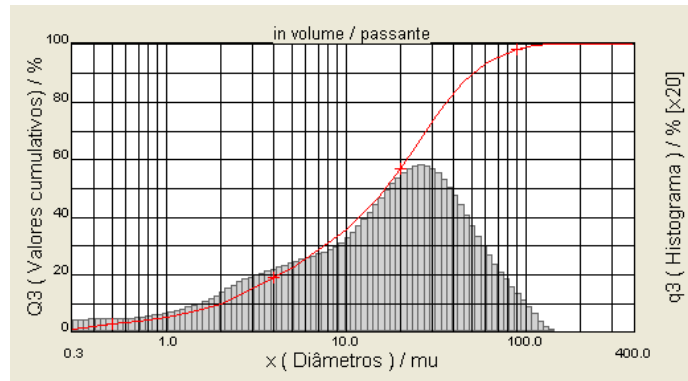


Figura 5.17: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria da argamassa Laboratório 475.

Tabela 5.16: Granulometria da argamassa Laboratório 475.

Módulo de Finura	1,90
Diâmetro máximo (mm)	2,40
Fundo (%)	20,3

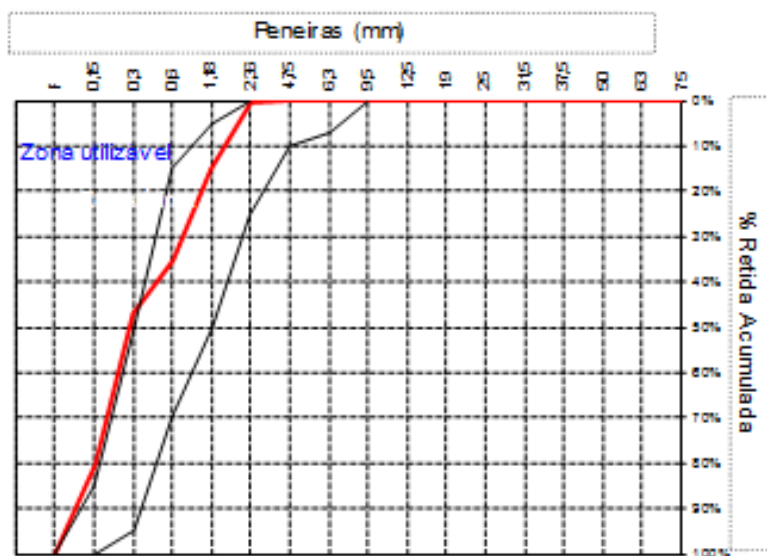


Figura 5.18: Curva granulométrica da amostra Laboratório 616.

Tabela 5.17: Granulometria da argamassa Laboratório 616.

Módulo de Finura	1,78
Diâmetro máximo (mm)	2,40
Fundo (%)	19,7

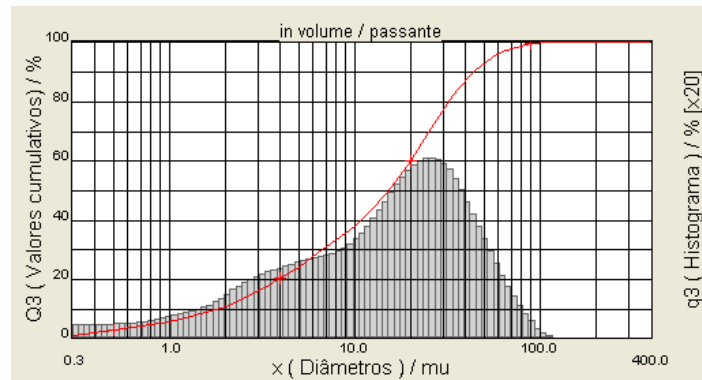


Figura 5.19: Curva granulométrica a laser da parcela do fundo da granulometria da argamassa Laboratório 616.

A Figura 5.20 apresenta a curva granulométrica do cimento CPIIE40 utilizado nas argamassas dosadas em laboratório.

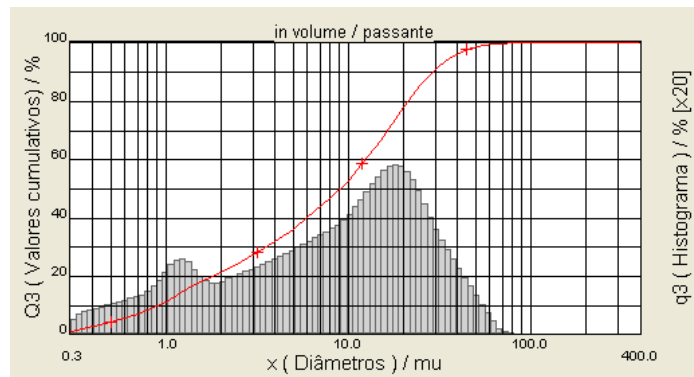


Figura 5.20: Curva granulométrica do cimento CPIIE40.

Observa-se que as curvas granulométricas se apresentam muito semelhantes; pois a redução do consumo de cimento foi compensada com adição de filler calcário. Comparando com as curvas granulométricas dos grouts, observa-

se que os grouts possuem maior quantidade de finos entre as peneiras 0,15 a 0,3 mm.

A curva granulométrica do cimento CPIIE40 (Figura 5.20) apresentou uma concentração de finos entre 10 e 20 μm . Porém apresenta-se bem distribuída.

5.5 Ensaio de Abatimento Através do Mini Slump

Para o presente estudo, optou-se pelo uso do mini slump (KANTRO, 1980) para medir a consistência das argamassas, pois seu uso é prático e rápido na determinação da fluidez de pastas. Como a argamassa para execução de estaca raiz é muito fluida, foi possível a adaptação do mini slump como parâmetro de controle de fluidez.

A fluidez da argamassa para estaca raiz é muito importante para seu transporte, pois quanto mais fluida, menor será sua resistência ao bombeamento. Porém a fluidez não deve ser excessiva ao ponto de ocasionar segregação.

O tronco cônico deve ser posicionado sobre uma placa de vidro, apoiado em um local plano. A pasta deve ser introduzida de uma única vez, e após o total preenchimento do molde, a face superior deve ser rasada. O molde é erguido perpendicularmente ao eixo horizontal num movimento de retirada lenta e deve ser segurado até o total escoamento do material. A fluidez é medida em função do diâmetro formado pela pasta no vidro. A placa de vidro deve estar limpa para promover o deslizamento da argamassa.

Segundo Ferraris et al. (2001), após 1 minuto de escoamento, deve-se obter o diâmetro formado pela pasta em 4 diagonais.

De acordo com Piovezam et al. (2008), a medida da consistência é o tempo que a pasta leva para atingir o diâmetro de 115mm (denominado como T115).

No presente estudo, adaptou-se o método para o uso em argamassa. Utilizou-se uma placa de vidro apoiada numa base regular, o tronco-cônico foi confeccionado em aço inoxidável, tendo como diâmetro maior 40 mm e o diâmetro menor com 20 mm, e altura de 60 mm, conforme Figura 5.21.



Figura 5.21: Ensaio de mini slump.

O molde é preenchido de uma única vez, e a superfície é rasada com auxílio de uma espátula. Após erguer o molde, aguarda-se até que toda a argamassa escoe, medindo-se o diâmetro formado pela argamassa sobre o vidro. Decorridos os tempos: 1, 5, 10, 15 e 30 min. a leitura final é adotada como o valor do mini slump.

5.6. Resistência à Compressão Axial (NBR7215/96)

As argamassas foram moldadas em formas cilíndricas de dimensões: 5cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 5.22).



Figura 5.22: Formas para moldagem de corpos de prova de argamassa, detalhe da vedação para moldagem de corpos de prova e soquete de adensamento da argamassa.

Para garantir a estanqueidade do molde, utilizou-se fita do tipo veda rosca. As formas foram untadas com óleo mineral para minimizar a influência do desmoldante no ensaio de absorção capilar (Figura 5.22).

A moldagem foi realizada em quatro camadas igualmente distribuídas, sendo cada uma delas adensada com 30 golpes, utilizando o soquete de adensamento. As moldagens ocorreram em duas situações, “in loco” e em laboratório.

Para as argamassas moldadas “in loco”, os corpos de prova permaneceram no local da moldagem, protegidos em uma área coberta nas primeiras 24 horas. Depois desse período foram desformados e levados para o laboratório, onde ficaram em cura submersa até a data do ensaio.

A figura 5.23 mostra a armazenagem dos corpos de prova nas primeiras 24 h. a) na obra e b) em câmara úmida.



a)



b)

Figura 5.23: a) corpos de prova de argamassa moldados “in-loco”. b) em laboratório.

Para as argamassas moldadas em laboratório, os corpos de prova ficaram em câmara úmida nas primeiras 24 horas e após esse período foram desformados e submetidos em cura submersa até a data de ensaio (Figuras 5.24).



Figura 5.24: Cura dos corpos de prova de argamassa em tanque de imersão.

Antes da ruptura dos corpos de prova eles foram capeados com uma mistura de enxofre e pó de quartzo numa proporção de 67,5% e 37,5%, respectivamente (Figura 5.25). A Figura 5.26 ilustra a ruptura dos corpos de prova.



Figura 5.25: Capeamento do corpo de prova.



Figura 5.26: Ruptura à compressão axial dos corpos de prova de argamassa.

5.7. Extração de Corpos de prova (NBR7680/2007)

Como havia oportunidade de estudar uma estaca raiz, exumada para estudos, (primeira etapa da pesquisa), foram realizadas extrações de corpos de prova nesta estaca, conforme Figuras 5.27 e 5.28. Para o preenchimento dessa estaca foi utilizada argamassa industrializada.



Figura 5.27: Extração de corpos de prova da estaca exumada.



Figura 5.28: Corpos de prova da estaca exumada.

5.8 Densidade de Massa no Estado Endurecido (NBR 13280/05)

Para o respectivo ensaio, utilizou-se como referência a NBR 13280/05. A qual define a metodologia para determinação da densidade de corpos de prova prismáticos. Utilizou-se essa metodologia em corpos de prova cilíndricos de 5cm de diâmetro e 10cm de altura.

Para determinar a massa específica aparente dos corpos de prova utilizou-se a equação 5.1. O volume dos corpos de prova foi obtido através das médias das suas dimensões obtidas com o uso de um paquímetro. Foram realizadas no mínimo duas leituras por dimensão. A massa foi obtida por meio de pesagem em balança analítica, conforme Figura 5.29.

$$\gamma = \frac{m}{v} (kg / m^3) \quad (5.1)$$

Onde:

γ = Massa específica aparente (kg/m³);

m = massa do corpo de prova (kg);

v = volume dos corpos de prova (m³)



Figura 5.29: Pesagem do corpo de prova para determinação da massa específica aparente.

5.9 Módulo Dinâmico por Ultra-Som (NBR 15630/08)

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica foi baseado na NBR 15630/08, na qual prevê a transmissão de ondas ultrassônicas através do corpo de prova, utilizando-se um equipamento de transmissão de ondas ultrassônicas (Figura 5.30).



Figura 5.30: Equipamento de ultra-som.

Para a execução do ensaio, deve-se atentar para os seguintes cuidados: as faces dos corpos de prova devem estar limpas e planas, caso contrário deve regularizá-las através de lixamento ou corte; deve ser utilizado um gel de contato na superfície dos transdutores de forma que preencha toda zona de contato entre os transdutores e a face do corpo de prova.

A leitura do equipamento mostrará a velocidade da onda para atravessar o corpo de prova. Deve-se registrar a menor velocidade de três leituras para cada corpo de prova

Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico utiliza-se a equação 5.2:

$$Ed = v^2 \gamma \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (5.2)$$

Onde:

Ed= módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

v = velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/μs);

γ = densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m³);

μ = coeficiente de Poisson. Para este ensaio adota-se o valor de 0,2;

Para o cálculo da velocidade de propagação da onda ultrassônica (V), utiliza-se a equação 5.3.

$$v = \frac{L}{t} \quad (5.3)$$

Em que:

L = distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (comprimento do corpo de prova) (mm);

t = tempo registrado pelo mostrador digital (μs).

5.10. Absorção de Água por Capilaridade (NBR15259/05 / NBR 9779/95)

Foram utilizadas as recomendações da NBR15259/05 para o ensaio nos corpos de prova da primeira etapa desta pesquisa (item 5.1) e a NBR 9779/95 para as demais etapas.

A escolha da utilização das recomendações da NBR9779/95 para as demais etapas foi definida em função da maior abrangência do ensaio (de 72 h), o qual fornece mais dados para análise.

- **Recomendações da NBR15259/05:**

O ensaio consiste em preparar a base dos corpos de prova, lixando-as para retirar qualquer impureza e possíveis resíduos do desmoldante.

Após a determinação da massa inicial (g), posiciona-se os corpos de prova no recipiente com água. No qual os corpos de prova devem ser apoiados pela face plana (base) em uma grelha.

O nível d'água deve permanecer durante o ensaio entre 5+-1mm acima da face que encontra-se em contato com a água.

A partir do contato com a água, deve-se medir a massa dos corpos de prova aos 10 min (m_{10}) e aos 90 min (m_{90}). Para realizar essa leitura os corpos de prova devem ser enxutos com pano úmido para retirar o excesso de água.

Para calcular a absorção de água por capilaridade para os respectivos tempos designados neste ensaio (10 min e 90 min), utiliza-se a equação 5.4.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (5.4)$$

Onde:

A_t = Absorção de água por capilaridade cada o respectivo tempo (g/cm²);

m_t = massa do corpo de prova para o tempo ensaiado (g)

m_0 = massa inicial do corpo de prova (g);

t = refere-se aos tempos do ensaio, 10min e 90 min;

A = área do corpo de prova, referente a seção transversal que encontra-se em contato com a água (cm²);

O coeficiente de capilaridade (C) é por definição (NBR15259/05) o coeficiente angular da reta que passa pelos dois pontos de leitura (t_{10} e t_{90}), sendo

a abscissa, a raiz do tempo (min) e as ordenadas a absorção de água por capilaridade (g/cm²).

A NBR15259/05 disponibiliza a equação 5.5 para o cálculo do coeficiente de capilaridade, definindo que a diferença de massa nos respectivos tempos é aproximadamente igual ao valor do coeficiente de capilaridade.

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (5.5)$$

Em que:

C = coeficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2});

- **Recomendações da NBR9779/95:**

O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade definido pela NBR 9779/95 é mais abrangente, pois seu ciclo é de 72 h.

Este ensaio é recomendado para determinação da absorção capilar tanto em corpos de prova de argamassa moldados conforme a NBR 7215, como de concreto moldados conforme a NBR 5738 e de extrações (NBR7680).

Devem ser ensaiadas séries de três corpos de prova, sendo que os obtidos por meio de moldagem devem estar isentos de óleos ou outros materiais aderidos na moldagem.

Determina-se a massa dos corpos de prova secos ao ar, e na sequência coloca-se em estufa, a 105±5 °C até constância de massa. Considerando sua constante quando a diferença entre duas pesagens for menor que 0,5% do menor valor obtido, entre períodos de 24 horas. Constatada constância de massa, deixam-se os corpos de prova esfriar em temperatura de (23±2°C), preferencialmente em dessecador e determina-se sua massa.

Para garantir um fluxo de absorção capilar unidirecional, adotou-se uma técnica utilizada pela FEC/Unicamp (MARTINS, 2001), a qual prevê a impermeabilização da lateral dos corpos de prova, restringindo dessa forma que o fluxo de água seja conduzido perpendicular ao seu eixo. Para isso utilizou-se um impermeabilizante a base de látex.

Após a preparação dos corpos de prova, deve-se levá-los para a imersão no aparato de ensaio (Figura 5.31). Neste caso o nível de água deve ser constante na ordem de 5 ± 1 mm, acima da face inferior do corpo de prova.



Figura 5.31: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

No período de ensaio, deve-se determinar a massa dos corpos de prova com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, a contar a partir do momento que forem colocados os corpos de prova em contato com a água. Para determinação das respectivas massas, é necessário enxugar os corpos de prova com pano úmido, para retirar o excesso de água. Feita a determinação da massa, os corpos de prova devem voltar imediatamente ao recipiente de ensaio.

Para determinação do coeficiente de absorção capilar deve utilizar a equação 5.6.

$$C = \frac{A - B}{\text{área}} \quad (5.6)$$

Onde:

C= absorção de água por capilaridade (g/cm²);

A= massa do corpo de prova após imersão no recipiente de ensaio para o respectivo tempo (g)

B= massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de 23±2°C (g).

área = área da seção transversal (cm²);

6. RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 Resultados do Estudo no Campo Experimental da Unicamp

Nesta etapa do trabalho realizou-se um estudo comparativo entre argamassas utilizadas para o preenchimento de estacas do tipo raiz, executadas no Campo Experimental da Unicamp. As argamassas foram executadas no mesmo dia, porém para a argamassa industrializada os corpos de prova foram obtidos por extração após a exumação da estaca, e os corpos de prova da argamassa convencional foram moldados no momento de sua execução. Este ensaio comparativo com os respectivos corpos de prova foi realizado com aproximadamente seis anos após a moldagem e a extração dos corpos de prova (Tabela 6.1).

Tabela 6.1: Resultados do comparativo entre a argamassa industrializada e convencional do CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP.

Ensaio	Método de ensaio	Argamassa convencional	Argamassa Industrializada
Densidade de massa no estado endurecido (kg/m ³)	NBR 13280/05	1995	2133
Módulo de deformação dinâmico por ultra-som (MPa)	NBR 15630/08	22204	26626
Resistência à compressão axial (MPa)	NBR 14992/03	49,4	34,4
Absorção de água por capilaridade (g/cm ³) - A ₁₀	NBR15259/05	0,01	0,03
Absorção de água por capilaridade (g/cm ³) - A ₉₀	NBR15259/05	0,06	0,11
Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	NBR15259/05	1,0	1,6

Nota-se que o coeficiente de absorção capilar da argamassa industrializada apresentou resultado 60% maior comparado à argamassa convencional. Identifica-se que essa diferença se dá basicamente em função da relação A/C, que no caso é de 0,7 para a industrializada e 0,525 para a convencional. Portanto identificou-se

que o consumo de cimento e a relação A/C interferem diretamente na absorção capilar da argamassa.

6.2 Resultados do Estudo da Reologia de Argamassas convencionais formuladas em Laboratório

A Tabela 6.2 apresenta dosagens experimentais realizadas em laboratório. Observa-se que as argamassas convencionais, com consumo de cimento variando de 327 kg/m³ (1:4) a 592 kg/m³ (1:2), promovem uma boa fluidez, porém apresentam uma relação A/C muito elevada. Quanto menor o consumo de cimento mais água é necessário para manter a fluidez, isso, porém, oferece uma combinação perigosa, o que promoverá baixa durabilidade (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Somente a dosagem 1:2, permite uma fluidez necessária com uma relação A/C dentro dos parâmetros estabelecidos pela NRB 6122/2010 de 0,5 a 0,6. Isso mostra que o cimento interfere diretamente na reologia da argamassa, na lubrificação e deslizamento dos grãos de areia.

Tabela 6.2: Dosagem de argamassa em laboratório sem a utilização de aditivo superplastificante.

Traço	Cimento kg/m ³	Aditivo	Relação A/C	Mini slump (mm) 30min	Observação
1:4	327	0%	1,20	65	Não segregou
1:3	430	0%	0,85	65	Não segregou
1:2	592	0%	0,60	110	Não segregou

A Tabela 6.3 apresenta resultados de argamassas experimentais, preparadas em laboratório, utilizando como base os mesmos traços da Tabela

6.2, porém, para os quais, se fez uso de aditivo superplastificante para reduzir a quantidade de água na mistura.

Tabela 6.3: Dosagem de argamassa em laboratório com utilização de aditivo superplastificante.

Traço	Cimento kg/m ³	Aditivo	Relação a/c	Mini slump (mm) aos 30min	Observação
1:4	358	1%	0,936	65	Segregou
1:3	466	0,7%	0,67	65	Segregou
1:2	670	0,5%	0,4	130	Não segregou

Obs.: Para esse estudo, adotou-se como parâmetro de fluidez ideal, o valor mínimo de 90mm aos 30min, com base nos resultados encontrados em campo (Item 6.3).

Observa-se que reduzindo o consumo de cimento e a quantidade de água com a utilização de aditivos, há falta de finos para a argamassa, promovendo segregação (Figuras 6.1 e 6.2).



Figura 6.1: Fluidez da argamassa dosada em laboratório, traço 1:4 com aditivo.



Figura 6.2: Fluidez da argamassa dosada em laboratório, traço 1:2, com aditivo.

Da mesma forma observada anteriormente, somente a dosagem de argamassa 1:2 ($670 \text{ kg} / \text{m}^3$) apresentou bons resultados reológicos.

Não foi possível dosar uma argamassa com menos que 600kg de cimento por metro cúbico (1:3 e 1:4), com a utilização de aditivo superplastificante, pois houve segregação. Sem o uso de aditivo não houve segregação; porém, chegou-se a relações A/C elevadas, o que não promoveria a resistência mínima de 20MPa, preconizada pela NBR6122/2010. Isso mostra que o cimento interfere diretamente na reologia da argamassa como lubrificante e “retentor de água”, pois sua finura aumenta significativamente a área específica da argamassa, retendo a água e lubrificando para um melhor deslizamento entre as partículas de areia. Venancio (2008) cita que o alto consumo de cimento nesse tipo de argamassa é função da quantidade de água necessária para sua fluidez.

Portanto, é possível dizer que o traço ideal é da ordem de 1:2. Traços com menor quantidade de cimento devem ser corrigidos com adição de finos, assim como é feito nas argamassas industrializadas. Dessa forma, prosseguiu-se com os estudos tendo como base o traço 1:2, mas substituindo parte do cimento por aditivo inerte (filler) conforme exposto na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Argamassas dosadas e laboratório. Base 1:2, com adição de filler calcário.

Argamassa	Traço	Cimento kg/m³	Relação a/c	Mini slump (mm)	R28 (MPa)
Argamassa 336	1:1:4	336	0,80	70	17,30
Argamassa 475	1:0,43:2,86	475	0,57	85	22,50
Argamassa 616	1:0,11:2,22	616	0,44	115	36,40

Obs.: Utilizado 1% de aditivo superplastificante em relação a massa de cimento.
Valor do mini slump medido após 30 min de espalhamento.

As dosagens da Tabela 6.4 se mostraram eficientes, pois não houve segregação, sendo possível obter uma fluidez de 115 mm com relação A/C na ordem de 0,44 (argamassa 616).

6.3 Resultados do comparativo entre argamassas convencionais e industrializadas

Utilizando o mini slump, pôde-se avaliar a fluidez das argamassas preparadas em campo como também a dos grouts preparados em laboratório conforme Tabela 6.5. Na Figura 6.3 são apresentados os resultados obtidos em forma gráfica.

Tabela 6.5: Resultados do ensaio de abatimento (mini slump) para as argamassas coletadas em campo e para os “grouts”.

Mini Slump	1min	5min	10min	15min	30min
Obra 1	65	79	79	85	85
Obra 2	90	92	92	93	93
Grout 15 MPa	112	115	116	116	116
Grout 20 MPa	118	120	122	122	122
Grout 25 MPa	122	123	123	123	123
Grout 30 MPa	119	120	122	122	122

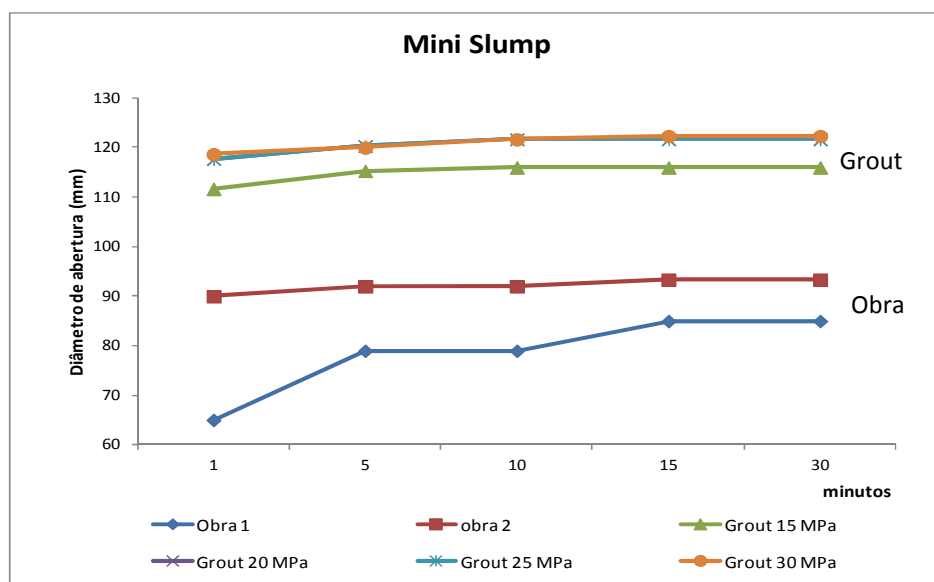


Figura 6.3: Gráfico da fluidez pelo ensaio do mini slump para as argamassas coletadas em campo e para os “grouts”.

Nota-se que as argamassas industrializadas possuem uma fluidez mais definida desde as primeiras leituras, esse comportamento pode ser atribuído a dois fatores que diferenciam as argamassas industrializadas das demais: granulometria controlada e utilização de aditivos.

A Tabela 6.6 apresenta as quantidades dos materiais empregados, bem como os resultados dos ensaios de compressão aos 7 e 28 dias. Na Figura 6.4 estes valores são apresentados graficamente.

Tabela 6.6: Resultados da resistência à compressão para as argamassas coletadas em campo e para os “Grouts”.

Argamassa	Consumo de cimento kg/m³	A/C	Consumo de água (L/m³)	R7 (MPa)	R28 (MPa)
Obra 1	605	0,72	435,60	17,30	25,60
Obra 2	636	0,82	521,52	14,43	21,23
Grout 15 MPa	242,00	1,09	263,78	15,24	19,23
Grout 20 MPa	286,00	0,92	263,12	22,38	23,23
Grout 25 MPa	330,00	0,80	264,00	28,13	30,27
Grout 30 MPa	374,00	0,71	265,54	26,05	33,50
Laboratório 336	336,50	0,80	269,20	não realizado	17,30
Laboratório 475	475,10	0,57	270,81	não realizado	22,50
Laboratório 616	616,00	0,44	271,04	não realizado	36,40

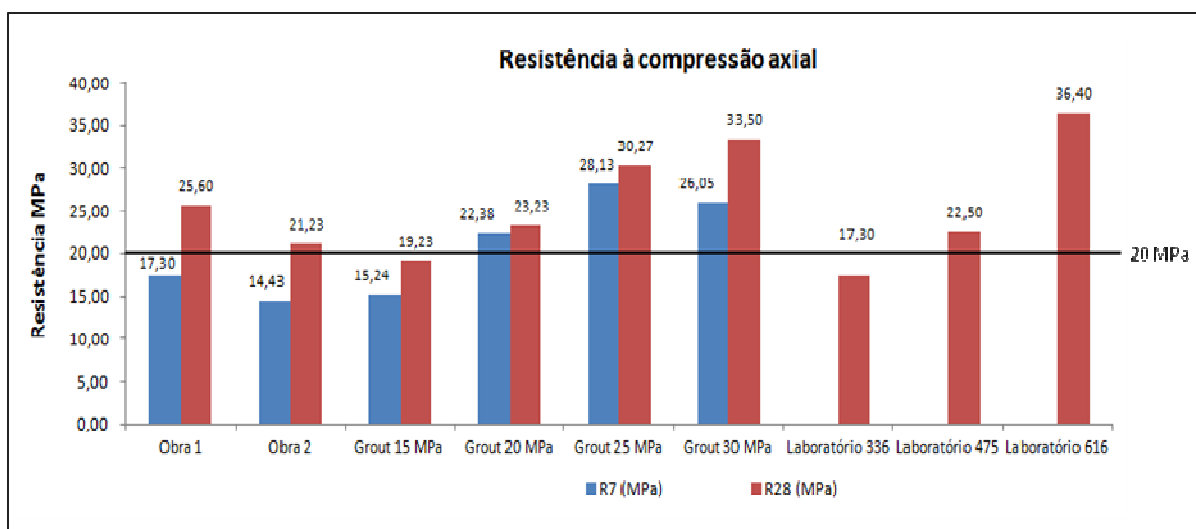


Figura 6.4: Resultados da resistência à compressão axial, para as argamassas coletadas em campo, “grouts” e de laboratório.

Observa-se que, quando otimizada, a mistura de argamassa com aditivo superplastificante e com correção na curva granulométrica através de adições de finos (filler calcário), chega-se a um patamar de consumo de água na ordem de 270 litros/m³. Isso ocorreu tanto para as formulações experimentais quanto para os grouts industrializados. A mistura mais otimizada apresentou um consumo de água na ordem de 263,12 L/m³ (Grout 20MPa).

Todas essas formulações apresentadas na Tabela 6.6 foram submetidas ao ensaio de absorção capilar conforme a NBR9779/95. Os resultados são apresentados na Tabela 6.7. A Figura 6.5 apresenta o gráfico dos resultados.

Tabela 6.7: Resultados da absorção capilar pelo método da NBR 9779/95, das argamassas coletadas em campo, experimentais e “grouts”.

		Absorção capilar (kg/m ²)				
Argamassa	A/C	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
Obra 1	0,72	0,18	0,20	0,25	0,30	0,34
Obra 2	0,82	0,72	0,82	1,03	1,12	1,18
Grout 15 MPa	1,09	0,39	0,53	0,96	1,26	1,56
Grout 20 MPa	0,92	0,29	0,38	0,66	0,87	1,20
Grout 25 MPa	0,80	0,26	0,34	0,61	0,81	0,99
Grout 30 MPa	0,71	0,25	0,33	0,54	0,69	0,82
Laboratório 336	0,80	1,27	2,09	3,74	4,74	5,56
Laboratório 475	0,57	1,07	1,68	2,74	3,36	3,84
Laboratório 616	0,44	0,33	0,69	0,86	1,05	1,30

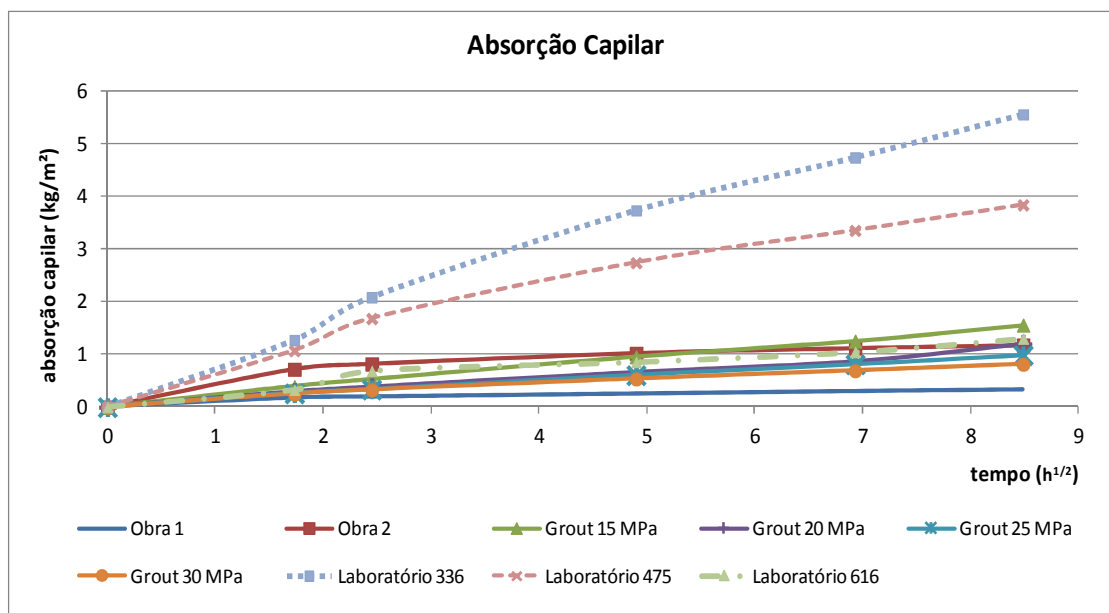


Figura 6.5: Resultados de absorção capilar para as argamassas convencionais e industrializadas.

Observa-se que as formulações experimentais 336 e 475 apresentaram uma absorção capilar muito maior que as demais estudadas, mesmo a formulação 475 que apresentou uma relação A/C na ordem de 0,57. Credita-se esse aumento da absorção à distribuição granulométrica global, principal diferença entre as argamassas. Isso mostra que, além do consumo de cimento e da relação A/C, ainda se tem mais uma variável de influência à absorção capilar e, portanto, na durabilidade: distribuição granulométrica global. Esta propriedade mostrou-se importante não somente para promover a fluidez necessária para uma formulação otimizada, como também para garantir uma absorção capilar menor, considerando que argamassas com menor consumo e menor A/C apresentaram menor absorção.

Para facilitar a compreensão e análise, foram excluídas do gráfico as formulações experimentais Laboratório 336 e 475 (Figura 6.6).

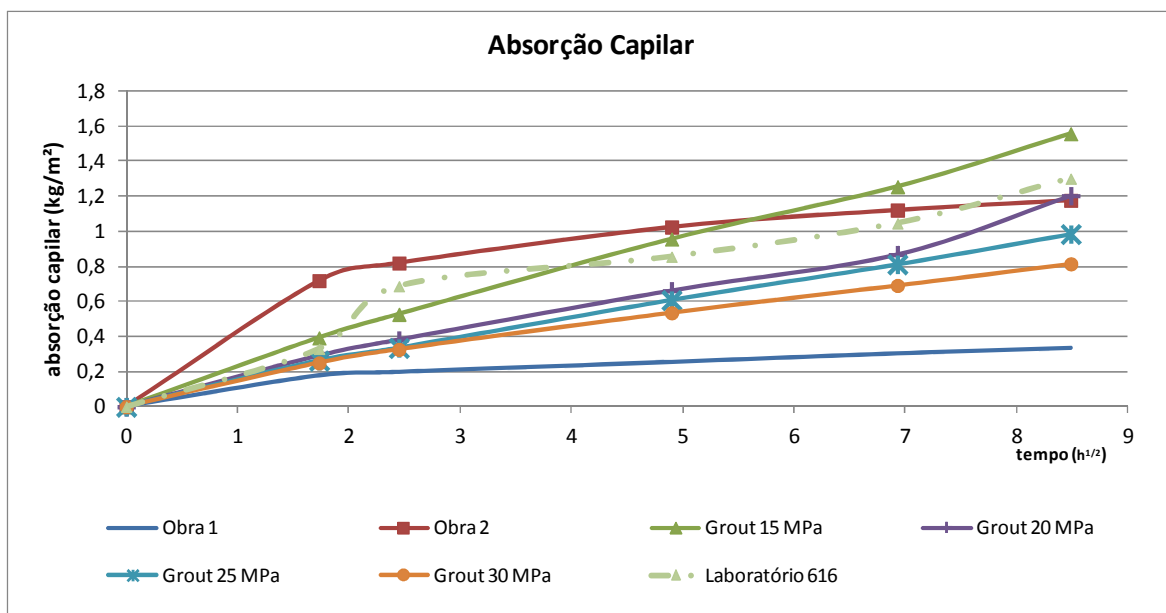


Figura 6.6: Resultados de absorção capilar para as argamassas convencionais e industrializadas, sem as misturas de laboratório 336 e 475.

Tendo como referência as argamassas coletadas nas duas obras (obra 1 e obra 2), o grout 15 MPa e as argamassas laboratório 336 e 474 estão com valores de absorção acima das demais. Se considerar a recomendação da NBR6122/2010 que fixa o consumo mínimo de cimento em 600kg/m³ e relação A/C entre 0,5 a 0,6, a formulação Laboratório 616 atende a essas especificações, com a vantagem de ter uma relação A/C menor do que a faixa especificada por Norma; portanto, mais eficiente, mais durável, considerando que quanto menor a relação A/C menor será a permeabilidade da argamassa (MILITITSKY et al., 2005). Como a permeabilidade é um parâmetro de durabilidade (SILVA,1993), todas as formulações que estão abaixo da formulação experimental Laboratório 616 são teoricamente mais duráveis do que ela.

Observando a distribuição granulométrica dos Grouts 20, 25 e 30MPa (Figuras 5.8, 5.10 e 5.12) , comparada com a formulação experimental Laboratório 616 (Figura 5.18) verifica-se que há semelhança, porém com um diferencial na quantidade de finos (fundo do peneiramento) (Tabelas, 5.8, 5.9 e 5.10 para os grouts e tabela 5.17 para a formulação experimental Laboratório 616). Observou-

se que as formulações com melhor desempenho quanto à absorção capilar apresentaram maior quantidade de finos.

Avaliando os resultados da absorção capilar (Figura 6.5), em função dos seus respectivos consumos e relações A/C, observa-se que, isoladamente, essas variáveis não são garantia de durabilidade, visto que a argamassa experimental Laboratório 475 foi concebida com relação A/C de 0,57, porém apresentou a segunda maior absorção capilar. Com relação ao consumo de cimento, o Grout 30MPa, com menor consumo e maior A/C promoveu uma argamassa com a segunda menor absorção capilar do conjunto estudado.

O trabalho de Schulze (1999) mostra o escalonamento das variáveis consumo de cimento e relação A/C, para os quais há uma sobreposição em determinadas faixas de trabalho (Figura 3.14), ou seja, o autor conclui que quanto menor a relação A/C, menor será a absorção capilar. Com o acréscimo de cimento, e não alterando a relação A/C, há uma diminuição da absorção capilar, mas para pequenas variações, mesmo com um consumo de cimento maior, concretos de mesmo A/C apresentaram mesma absorção, como por exemplo, um concreto contendo 23% de cimento e $A/C=0,55$ apresentou a mesma absorção que outro com 26% de cimento e mesmo A/C. Assim o consumo de cimento, tratado isoladamente, não é garantia de baixa absorção capilar.

Portanto o conjunto consumo de cimento, relação A/C e distribuição granulométrica juntamente com a utilização de aditivos podem promover uma argamassa mais eficiente.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou que o comportamento reológico da argamassa está ligado diretamente com o consumo de cimento, pois este material atua como lubrificante para o deslizamento da areia e também auxilia na retenção de água em função da sua área de molhagem (área específica) fornecendo coesão sem que haja segregação. Concluiu-se que, para argamassas nas quais não seja possível controle granulométrico e relação A/C, como as dosadas em obra, deve-se utilizar um consumo de cimento superior a 600 kg/m^3 a fim de garantir a baixa permeabilidade da argamassa.

As formulações de Grouts se mostraram eficientes quanto ao conjunto: redução de consumo de cimento e absorção capilar. Tais formulações possuem uma granulométrica global melhor distribuída, com mais finos do que argamassas convencionais, possibilitando trabalhar com consumos menores que 600 kg/m^3 sem prejuízo para a durabilidade.

Quando se avalia a quantidade de finos disponível nas argamassas, o presente estudo mostrou que se pode reduzir o consumo de cimento com substituição de finos, proporcionando uma menor absorção capilar, desde que se tenha uma curva granulométrica melhor distribuída e o consumo de água seja otimizado com o uso de aditivos, como é o caso do Grout 30 MPa.

Caso não se tenha tecnologia disponível na obra para execução de argamassas para estaca raiz, como controle granulométrico e utilização de aditivos, deve-se utilizar o consumo de cimento superior a 600 kg/m^3 , pois é um bom agente para garantir a baixa permeabilidade e tolerar todas as variações do processo: garantia da durabilidade e resistência. Nesses casos, o alto consumo de cimento promove uma menor relação A/C e proporciona finos para que não se tenha segregação.

Com foco em sustentabilidade como se busca nos dias de hoje, a presente pesquisa mostrou que é possível utilizar argamassas com consumo de cimento

abaixo dos 600 kg/m³ sem prejuízo à durabilidade (argamassas de baixa permeabilidade), desde que se tenha tecnologia. É necessário um rigoroso controle do consumo de cimento, relação A/C, distribuição granulométrica e uso de aditivos, para se obter uma argamassa de baixa absorção. A utilização destas variáveis isoladamente ou parcial não garante o bom desempenho de durabilidade a não ser a variável consumo de cimento, que acima do patamar de 600 kg/m³ é capaz de absorver todas as variáveis do processo.

Somente a redução da relação A/C não foi suficiente para garantir uma argamassa com baixos valores de permeabilidade. Argamassas com menor consumo de cimento e maior relação A/C se mostraram mais eficientes, mas isso só foi possível com a adição de finos (filler calcário) para melhorar a distribuição granulométrica global.

Com base nas recomendações de dosagem para locais de maior classe de agressividade a presente pesquisa propõe que os valores de absorção capilar para o preenchimento de estaca raiz estejam abaixo de 0,8 kg/m² para o tempo de 24 h.

Concluiu-se que é possível utilizar argamassa industrializada para o preenchimento de estaca raiz, mesmo com consumo de cimento menor que 600 kg/m³ desde que atenda a resistência mínima de 20 MPa, mas com absorção capilar conhecida, sendo sugeridas absorções, conforme apresentado anteriormente (inferiores a 0,8 kg/m²/24h)

O conhecimento da agressividade do solo é de extrema relevância, para o correto dimensionamento da argamassa e consequentemente a adoção de medidas mitigadoras mais eficazes como a utilização de adições ou mesmo a utilização de cimentos resistentes ao ataque de sulfatos.

O aparelho de mini slump mostrou-se eficaz para a verificação da fluidez e homogeneidade das argamassas, sendo recomendado para o controle das argamassas em obra, principalmente para o controle da segregação, muito comum em argamassas fluídas.

7.1 Sugestões para futuras pesquisas

Estudar aprofundadamente a agressividade dos solos, devendo-se conhecer as condições nas quais o material será inserido para poder fazer o uso das diversas recomendações das normas vigentes quanto à definição da classe de agressividade, permitindo assim escolher as recomendações das normas mais restritivas.

Deve-se aprofundar o estudo em dosagens de argamassas com diversos tipos de cimento, podendo definir parâmetros de consumo mínimo de cimento e relação A/C dependendo do tipo de cimento, como por exemplo, a utilização de cimentos resistentes a sulfatos.

Como o preenchimento da estaca raiz é realizado em condições submersas, pode ser estudada a utilização de aditivos para melhorar e manter a integridade da argamassa debaixo da água. Como por exemplo, a utilização de aditivo Látex permite que a argamassa não se “desfaça” na água mantendo sua coesão. Esses mesmos aditivos podem dar condições de baixíssima permeabilidade para regiões extremamente agressivas, como áreas contaminadas por produtos químicos.

8. REFERÊNCIAS

ABEF, Associação Brasileira de Empresas de Fundações e Geotecnia. (2204). Manual de Especificações de Produtos e Procedimentos ABEF. Editora Pini, 3ª edição, 410p.

ABNT. NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 2007.

ABNT. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 1996.

ABNT. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 2010.

ABNT. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificações. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 1982.

ABNT. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 1991.

ABNT. NBR 7680: Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 2007.

ABNT. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 1995.

ABNT. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 2006.

ABNT. NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 2005.

ABNT. NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 1995.

ABNT. NBR 14992: Argamassas a base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas – Requisitos e métodos de ensaio. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 2003.

ABNT. NBR 15259: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 2005.

ABNT. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de normas técnicas, 2008.

AGOPYAN, V. JOHN, V. M. **O Desafio da sustentabilidade na Construção Civil**. Volume 5. p.141. São Paulo: Editora Blucher, 2011.

ALONSO, U. R. Execução de Fundações Profundas: Estacas injetadas. In: W. Hachich; F. F. Falconi; J. L. Saes; et al. (Eds); **Fundações Teoria e Prática**. 2nd Ed., p.361-408. São Paulo: PINI, 1998.

AMANN, K. A. P. **Avaliação crítica de métodos de previsão de carga de ruptura, aplicados a estaca raiz**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.

BARKER. A. P. MATTHEWS. J. D. Concrete durability specification by water/cement or compressive strength for European cement types. **Durability of concrete**. Third International Conference, Nice, France. V.M. Malhotra. ACI – SP – 145 62.p. 1135 a 1159. 1994.

BAUER. L. A. F. **Materiais de Construção**, 2nd ed. v1, p342. Livros técnicos e científicos editora S.A. Rio de Janeiro – RJ. 1985.

BORSOI, A. COLLEPARDI, S. COPPOLA, L. TROLI, R. COLLEPARDI, M. Sulfate Attack on Blended Portland Cements. Durability of Concrete, **Proceedings Fifth International Conference Barcelona**. v1. V.M. Malhotra, ACI international SP192 – 26, p.417 a 425. 2000

CARASEK, H., Argamassas. In: G. C. Isaia. **Materiais para Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. v2, p.863-904. IBRACON, (2007)

CARDODO, F. A. PILEGGI, R. G. JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. **VI SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**. Anais... . Florianópolis, 2005.

CUNHA, J. C. **A História das Construções**. Da pedra lascada às pirâmides de Dahchur. v1, p281. Autêntica. 2009.

CUNHA, J. C. **A História das Construções**. Das grandes pirâmides de Gisé ao templo de Medinet Habu. v2 , p372. Autêntica. Belo Horizonte2009.

DHIR, R. K., JONES, M. R., BYARS, E. A., SHAABAN, I. G. Predicting concrete durability from its absorption. **Durability of concrete, Third International Conference**, Malhotra. ACI – SP – 145 62.p. 1177 a 1194. Nice, France, 1994.

FERRARIS, C. F. OBLA, K. H. HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and concrete research**. P 245-255, 2001.

FUNDESP. **Manual Técnico da FUNDESP**. 5nd ed. junho/2001.

FUNDESP. www.fundes.com.br – site oficial, 13/08/2011 – 21:00. 2011.

HELENE, P. GARCIA, M. NETO, C. S. Fundações em Concreto: Projeto, Execução e Patologia, SEFE V – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. **Anais...** p.553–579, São Paulo, 2004.

HELENE, P. ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: G. C. Isaia. **Materiais para Construção Civil e Princípio de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1nd ed. v2. , p.908. Ibracon. 2007.

JOHN, W. Seminário de sustentabilidade aponta os caminhos para o desenvolvimento sustentável na Construção Civil. IBRACON. Instituto Brasileiro de Concreto. **Concreto & Construções**, Ano XXXVII. N.56. p. 100–108. out. / nov. / dez. 2009.

KAKIZAKI, M. EDAHIRO, H. FUJII, K. NAKASE, H. Effects of Mixture Proportions on Permeability and Pore Structure of High-Fluidity Concretes. **Durability of Concrete, Proceedings Fifth International Conference Barcelona**, VII, Malhortra, ACI international SP-192 – 46. P.755 a 769. Spain, 2000.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a mini slump teste. **Cement and concrete aggregates**. v2. n2. P.95-102. Winter, 1980.

KARMANN, I. Ciclo da Água, Água Subterrânea e sua Ação Geológica. In: W. Teixeira; M. C. M. Toledo; T. R. Fairchild; et al. **Decifrando a Terra**, p.568. oficina de textos, São Paulo, 2003.

KOEHLER, E. P. FOWLER. D.W. Sumary of concrete workability test methods. ICAR – **International center for aggregates research** 105-1, p 70-92. 2003.

LAISTER, E., ALBUQUERQUE. P. J. R. NOGUEIRA, R. C. R., CARVALHO, D. FILHO, J. A. P. Utilização de Argamassa Industrializada para o Preenchimento de Estaca Raiz. SEFE V – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. **Anais...** .p.120-126. São Paulo. 2004.

LIZZI, F. Reticoli di Pali Radice per El miglioramento delle caratteristiche di resitenza del terreno. In: **CONVEGNO DI GIOTECNIA**, 10nd. Italy, Bari. 1970.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo**. p.257. Interciência: PETROBRÁS. Rio de Janeiro. 2002.

MAÑÁ, F. **Patologia de lãs cimentaciones**. p.117. Blume. Barcelona. 1978.

MARTINS, A. R. **Efeito da cura térmica e de cimentos com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobrimento**. Campinas: UNICAMP, 2001.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais**. p674. 3nd ed. Ibracon, São Paulo, 2008.

MILITITSKY, J. CONSOLI, N. C. SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. P.207. Oficina de Textos. São Paulo, 2005.

MONTOYA, M. Hormigón: **Especificaciones, diseño y patologias**. p 81-239. Madri Espasa Calpe, 2001.

NETO, A.D.F.N. História das Fundações. In: W. Hachich; F. F. Falconi; J. L. Saes; et al. (Eds); **Fundações Teoria e Prática**. 2nd ed. p17-33. São Paulo: PIN, 1998.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2nd ed. p828. São Paulo: PINI, 1997.

PARROTT, L.J. Warer absorption in cover concrete. **Materials and Structures**, v25, p284-292, 1992.

PENNA, C. D. Argamassa Industrializada, **Revista Construções e Negócios**, edição de número 30. www.revistaconstrucaoenegocios.com.br/materias.php?FhldMateria=1270, 14/08/2011 20:37, 2011.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 5nd ed. p.307. Globo. Porto Alegre, 1978.

PIOVEZAM, I. A. R. MELEIRO, L. P. ISA, M. M. Influência da adição no comportamento reológico da pasta autoadensável de alto desempenho. **Acta Sci Technol**, v.30, n2, p.155-159, Maringa, 2008.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 2nd ed., p.247. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

REGATIERI, C. E., SILVA, L. R. Ganhos na Utilização da Argamassa Industrializada. V SBTA – Simpósio brasileiro de tecnologia em Argamassas. Anais de congresso. **Anais...** . São Paulo, 2003.

SÁNCHEZ, P. L. Durabilidad Del hormigón em ambiente marinho. Cuadernos Intemac. **Instituto Técnico de Materiales Y Construciones**, n31, 3 trimestre, 1998.

SILVA, D. A. **Levantamento de Problemas em Fundações Correntes no Estado do Rio Grande do Sul**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993.

SILVA, P. F. A. Permeabilidade do concreto, uma medida de durabilidade. p.18-21. **IBRACON**, abril 1993, São Paulo.

SCHULZE, J. Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars. **Cement and Concrete Research**, p.909–915, 1999.

SOUZA, J. G. G. **Contribuição ao Estudo das Propriedades das Argamassas de Revestimento no Estado Fresco**. Universidade de Brasília, 2005.

TOLEDO, M. C. M., OLIVEIRA, S. M. B., MELFI, A. J. Intemperismo e Formação do Solo. In: W. Teixeira; M. C. M. Toledo; T. R. Fairchild; et al. **Decifrando a Terra**, p.568. oficina de textos, São Paulo, 2003.

VARGAS, M. História das Fundações. In: W. Hachich; F. F. Falconi; J. L. Saes; et al. (Eds); **Fundações Teoria e Prática**. 2nd ed. p.34-50. São Paulo: PIN, 1998.

VENANCIO, P. B. F. Dosagem de Argamassa para Estaca Raiz. Dissertação de mestrado em Estruturas e Construção Civil. P.175. **Publicação EDM – 013A/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**, Universidade de Brasília, 2008.

VOTORANTIM CIMENTOS, Catálogo Técnico do Sistema Matrix. **www.votorantimcimentos.com.br** , site oficial, 14/08/2011 – 20:01.

WASSERMANN, R. KATZ, A. BENTUR, A. Minimum cement content requirements: a must or a myth?, **Materials and Structures**. 42: p.973-982, 2009.