



Centro de Tecnologia e Urbanismo
Departamento de Engenharia Elétrica

Osni Vicente

Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina como Parte dos Requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Londrina, PR
2010



Osni Vicente

Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina como Parte dos Requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletrotécnica
Especialidade: Sistemas Elétricos

Orientador:
Profa. Dra. Silvia G. Souza Cervantes

Londrina, PR
2010

Ficha Catalográfica

Vicente, Osni

Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural. Londrina, PR, 2010. 99 p.

Qualificação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica

1. Aterramento estrutural. 2. Resistividade elétrica do concreto. 3. Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. 4. Sistemas Elétricos. I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica . Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Osni Vicente

Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina como Parte dos Requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletrotécnica
Especialidade: Sistemas Elétricos

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Silvia Galvão de Souza
Cervantes
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Depto. de Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Ernesto Fernando Ferreyra Ramirez
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Henrique Santana
Departamento de Química
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 09 de Dezembro de 2010

Resumo

Diante das solicitações exigentes de uma descarga atmosférica, o sistema de aterramento por estruturas de concreto armado tem sido reconhecido, quando bem executado, um excelente método de proteção para edificações. Embora existam muitos estudos na área, pouco se tem falado, no entanto, sobre a influência da composição do concreto em seu comportamento elétrico. Uma vez que a corrente de descarga necessariamente passa pelo concreto como meio condutor antes de dissipar-se no solo, o conhecimento de suas características nas condições reais de uma construção usual nos fornece uma informação importante sobre a segurança da instalação e a integridade do concreto. Neste trabalho procura-se levantar relações entre a resistência elétrica, a umidade e o traço do concreto encontrado normalmente em construção civil. Diversos corpos de prova (CP) são levados a ensaios em alta e baixa tensão com o objetivo de determinar uma relação entre a impedância em AT (e também a resistência em BT) com as diferentes proporções de água/cimento dentro de cada traço e condição de umidade especificados. O trabalho também apresenta uma metodologia de ensaio com relação à preparação e manipulação dos corpos de prova de concreto, utilizando as recomendações práticas da área de construção civil, trazendo uma experiência e um conjunto de critérios pouco explorados pelos engenheiros eletricitas na área de aterramentos. Os resultados mostram que é possível controlar as variáveis envolvidas na confecção dos CP para obter maior homogeneidade nos valores de massa seca, massa úmida saturada e resistividade elétrica. Os testes mostram ainda a importância de utilizar um alto teor de umidade nos CP, uma vez que o trabalho se dirige ao concreto de elementos de fundação. O estudo não garante a integridade do concreto úmido quando atravessado por correntes de descargas atmosféricas, mas fornece indícios de que sua utilização é segura para aterramentos estruturais e abre perspectivas para novos estudos.

Palavras-Chave: 1. Aterramento estrutural. 2. Resistividade elétrica do concreto. 3. Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. 4. Sistemas Elétricos.

Abstract

Given the exacting demands of a lightning strike, the grounding system for reinforced concrete structures has been recognized, when properly executed, as an excellent method for protecting buildings. Although there are many studies in the area, little has been said, however, about the influence of the composition of concrete on its electrical behavior. Since the discharge current necessarily passes through the concrete as conductive medium before dissipating into the soil, the knowledge of its characteristics in real conditions of an usual construction provides us with important information about the safe installation and integrity of the concrete. In this study we aimed to raise relations between electrical resistance, moisture and trace normally found in concrete construction. Several tests are carried out with samples at high and low voltage with the intention of seeking a relationship between the impedance at high voltage (and also resistance to low voltage) with different water/cement ratios within each trait and each specified condition of moisture. The work also includes a chapter on the testing methodology regarding the preparation and handling of test samples of concrete, using the practical recommendations of the construction area, bringing an experience and a set of criteria rarely explored by electrical engineers in the area of groundings. The results show that it is possible to control the variables involved in the production of CP to achieve greater uniformity in the values of dry weight, wet saturated weight and electrical resistivity. The tests also show the importance of using a high moisture content in CP, since the work is directed to the concrete foundation elements. The study does not guarantee the integrity of the wet concrete when crossed by currents of lightning strikes, but provides evidence that their use is safe for structural grounds and opens perspectives for further studies.

Keywords: 1. Structural grounding. 2. Electrical resistivity of the concrete. 3. Lightning protection. 4. Electrical systems.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1	Introdução	1
1.1	Objetivo Geral	3
1.2	Objetivos específicos	3
1.3	Organização do Trabalho	4
	Referências	4
2	Sistemas de aterramento estrutural: discussão atual	5
2.1	Breve histórico	5
2.1.1	Critérios das normas técnicas	7
2.1.2	Discussões entre profissionais da área	9
2.2	Vantagens do aterramento estrutural: a questão estética	10
2.3	A questão da equipotencialização	11
2.4	Um argumento de bom senso	12
2.4.1	Cuidados necessários para a execução	13
2.4.2	Por onde é dispersada a corrente de aterramento	16
2.4.3	Baldrames e estacas	17
2.5	Comentários e observações parciais	20
2.6	Conclusões	21
3	Fundamentos teóricos	22
3.1	Terminologia básica	22

3.2	Concreto - dados gerais	23
3.2.1	Dosagem do concreto	24
3.2.2	Relação água/cimento	24
3.2.3	Segregação	25
3.2.4	Exsudação	26
3.2.5	A mistura do concreto	26
3.2.6	Ordem de colocação dos materiais	28
3.2.7	Adensamento do concreto	29
3.3	Fenômenos eletroquímicos relacionados ao concreto	30
3.3.1	Poros do concreto	30
3.3.2	Resistividade do concreto sob tensões eletroquímicas	34
3.4	Variabilidade da resistividade do concreto em BT e AT	35
3.5	Fatores que afetam a resistividade do concreto	38
3.5.1	A umidade	39
3.5.2	Outras variáveis importantes	40
3.6	Descargas atmosféricas: conceitos básicos	44
3.6.1	Conceitos e fenômenos de AT aplicados a ensaios	45
3.6.2	A ruptura do concreto	45
3.6.3	Comportamento elétrico do concreto em AT	49
4	Metodologia	52
4.1	Materiais	52
4.2	Metodologia de ensaio para confecção dos CP em BT	53
4.3	Metodologia de ensaio para confecção dos CP para ensaios em AT	57
4.4	Metodologia de ensaio para levantar valores de resistência em BT	57
4.5	Metodologia de ensaio para levantar valores de resistência em AT	59
5	Resultados e discussão	61
5.1	Valores de impedância em AT	61

5.1.1	Valores de resistividade para CP úmidos	63
5.1.2	Análise geral de AT: valores encontrados	64
5.2	Um teste: enterrando CP para determinar o valor de umidade . .	76
5.3	Levantamento dos valores de massa seca e saturada	78
5.4	Levantamento dos valores de resistência em BT	82
6	Conclusão	91
	Anexo A - Dados Meteorológicos	93
	Referências	97

Lista de Figuras

2.1	Pilotis: solução arquitetônica de pilares sem paredes.	10
2.2	Ruptura de fachada por corrente de descarga atmosférica proveniente do sistema de descida do aterramento. Fonte:(ALVES, 2006)	12
2.3	Quatro conexões para estudo da passagem de correntes simuladas de descargas atmosféricas.	14
2.4	Escavações para baldrames.	17
2.5	Fôrmas para baldrames.	18
2.6	Baldrames concretados e com camada de impermeabilização. . . .	18
2.7	Baldrames como apoio para as paredes.	18
2.8	Bloco de coroamento com quatro estacas.	19
2.9	Armadura para bloco de coroamento.	19
2.10	Bloco de coroamento concretado.	20
3.1	Posicionamento das moléculas de água sob diversas formas na pasta de cimento.	33
3.2	Exsudação da água junto aos agregados.	33
3.3	Efeito do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto ((GJORV; VENNESLAND; EL-BUSAIDY, 1977)).	41
3.4	Resistividade elétrica x relação água/cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado a 28 dias.	42
3.5	Efeito do teor do agregado sobre a resistividade elétrica do concreto.	43
3.6	Efeito da temperatura sobre a resistividade elétrica do concreto. .	43
3.7	Curva padronizada de tensão impulsiva. O1 - origem virtual; I - valor de pico da corrente; T1 - tempo de subida; T2 - tempo compreendido da origem até a metade do valor de pico na descida da onda. Fonte: IEC INTERNATIONAL STANDARD 62305-1, Protection against lightning Part 1: General principles.	46

3.8	Beiral atingido por descarga atmosférica. Fonte: (Hartono 2000) .	46
3.9	O rompimento do concreto deixa exposta a armadura. Fonte: (ALVES, 2006)	46
3.10	Fragmentos caídos de beiral atingido por descarga: perigo para pessoas. Fonte: (ALVES, 2006)	47
3.11	Edificação rural atingida por descarga. Fonte: (ALVES, 2006) . . .	48
3.12	Detalhes do telhado por onde penetrou a descarga. Fonte: (ALVES, 2006)	48
4.1	Bloco de coroamento montado sobre quatro estacas.	53
4.2	Betoneira utilizada nos ensaios.	54
4.3	Mistura de concreto com segregação evidente.	55
4.4	Corpo de prova 10x20 cm com placas metálicas paralelas para aplicação de tensão e corrente.	58
5.1	Gráfico com forma típica de tensão impulsiva com pico de 14kV .	62
5.2	Gráfico de tensão impulsiva aplicada sobre CP com baixo teor de umidade, com pico em torno de 70 kV.	65
5.3	Gráfico de corrente em CP com baixo teor de umidade, sob tensão impulsiva de 70 kV.	65
5.4	Gráfico com detalhe da subida de tensão impulsiva em CP com baixo teor de umidade.	66
5.5	Gráfico com detalhe da subida da corrente impulsiva em CP com baixo teor de umidade.	66
5.6	Gráfico da tensão e corrente, comparando formas de onda sobre CP com baixo teor de umidade.	67
5.7	Gráfico da impedância em ohms sob tensão impulsiva para CP com baixo teor de umidade.	67
5.8	Gráfico de tensão impulsiva aplicada em CP com alto teor de umi- dade, com pico em torno de 70 kV.	68
5.9	Gráfico de corrente impulsiva em CP com alto teor de umidade, sob tensão impulsiva de 70 kV.	68

5.10	Gráfico com detalhe da subida de tensão impulsiva em CP com alto teor de umidade.	69
5.11	Gráfico com detalhe da subida da corrente impulsiva em CP com alto teor de umidade.	69
5.12	Gráfico da tensão e corrente em CP com alto teor de umidade, comparando formas de onda.	70
5.13	Gráfico da impedância em ohms sob tensão impulsiva para CP com alto teor de umidade.	70
5.14	Gráfico de tensão impulsiva negativa aplicada em CP com baixo teor de umidade, com pico em torno de 70 kV.	71
5.15	Gráfico de corrente impulsiva em CP com baixo teor de umidade, sob tensão impulsiva de 70 kV.	71
5.16	Gráfico com detalhe da variação de tensão impulsiva negativa em CP com baixo teor de umidade.	72
5.17	Gráfico com detalhe da variação da corrente impulsiva em CP com baixo teor de umidade.	72
5.18	Gráfico da tensão impulsiva negativa e corrente em CP com baixo teor de umidade, comparando formas de onda.	73
5.19	Gráfico da impedância impulsiva para impulso negativo sobre CP com baixo teor de umidade.	73
5.20	Curva da massa média dos CP imersos em água.	78
5.21	Curvas de variação de resistência elétrica em função do teor de umidade para três valores de relação água/cimento.	88
5.22	Curvas de variação de resistência elétrica em função da relação água/cimento para quatro valores de teor de umidade.	88

Lista de Tabelas

3.1	Valores de impedância em Ω para CP 10x30 cm, traço 1:2:3 (amostras 1 e 2) e traço 1:1:2 (amostras 4 e 6), sob tensão impulsiva.	36
3.2	Valores de impedância em Ω , para CP 10x30 cm, traço 1:2:3 (amostras 1 e 2) e traço 1:1:2 (amostras 4 e 6), sob tensão impulsiva, para diferentes valores de temperatura ambiente.	37
5.1	Valores de resistência dinâmica em Ω , para CP 10x30 cm, traço 1:2:3 (amostras 1 e 3) e traço 1:1:2 (amostras 4 e 6), sob tensão impulsiva.	63
5.2	Médias de valores de impedância em Ω , para CP 10x30 cm, traço 1:2:3 (amostras 1 e 3) e traço 1:1:2 (amostras 4 e 6), sob tensão impulsiva AT (resistência dinâmica) e sob tensão alternada BT.	75
5.3	Valores de massa e teores de umidade	77
5.4	Valores medidos de massa seca e massa saturada, com quantidade de água absorvida e teor de umidade para CP de 10x20 cm e 15x30 cm, com relação a/c = 50%.	79
5.5	Valores medidos de massa seca e massa saturada, com quantidade de água absorvida e teor de umidade para CP de 10x20 cm e 15x30 cm, com relação a/c = 53%.	80
5.6	Valores medidos de massa seca e massa saturada, com quantidade de água absorvida e teor de umidade para CP de 10x20 cm e 15x30 cm, com relação a/c = 56%.	81
5.7	Valores de resistência mecânica em MPa para CP 10x20 cm e 15x30 cm, traço 1:2:3, para três relações de água/cimento.	82
5.8	Quadro de valores de tensão, corrente e resistência elétrica para 10 CP com relação a/c de 56%, com teor de umidade de 100%.	83
5.9	Massas esperadas para os CP com relação água/cimento de 0,50 nos teores de umidade de 85%, 90% e 95%.	84

5.10	Massas esperadas para os CP com relação água/cimento de 0,53 nos teores de umidade de 85%, 90% e 95%.	85
5.11	Massas esperadas para os CP com relação água/cimento de 0,56 nos teores de umidade de 85%, 90% e 95%.	85
5.12	Valores médios de resistência elétrica para relação água/cimento 0,50 em $k\Omega$ para vários teores de umidade.	87
5.13	Valores médios de resistência elétrica para relação água/cimento 0,53 em $k\Omega$ para vários teores de umidade.	87
5.14	Valores médios de resistência elétrica para relação água/cimento 0,56 em $k\Omega$ para vários teores de umidade.	87
A.1	Dados meteorológicos fornecidos pelo IAPAR correspondentes ao mês de junho de 2010.	94
A.2	Dados meteorológicos fornecidos pelo IAPAR correspondentes ao mês de julho de 2010.	95
A.3	Dados meteorológicos fornecidos pelo IAPAR correspondentes ao mês de agosto de 2010.	96

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI American National Standards Institute

ASE Association Suisse des Electriciens

CIGRÉ Conseil International des Grands Réseaux Électriques (Conselho Internacional de Grandes Redes Elétricas)

CTU Centro de Tecnologia e Urbanismo da UEL

IAPAR Instituto Agrônômico do Paraná

IEC International Electrotechnical Commission

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEE-USP Instituto de Eletrotécnica e Energia - USP

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

NBR NM norma brasileira aprovada em conjunto com países do Mercosul

NBR norma brasileira da ABNT

NEC National Electrical Code (USA)

UEL Universidade Estadual de Londrina

USP Universidade de São Paulo

a/c relação água/cimento

AC alternating current (corrente alternada)

AT alta tensão

BT baixa tensão

CP corpos de prova de concreto

DC corrente contínua (direct current)

FES functional electrical stimulation

SPDA sistemas de proteção contra descargas atmosféricas

A ampere

V volt

kA quiloampere

kV quilovolt

mA miliampere

mV milivolt

μ A microampere

μ V microvolt

nA nanoampere

Ω ohm

k Ω quiloohm

M Ω megaohm

Ω m ohm.metro

Ω cm ohm.centímetro

C coulomb

MHz megahertz

kg quilograma

s segundo

ms milissegundo

μ s microssegundo

ns nanossegundo

m metro

dm decímetro

cm centímetro

mm milímetro

Nm newton metro

N/C newton por coulomb

ϕ diâmetro

Dmax diâmetro máximo

MPa megapascal

$^{\circ}\text{C}$ graus celsius

1 Introdução

A grande preocupação mundial pela segurança das instalações tem servido de estímulo para muitos trabalhos técnicos e científicos relacionados à qualidade dos materiais, técnicas construtivas, critérios de segurança, etc. As normas internacionais têm estabelecido uma série de novos critérios nos últimos anos. O Brasil, seguindo a tendência mundial, acompanha a mesma preocupação.

Concretamente, ao falar de segurança predial, destacam-se no campo da Engenharia Elétrica as normas técnicas (NBR5410, 2004) e (NBR5419, 2005). Ambas tratam de critérios relacionados à segurança de instalações prediais.

Entre os muitos temas tratados na (NBR5410, 2004), encontram-se alguns critérios específicos sobre segurança predial quanto à proteção contra descargas atmosféricas.

As normas técnicas classificam em três partes os componentes de um SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas): subsistema de captação, subsistema de descida e subsistema de aterramento (NBR5419, 2005). A (NBR5410, 2004) recomenda a utilização preferencial do sistema de aterramento por estruturas, ou “aterramento estrutural”.

Numa descarga atmosférica normal espera-se que toda a corrente se dissipe na terra sem causar campos elétricos ou tensões que possam prejudicar pessoas ou equipamentos. No caso do aterramento estrutural, a corrente atravessa necessariamente o concreto de baldrame e estacas, como se deduz pela leitura da norma técnica, (NBR5419, 2005).

Na norma (NBR5419, 2005) são estabelecidos critérios para o aterramento estrutural. No entanto, em vista de uma preocupação com a integridade das estruturas, gerou-se a necessidade de maiores estudos quanto ao uso de aterramentos estruturais. Com a publicação do Anexo E dessa norma, que aceita e normaliza os critérios para a utilização de aterramento estrutural em edificações já existentes, surgiram muitas discussões em torno do assunto. Neste caso específico, a discussão é legítima, como será visto. Muitos autores, tanto da área

de Engenharia Elétrica como da área de Engenharia Civil posicionaram-se contra esse critério.

O concreto é tido como elemento suficientemente condutor no aterramento. Há casos, porém, em que o concreto, ao ser atravessado por correntes elevadas, tende a romper-se com violência. No entanto, os experimentos têm demonstrado que as correntes de descarga se dissipam no aterramento sem provocar danos quando o SPDA é realizado de modo adequado. Apesar disso, muitos engenheiros civis ainda resistem à utilização de aterramento por estruturas.

Na prática, nota-se que há pouca interação entre os estudos do comportamento elétrico do concreto com relação aos materiais e procedimentos utilizados na construção civil. Os testes e experimentos realizados são parciais, ou seja, os que analisam as características do concreto pouco analisam as questões de descarga elétrica em AT. Por outro lado, os que analisam as questões de dissipação de corrente elétrica em estruturas também não avaliam as condições reais do concreto atravessado por correntes elevadas em fundações.

São vários os critérios a serem analisados:

- A distribuição da corrente de descarga entre os elementos de fundação;
- A possibilidade de ruptura do concreto próximo aos condutores durante a descarga;
- A integridade do concreto no subsolo após a descarga.

As questões são pertinentes e complexas. Neste trabalho procurar-se-á analisar alguns dos fenômenos que se referem ao concreto nos elementos de fundação. De fato, concentrando a atenção neste ponto, será que a corrente de surto que chega aos baldrames e estacas é convenientemente repartida? Não haveria uma ruptura do concreto nos elementos de fundação, do mesmo modo que é rompido com preocupante frequência nas vigas de borda e beirais? É realmente possível assegurar a integridade do concreto no subsolo após as descargas?

Sabe-se que um eventual rompimento do concreto nas fundações pode ser considerado um grave incidente em termos de integridade das estruturas, uma vez que poderia promover um processo acelerado de corrosão nas armaduras desses elementos.

Além disso, sabendo que as descargas atmosféricas possuem uma grande capacidade disruptiva, seria pelo menos temerário conduzi-las sem critério pelas

estruturas da edificação, expondo assim todos os ambientes a uma perigosa proximidade com as forças da natureza.

Em função dos experimentos realizados nos últimos dois anos na Universidade Estadual de Londrina, os dados mostram uma dificuldade básica no tratamento das questões: as amostras de concreto apresentam uma variabilidade tal que dificultam muito qualquer conclusão sobre seu comportamento elétrico. Para contornar tal problema é necessário estudar as variáveis que afetam a composição do concreto, tanto na sua natureza físico-química, como no tratamento mecânico aplicado na manipulação do chamado concreto fresco (o concreto de consistência plástica, nos primeiros momentos após sua mistura, em contraste com o concreto endurecido, que possui resistência à compressão), procurando criar as condições mais adequadas para inibir a distorção dos dados experimentais.

Ao analisar as numerosas variáveis que interferem na composição e aplicação do concreto, surgem outras questões de interesse:

- Como a relação água/cimento pode afetar a resistividade?
- Quais são as reais condições de umidade nos elementos de fundações no solo?
- Qual o caminho da corrente ao chegar a esses elementos?

Este trabalho pretende restringir-se a responder essas questões relacionadas ao comportamento do concreto frente às descargas elétricas, além de fornecer subsídios para responder às outras questões formuladas.

1.1 **Objetivo Geral**

Desenvolver uma metodologia de ensaios para a preparação, mistura e moldagem do concreto que garanta a uniformidade nos valores de resistência elétrica em função da massa, umidade e água livre incorporada em corpos de prova (CP).

1.2 **Objetivos específicos**

1. Levantar os valores de impedância de amostras de concreto para ensaios impulsivos em AT.
2. Avaliar a variação da impedância de amostras de concreto em AT com a mudança da relação água/cimento.

3. Avaliar a uniformidade dos valores de massa seca, massa úmida e resistência elétrica em corpos de prova 10 x 20 cm, seguindo as indicações exigidas pelas normas técnicas relativas à moldagem de corpos de prova em laboratório.
4. Levantar os valores de resistência de amostras de concreto em BT para ensaios de tensão aplicada até 220 V, CA.
5. Avaliar a relação da resistência de amostras de concreto em BT, em CA, com a mudança do teor de umidade e da relação água/cimento.
6. Avaliar a uniformidade dos valores de massa seca, massa úmida e resistência elétrica em corpos de prova 10 x 20 cm, seguindo as indicações exigidas pelas normas técnicas relativas à moldagem de corpos de prova em laboratório (NBR5738, 2003).

1.3 Organização do Trabalho

Para alcançar os objetivos descritos, a presente Dissertação tratará inicialmente, no Capítulo 2, de discussões atuais sobre o aterramento estrutural, levantando aspectos históricos, critérios de normas técnicas e polêmicas recentes, procurando mostrar as vantagens do aterramento estrutural e seus possíveis riscos. Em seguida, no Capítulo 3, o estudo dirige a atenção para o concreto e algumas das principais variáveis de análise do concreto, tendo em conta que o âmbito tratado na Dissertação se refere a seu comportamento elétrico. Para tanto foi acrescentado um item a respeito de alguns fenômenos eletroquímicos que, embora tratem do concreto submetido a tensões muito baixas, são úteis para a análise em tensões mais elevadas. O Capítulo 4 se dirige diretamente à metodologia de ensaios para a confecção de corpos de prova, procurando, em último termo, procedimentos práticos para uniformizar os dados de resistividade elétrica. A apresentação dos resultados segue, de modo geral, a sequência ditada pelos objetivos específicos mostrados no item 1.2. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões básicas sobre o trabalho e sugestões para possíveis estudos futuros.

2 Sistemas de aterramento estrutural: discussão atual

O aterramento estrutural tem se mostrado um eficiente recurso para a dissipação de correntes de descargas atmosféricas. Nas normas técnicas internacionais estão presentes critérios e experimentos que garantem confiabilidade para essa técnica, observados os cuidados básicos de projeto e execução. Os fatores, no entanto, que influenciam as condições de aterramento são inúmeros e complexos: começando pelo sistema de captação adequado, intensidade e forma das correntes das descargas atmosféricas, possibilidade de descargas laterais, cálculos de impedâncias complexas e tempos de propagação de ondas. Consideram-se também as condições de umidade e composição do solo e do concreto, profundidade e tipo das fundações, descargas parciais na terra, etc., constata-se assim um número grande de variáveis que podem afetar as condições do sistema de aterramento.

Como já apresentado na seção 1.2, serão estudadas algumas das variáveis envolvidas na composição do concreto. Entre os princípios de base do aterramento estrutural, supõe-se o concreto como elemento suficientemente condutor para o escoamento à terra das correntes de descarga. Assim, convém que se aprofunde o estudo das propriedades físicas e químicas do concreto para que se possa chegar a um melhor conhecimento das condições de aterramento.

2.1 Breve histórico

A primeira notícia conhecida do uso de estruturas para aterramento é do ano de 1941, utilizado nos depósitos de bombas da base aérea Davis Monthan, em Tucson, Arizona. O objetivo do sistema era proteger os depósitos contra descargas atmosféricas e eletricidade estática, sendo que esta última era causada por ventos e tempestades de areia. O engenheiro Herb Ufer, responsável pelas instalações, utilizou um sistema combinado de hastes de aterramento e aterramento estrutural. Anos mais tarde, inspecionando as instalações, verificou que o aterramento estrutural promovia uma menor e mais consistente resistência de aterramento que

as próprias hastes, especialmente em regiões com altos valores de resistividade. Para alguns autores, o sistema de aterramento estrutural é ainda chamado de Aterramento Ufer (GOMES, 2007).

No final da década de 70, as recomendações americanas incluíram sistemas de aterramento com condutores embutidos em concreto. Em 1978, o National Electrical Safety Code (ANSI-C2)-NEC incluiu, pela primeira vez, especificações para eletrodos de aterramento embutidos nas fundações (GOMES, 2007).

Seguindo a tendência que, nos anos 70, já era uma experiência em muitos países, a ABNT incluiu a prática do aterramento estrutural nas normas técnicas (NBR5410, 2004) e (NBR5419, 2005) ((GOMES, 2007)). Sobre este ponto, abordando um histórico do aterramento estrutural, é interessante consultar também as normas técnicas IEC 61024-1-2 e os documentos ASE 4022, ANSI/IEEE std. 142, S 6651.

Paralelamente, os aterramentos foram criando uma área de estudo específica devido às necessidades exigidas pelos novos equipamentos. As máquinas elétricas e instalações não exigiam, de modo geral, uma blindagem ou uma estabilização tão crítica para a operação normal. Os aterramentos utilizados eram eficientes e atendiam bem às exigências de uso. No entanto, nos anos 70, quando se popularizaram os equipamentos eletrônicos (que podem operar, de modo geral, com sinais de tensão na faixa de mV e correntes na faixa de μA ou nA), logo se imaginou que o sistema de aterramento para estes equipamentos poderia utilizar o mesmo sistema usado, com sucesso, pelos equipamentos em geral. Viu-se, no entanto, que não era conveniente tal recurso: os sistemas em geral não respeitavam as delicadas condições da eletrônica, uma vez que sob a ação de correntes de curto-circuito ou de descargas atmosféricas, o sistema de aterramento poderia produzir tensões relativamente elevadas, totalmente incompatíveis com os novos equipamentos.

Pensou-se então na separação completa dos aterramentos, para que os sistemas mais sensíveis pudessem trabalhar de forma isolada da instalação elétrica em geral. Ainda que apresente boas vantagens, essa separação não consegue ser completa: verifica-se um acoplamento resistivo para baixas frequências e um acoplamento capacitivo para altas frequências, além de outros fenômenos de interferência.

Posteriormente foi desenvolvido o sistema atualmente utilizado: os aterramentos continuam sendo separados, mas com um ponto comum no terminal de terra. Os equipamentos mais sensíveis receberam uma malha de aterramento es-

pecial para filtrar frequências, mas, para garantir a equalização geral, essa mesma malha é também conectada a uma barra única de aterramento de onde partem os diversos condutores de terra utilizados na instalação (MORENO; COSTA, 1999). Nesta referência se encontra uma descrição mais detalhada da disposição dos condutores de aterramento. Há muitos detalhes práticos sobre a escolha final recomendada pelos autores.

Um detalhe significativo é que a versão da NBR 5419 de 1993 ainda não contemplava o uso das armaduras passivas do concreto armado como parte do SPDA. No entanto, em vários países, já havia a previsão desse recurso nas normas técnicas. Alguns projetistas no Brasil, para não ferir os critérios de norma, utilizavam um chamado “condutor dedicado”, ou seja, uma barra de aterramento que acrescentada à estrutura, junto com as armaduras passivas, que evitava o desconforto do cabo de aterramento nas fachadas. Essa alternativa era permitida pela norma. Era, na verdade, o prenúncio das tendências internacionais (MIRANDA, 2003c).

Os critérios apresentados na (NBR5419, 2005) são fruto de uma longa discussão com base em experiências internacionais. Um excelente resumo histórico, escrito, entre outros, por um consultor que participou ativamente nas discussões da (NBR5419, 2005), se encontra em (LEITE et al., 2007). Neste artigo os autores fornecem critérios claros quanto às falsas promessas de equipamentos de proteção, argumentando em função de resultados científicos da área.

2.1.1 Critérios das normas técnicas

O objeto principal deste trabalho é assunto tratado em algumas normas técnicas brasileiras e internacionais, mais diretamente a (NBR5419, 2005), a (NBR5410, 2004) e a IEC 62305. Em especial a (NBR5419, 2005) apresenta uma série de critérios práticos, fruto de um extenso trabalho de discussão sobre experiências de campo no Brasil e no exterior. Alguns desses critérios são apresentados na sequência, por sua relação direta com o objeto deste trabalho.

A (NBR5419, 2005) trata da proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Nessa norma, como já citado anteriormente, o SPDA é dividido em três partes: o subsistema de captação, o subsistema de descida e o subsistema de aterramento. Este último interessa mais diretamente à presente análise, uma vez que o foco desta Dissertação se dirige às condições do concreto utilizado nos elementos de fundação, por onde são dispersadas as correntes provenientes de descargas atmosféricas.

O item 5.1.5.4 item a da mesma norma, estabelece que “*cerca de 50% dos cruzamentos de barras da armadura, incluindo os estribos, estejam firmemente amarradas com arame de aço torcido e as barras na região de trespasse apresentem comprimento de sobreposição de no mínimo 20 diâmetros, igualmente amarradas com arame de aço torcido, ou soldadas, ou interligadas por conexão mecânica adequada*”. De modo semelhante, a norma define as condições de uso para o aterramento estrutural no que se refere às armaduras de aço das estacas, dos blocos de fundação e das vigas baldrame.

A norma permite, portanto, a utilização de arames de aço recozido, de uso frequente na construção civil, como elemento condutor. A prática tem mostrado que esse recurso é seguro. Mais à frente serão comentados alguns dados experimentais de ensaios com esse material.

No caso de aterramento estrutural, a norma exige uma resistência de contato inferior a 1Ω entre as armaduras de topo da edificação e as armaduras da base dos pilares junto ao solo. Esta exigência da (NBR5419, 2005) tem sido normalmente atendida quando a execução dos contatos é realizada segundo as recomendações da própria norma técnica. Muitos projetistas têm utilizado um sistema de conectores elétricos mais seguros que o arame recozido. São conectores metálicos com dimensões bastante maiores que os fios de arame, capazes de suportar, portanto, valores mais elevados de corrente.

Para o caso de aterramento estrutural, a norma não especifica o valor da resistência de aterramento, ou seja, o valor a ser encontrado pela corrente de descarga ao penetrar no solo utilizando os chamados eletrodos naturais (baldrames e estacas, ou ainda todo elemento construtivo em contato direto com a terra). Para o caso de aterramento com eletrodos não naturais, a (NBR5419, 2005) estabelece uma resistência de aterramento de aproximadamente 10Ω .

A norma técnica internacional IEC 62305 traz também importantes critérios para o projeto e execução de aterramentos estruturais. A norma se divide em quatro partes: a IEC 62305-1 trata de princípios gerais de proteção contra descargas atmosféricas, definindo termos, níveis de proteção contra descargas, zonas de proteção, etc. A IEC 62305-2 traz, em geral, uma avaliação de riscos inerentes às descargas atmosféricas, levando em conta os riscos para a estrutura e para os componentes da instalação. A IEC 62305-3 estabelece critérios sobre os componentes do SPDA e avalia os riscos para seres vivos próximos a sistemas de aterramento. A IEC 62305-4 trata especialmente dos riscos a que estão submetidos os equipamentos elétricos e eletrônicos quanto à ocorrência de impulsos eletromagnéticos

provenientes de descargas.

As quatro partes da IEC 62305 ressaltam a importância de um projeto detalhado do SPDA, destacando a importância de que o projeto e a execução sejam realizados pelo mesmo profissional. As recomendações práticas de projeto nessas normas são detalhadas e resumidas, oferecendo ao profissional da área um roteiro organizado de itens. Concretamente sobre as conexões mencionadas nos parágrafos anteriores (arame recozido e conectores metálicos), a IEC 62305-3 traz uma redação bastante semelhante à (NBR5419, 2005).

Percebe-se que a (NBR5419, 2005) inspirou seu texto nos critérios da IEC. Basta comparar os textos das duas normas técnicas. O texto da IEC especifica um “*or overlapped... and bound*”, sem determinar que tipo de ligação é exigida. A (NBR5419, 2005) aceita o uso de alças de arame recozido sobre a região de trespassse: “*cerca de 50% dos cruzamentos de barras da armadura, incluindo os estribos, estejam firmemente amarradas com arame de aço torcido e as barras na região de trespassse apresentem comprimento de sobreposição de no mínimo 20 diâmetros, igualmente amarradas com arame de aço torcido, ou soldadas, ou interligadas por conexão mecânica adequada*” ((NBR5419, 2005), item 5.1.2.5.4).

A IEC, porém, estabelece o valor de $0,2 \Omega$ como limite para o máximo valor de resistência no percurso das estruturas. A (NBR5419, 2005), por sua vez, fixa o limite menos exigente de 1Ω . Assim estabelece o item 5.1.2.5.5: “*Para as edificações de concreto armado existentes poderá ser implantado um SPDA com descidas externas ou, opcionalmente, poderão ser utilizadas como descidas as armaduras do concreto. Neste último caso devem ser realizados testes de continuidade e estes devem resultar em resistências medidas inferiores a 1Ω .*”

2.1.2 Discussões entre profissionais da área

As críticas dirigidas aos critérios da norma NBR5419:2005 se referem normalmente à preocupação com a integridade do concreto quando o sistema de aterramento estrutural é submetido às descargas atmosféricas. Muitos estudos foram realizados, mas a preocupação só se justifica se o aterramento estrutural for mal executado, ou seja, se não seguir os critérios das normas técnicas. De fato, a condução do raio para o interior das estruturas, acompanhada de uma execução de má qualidade, poderia ter consequências desastrosas, uma vez que os caminhos de corrente seriam imprevisíveis (NBR5419, 2005).

Convém esclarecer que a norma NBR5419:2005 estabelece uma série de critérios



Figura 2.1: Pilotis: solução arquitetônica de pilares sem paredes.

de segurança para proteger com alta probabilidade as pessoas e equipamentos no interior das edificações. Ou seja: não há nenhum sistema de proteção completamente seguro contra descargas atmosféricas e, além disso, não se garante a proteção de pessoas nas coberturas (áreas externas) de edifícios, nem em varandas de prédios altos, nem junto a janelas metálicas (NBR5419, 2005) e (MIRANDA, 2003a).

Pode-se considerar como o motivo de maior polêmica entre os profissionais ligados às áreas de instalações e construção civil a conhecida crítica ao Anexo E da NBR5419:2005. Este anexo trata da possibilidade aceita pela norma de utilizar armaduras estruturais de edifícios já existentes como parte integrante do SPDA, desde que a resistência medida entre a base da estrutura e o topo seja inferior a 1Ω . A polêmica permanece até o momento, uma vez que, segundo muitos projetistas, a resistência baixa de contato não é garantia suficiente para avaliar o correto desempenho do SPDA (LEITE et al., 2007).

2.2 Vantagens do aterramento estrutural: a questão estética

A primeira vantagem prática e visível do aterramento estrutural é a eliminação de condutores expostos de descida junto a fachadas e possíveis zonas externas de circulação. A preocupação estética é, evidentemente, um convite ao uso embutido de condutores.

Há ainda uma aplicação específica em que a estética exige o aterramento estrutural como um recurso essencial: é o caso dos pilotis (LEITE et al., 2007). A Figura 2.1 mostra essa solução estrutural, onde os pilares no pavimento térreo estão expostos, sem fechamento de paredes.

Nesse caso, o uso de aterramento estrutural se faz obrigatório, uma vez que os condutores externos poderiam provocar curvas perigosas de tensão no solo em caso de descarga (LEITE et al., 2007).

2.3 A questão da equipotencialização

Outra vantagem do aterramento estrutural é sua disposição adequada para permitir a equipotencialização de todo o edifício, ou seja, pelo fato de utilizar os elementos metálicos das estruturas, presentes em toda a obra, o sistema de aterramento dispõe de contatos eletricamente próximos da terra para interligação de qualquer ponto da edificação, permitindo a integração mais cômoda de janelas e elementos metálicos de toda a construção.

O recurso aos elementos metálicos das estruturas como parte integrante do aterramento gerou muitas polêmicas, uma vez que os consultores mais experientes defendem o uso de um barramento comum para interligar todos os aterramentos. A opinião contrária, no entanto, parece razoável, pois separar os distintos sistemas e isolar a falta parece mais seguro. No entanto, o barramento comum traz justamente a vantagem de colocar todo o sistema em tensão mais alta, inclusive os neutros e terras, que acabam recebendo uma tensão elevada por sua conexão direta ao sistema aterrado, garantindo, assim, a equipotencialidade dos condutores e dos elementos estruturais (MIRANDA, 2003a).

Pensando nisso, a (NBR5419, 2005) estabelece que os quadros elétricos dos andares de edifícios estejam com seus respectivos terras ligados à armadura correspondente ao andar, com a finalidade de promover a equipotencialização (item 5.2.1.3.3). A aplicação deste critério tem uma série de nuances não tratadas com detalhe neste trabalho. Um estudo didático sobre o tema pode-se encontrar em (MIRANDA, 2004).

Como já foi comentado, um edifício qualquer, ainda que atenda a todos os critérios contidos nas normas relativas ao aterramento estrutural, não está totalmente protegido, nem contra os efeitos indesejados dos raios sobre a estrutura, nem contra os danos sobre equipamentos eletrônicos. De fato, quanto às estruturas e instalações, é muito difícil prever exatamente o que ocorrerá durante o fenômeno da descarga atmosférica; quanto aos equipamentos eletrônicos, devido à sua natural sensibilidade a tensões elevadas, só é possível garantir uma segurança adequada com um projeto específico para essa finalidade.

É justo ressaltar ainda uma vantagem do aterramento estrutural em edifícios

altos: a maior facilidade para atender à exigência da norma quanto à proteção de esquadrias metálicas de janelas e portas externas e guarda-corpos de varandas. Como esses elementos são passíveis de serem percorridos por corrente, no caso de descargas laterais, deve haver uma proteção específica para essa finalidade (NBR5419, 2005).

2.4 Um argumento de bom senso

Há uma observação que poderia passar despercebida e que é essencial para mostrar a vantagem do aterramento estrutural. Se fosse possível medir a impedância encontrada pela corrente de descarga no momento de sua ocorrência no SPDA, ou seja, se fosse possível ter uma avaliação exata de todas as variáveis envolvidas no cálculo da impedância vista pela corrente, talvez fosse possível ter uma avaliação segura de qual seria o caminho da corrente. Seria, no entanto, uma informação tão importante quanto difícil de obter, pela dificuldade de determinar com precisão as condições de impedância reativa, da resistência ôhmica sob altas correntes, das condições de campo elétrico no solo sob a edificação e nos condutores e do estado de ionização das partículas em todos os caminhos possíveis para a dissipação da corrente para o solo.

No entanto, observando as ocorrências de descargas, é possível saber o caminho de menor impedância em cada caso: aquele que a corrente de fato escolheu, como ilustra a Figura 2.2.



Figura 2.2: Ruptura de fachada por corrente de descarga atmosférica proveniente do sistema de descida do aterramento. Fonte:(ALVES, 2006)

Observando casos reais, foram encontradas várias incidências de centelhamento em descidas externas. Ou seja, a corrente de descarga com bastante frequência “prefere” sair dos condutores externos de descida e invadir a alvenaria seca, rompendo dielétricos de mármore, tijolos, granitos e concreto, provocando quase sempre a explosão dos materiais. Ou seja, mesmo encontrando-se já percorrendo o condutor de descida, a corrente de surto pode ocasionalmente “preferir” seguir pelo caminho da armadura estrutural, ainda que esta não esteja executada para tal finalidade e, portanto, não apresente as devidas condições garantidas de baixa impedância. Este argumento é comentado em (LEITE et al., 2007). A observação, de extremo bom senso, indica uma grande probabilidade de termos um caminho de baixa impedância e especialmente seguro para um aterramento estrutural projetado e executado com os devidos cuidados previstos em norma.

2.4.1 Cuidados necessários para a execução

Como já foi comentado, o perigo imediato do aterramento estrutural é a possibilidade de uma execução de má qualidade, realizado sem os devidos cuidados, especialmente no que se refere às conexões.

Temendo um possível risco de explosão, há um ponto que tem alimentado os argumentos dos que criticam o aterramento estrutural. Trata-se das opções de conexões permitidas por norma. O item 5.1.2.5.4 da (NBR5419, 2005) estabelece que: *“As armaduras de aço interligadas das estruturas de concreto armado podem ser consideradas condutores de descida naturais, desde que: a) cerca de 50% dos cruzamentos de barras da armadura, incluindo os estribos, estejam firmemente amarradas com arame de aço torcido e as barras na região de trespasse apresentem comprimento de sobreposição de no mínimo 20 diâmetros, igualmente amarradas com arame de aço torcido, ou soldadas, ou interligadas por conexão mecânica adequada; (...)”*.

Muitos pesquisadores realizaram testes de continuidade para saber que conexões seriam mais adequadas para emendar os elementos condutores no caso de se utilizar as armaduras estruturais. Evidentemente os arames de aço não são condutores padronizados para a conexão elétrica, mas a (NBR5419, 2005) permite a escolha entre os três métodos citados. Do ponto de vista da segurança, a ligação com arame torcido pode causar uma certa preocupação quanto à qualidade da emenda. Sabe-se que a resistência de contato pode aumentar de modo indesejado sem a devida pressão mecânica entre os condutores. O fenômeno é bastante conhecido na área elétrica. Uma explicação mais detalhada pode-se encontrar em

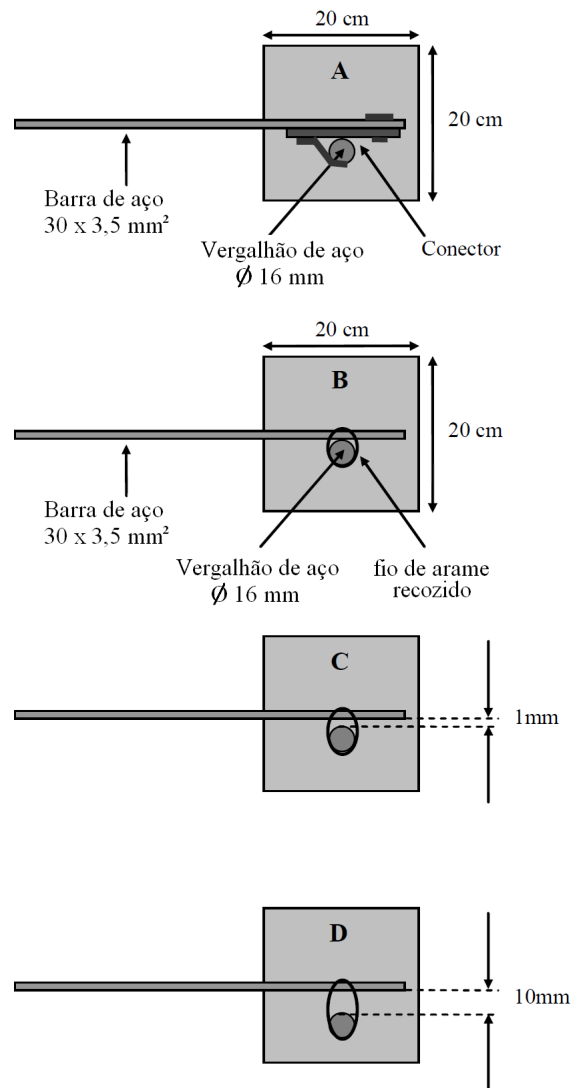


Figura 2.3: Quatro conexões para estudo da passagem de correntes simuladas de descargas atmosféricas.

(COTRIM, 2003). Este autor destaca ainda a possível formação de óxidos entre os contatos, caso haja um aperto insuficiente.

De fato, entre os muitos testes realizados, pode-se citar um estudo de 2006 justamente sobre a questão (KOKKINOS et al., 2006). Os autores realizaram experimentos com quatro tipos de conectores: um conector mecânico (ligação “A”), parafusado em dois pontos com torque de 12 Nm em ambos os parafusos, e três tipos de ligações com arame torcido. Estas ligações com arame são as de maior interesse para a presente análise. A Figura 2.3 mostra as conexões utilizadas.

A ligação “A” não mostrou danos materiais para correntes padronizadas de teste com forma de onda impulsiva 10/350 *ms* até a corrente de pico de 98 *kA*.

Como se vê, a ligação “B” utiliza arame recozido. O autor garante que o arame foi firmemente apertado. Nessa condição, o contato suportou os ensaios de corrente até o valor de 57 *kA*. O valor seguinte testado foi de 79 *kA*. Nesse

valor o concreto sofreu uma explosão no contato.

As ligações “C” e “D”, como mostra a figura acima, previam ligações com leve aperto, possibilitando uma distância entre os contatos de 1 mm e de 10 mm, respectivamente. Embora sem pressão de contato, as amostras forneceram uma resistência de contato inferior a 1 m Ω , segundo os autores. Estes garantem também que o concreto utilizado foi testado por laboratórios apropriados para tal fim e as amostras se apresentaram com valores normais de resistência à compressão.

A amostra “C” não apresentou danos quando se aplicou a corrente de 35 kA, mas houve explosão para 57 kA. A amostra “D” não suportou o primeiro nível de corrente aplicada de 35 kA.

O trabalho apresentado e os resultados obtidos não são um argumento definitivo com relação à técnica do aterramento estrutural. De modo geral, procurando simplificar a análise, se utilizarmos o aterramento estrutural para uma edificação modesta, com planta retangular, composta por quatro pilares de descida, um em cada extremo da obra, pelos critérios da (NBR5419, 2005) seriam utilizados em torno de 50% dos cruzamentos de barras. Supondo uma estrutura de pilar comum com quatro barras, haveria um total de oito possíveis descidas para a corrente de descarga. Supondo que cada barra fosse carregada com uma corrente de 35 kA e imaginando que o concreto utilizado nessa edificação tivesse as mesmas características do concreto utilizado no experimento citado acima, as barras estariam preparadas para absorver sem danos uma corrente total de pelo menos 280 kA, supondo que a corrente teria condições de se dispersar na terra.

De fato, sabendo que somente em torno de 5% das descargas atmosféricas superam 90 kA (ANDERSON; ERIKSSON, 1980), haveria uma grande margem de segurança. Sabe-se que a incidência de descargas na faixa de 250 kA é bastante rara (BERGER; ANDERSON; KRONINGER, 1975). É importante comentar que este estudo citado se refere especificamente ao valor de pico para descargas positivas com um único stroke (descarga). O mesmo estudo mostra que as descargas positivas analisadas são em torno de 10% do total. Analisando os outros 90% das descargas tabeladas na referência, a corrente de pico passa de 80 kA somente em 5% desses casos. Ou seja, agrupando mais resumidamente os dados: das 262 descargas medidas, 26 são descargas positivas; somente uma delas apresentou corrente de 250 kA. Ou seja, no total, a corrente atingiu esse valor em aproximadamente 0,38% dos casos. Convém esclarecer que o estudo citado da revista ELECTRA permanece até hoje como uma das referências principais para

a análise estatística de descargas atmosféricas.

Um ensaio de interesse para este trabalho foi realizado nos Laboratórios do IEE-USP. O pesquisador utilizou corpos de prova em concreto, envolvendo ligações realizadas por cinco tipos de emendas: com solda exotérmica, com arame recozido, com solda em luva apropriada para emenda de vergalhões, com solda elétrica e, por último, com dois vergalhões em contato e sem elemento de emenda. Os testes também forneceram informações interessantes: aplicando correntes até 30 kA , com pulsos na faixa aproximada de $9/19\ \mu\text{s}$, em nenhum caso se verificou danos no concreto. O mesmo ocorreu com ensaios de corrente contínua, com pulsos na faixa de $600\text{ a }700\text{ A}$, com duração em torno de 500 ms (SUETA, 2005). Os dados relacionados à impedância nesses ensaios serão discutidos mais à frente.

2.4.2 Por onde é dispersada a corrente de aterramento

Uma das discussões mais importantes dos sistemas de aterramento é a questão do caminho das correntes de descargas atmosféricas.

Sabe-se que somente os elementos condutores (armaduras) mais periféricos da edificação são efetivos, ou seja, servem como condutores de corrente em caso de descargas (MORENO; COSTA, 1999). O fenômeno é conhecido entre os projetistas, pois, como demonstram as experiências e as simulações numéricas, a corrente que flui pelas estruturas (supondo uma descarga atmosférica no topo de um edifício) se desloca praticamente pela armadura longitudinal dos pilares. Uma pequena parcela percorre as armaduras das vigas e lajes. Deste fenômeno deriva o critério das normas técnicas de dar prioridade às ligações longitudinais dos pilares e a menor preocupação com as armaduras dos andares. A recomendação, no entanto, não retira a obrigatoriedade de realizar a equipotencialização das armaduras de laje. De fato, na (NBR5419, 2005), item 5.1.2.5, se discute os critérios de continuidade dos condutores de aterramento. Como se pode ver ali, as exigências para as conexões horizontais não são tão exigentes como para as verticais. Comentários sobre esse tema encontram-se em (MIRANDA, 2003a). Um ensaio interessante de simulação numérica pode ser encontrado em (MIYAZAKI; ISHII, 2007). Nesse artigo se mostra que a parcela de corrente nas armaduras de vigas e lajes é muito inferior às correntes nas armaduras de pilares, especialmente quando se aplica uma malha de condutores sobre a cobertura.

Um dos muitos estudos sobre a distribuição de correntes nas estruturas se encontra em (PANICALI, 2005). O autor mostra, por simulação numérica, que a distribuição das correntes nas armaduras de pilares são praticamente indepen-

mentos da frequência e confirma a concentração das correntes nas bordas. Outro estudo interessante, mostrando gráficos de distribuição espacial de campos, além da distribuição de correntes nas estruturas, se encontra em (MIYAZAKI; ISHII, 2007).

Como necessariamente as correntes passam dos elementos metálicos (vergalhões e/ou hastes incorporadas à estrutura) à massa de concreto que os reveste, e desta para a terra, convém analisar como são montadas as estruturas aplicadas ao solo.

2.4.3 Baldrames e estacas

Basicamente, os elementos que compõem a fundação e por onde as correntes se dispersam são os baldrames e as estacas. Por ser o concreto um elemento semiconductor, sabe-se que seu desempenho como eletrodo de aterramento tem que ser avaliado com critério. Para isso, é fundamental conhecer alguns princípios das técnicas construtivas, no que se refere ao uso de estruturas armadas nos baldrames e estacas.

Baldrames são vigas em concreto armado com finalidade estrutural dispostas no solo. Junto com as estacas, examinadas a seguir, devem formar um conjunto suficientemente rígido de tal modo que suas deformações não afetem os esforços atuantes na superestrutura do edifício, nem no próprio terreno da fundação (FUSCO, 1975). As estacas são elementos escavados ou cravados no solo, que têm a função de transmitir as cargas da edificação ao solo.

As Figuras 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 mostram algumas possíveis disposições físicas de estacas e baldrames.



Figura 2.4: Escavações para baldrames.



Figura 2.5: Fôrmas para baldrames.



Figura 2.6: Baldrames concretados e com camada de impermeabilização.



Figura 2.7: Baldrames como apoio para as paredes.

Em obras de pequeno porte e com solos de boa resistência mecânica, as estacas podem ser substituídas por fundação constituída somente por sapatas corridas armadas. Para o presente trabalho de Dissertação, no entanto, são consideradas edificações de porte médio ou maiores, que exijam baldrame e estacas. Como todo o estudo se dirige ao concreto, serão adotados como padrão de análise baldrame em concreto armado e estacas de concreto.

Convém comentar que, para distribuir melhor a carga dos pilares para as estacas, é conveniente o uso do chamado “bloco de coroamento” de concreto, ou seja, um bloco com dimensões maiores que a estaca (ou estacas) a ser(em) conectada(s) (FUSCO, 1975). As Figuras 2.8, 2.9 e 2.10 mostram coroamentos típicos sobre um grupo de estacas próximas. É comum o uso de estacas esbeltas em grupos de duas, três ou mais estacas, cavadas próximas umas das outras, unidas por um mesmo bloco de coroamento, em lugar de uma estaca de grande volume.

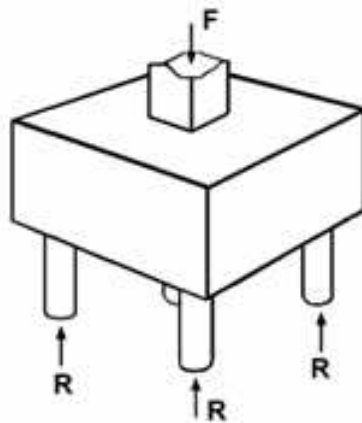


Figura 2.8: Bloco de coroamento com quatro estacas.

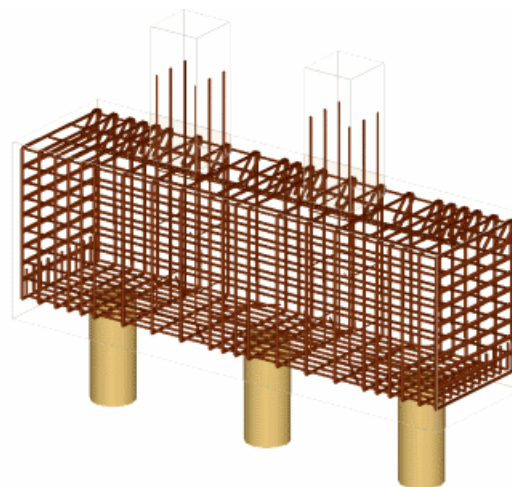


Figura 2.9: Armadura para bloco de coroamento.



Figura 2.10: Bloco de coroamento concretado.

2.5 Comentários e observações parciais

Há algumas observações importantes no que se refere aos detalhes construtivos:

1. A maioria das estacas utilizadas na construção civil é armada somente na região próxima do bloco de coroamento, realizando a transição dos esforços do bloco para a estaca. Para alguns casos em que se prevêem esforços horizontais ou de tração sobre as estacas, é recomendável o uso da armadura distribuída por todo o corpo da estaca. Este assunto é complexo e rico de variantes de projeto. As informações apresentadas aqui são uma rápida coleta de experiências de engenheiros de estruturas. Para encontrar maiores explanações sobre o tema, há uma riquíssima bibliografia relacionada ao cálculo estrutural. O tema, evidentemente, ultrapassa muito o estudo da presente Dissertação.
2. Como na maioria dos casos as estacas possuem armaduras somente no alto do fuste, isto é, do corpo da estaca, é natural que as correntes de dissipação do aterramento que chegam às estacas se difundam somente nas regiões próximas às armaduras. Ou seja, quando a armadura não é distribuída por todo o fuste da estaca, somente a região em torno da armadura serve como elemento de aterramento.
3. Como se pode notar, a alta taxa de armadura nos blocos de coroamento é uma garantia a mais de segurança a favor do aterramento, uma vez que a corrente encontra uma área de dissipação maior dentro do próprio concreto, devido à área dos vergalhões. O interesse do presente trabalho nessa observação é concluir que a densidade de corrente que circula no concreto é

reduzida nas regiões próximas aos vergalhões devido ao grande número de elementos condutores. Isso nos leva a uma menor probabilidade de ruptura do concreto sob as correntes intensas de descargas atmosféricas.

4. Pelo fato de estarem enterradas, espera-se que os baldrames e estacas estejam numa condição de umidade relativamente alta. Este dado é de grande importância no estudo do aterramento como um todo, uma vez que a umidade pode diminuir muito o valor da resistividade elétrica do concreto. Esta observação será analisada com detalhes na parte experimental.

2.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados alguns elementos de análise sobre a prática de aterramentos estruturais no que se refere a seu uso em edificações, comentando vantagens e cuidados de execução, posicionando o assunto nas questões gerais de aplicação no mercado. No Capítulo 3 serão abordadas as bases teóricas que darão maior garantia de segurança à utilização dos aterramentos por estrutura.

3 Fundamentos teóricos

O estudo do concreto não é frequente entre os profissionais ligados à Engenharia Elétrica. O mesmo ocorre com os fenômenos eletroquímicos presentes no tratamento do concreto e ainda com os fenômenos de AT que, embora parte integrante da área elétrica, são uma área específica de estudo e, na prática, poucos profissionais a conhecem a fundo.

Com o objetivo de analisar os pontos básicos para a compreensão dos fenômenos que envolvem a aplicação do concreto em sistemas de aterramento estrutural, neste Capítulo se procurará fornecer os principais conceitos relacionados à composição do concreto, seu comportamento em tensões eletroquímicas e também alguns fenômenos relacionados à aplicação de AT em materiais sólidos.

É natural que na Engenharia Civil se procure avaliar o estado de conservação do concreto, tendo em conta que sua resistência mecânica é obviamente essencial. Entre muitos recursos, na Engenharia Civil utilizam-se medidas elétricas da resistividade do concreto. Essas informações, no entanto, têm somente interesse indireto, uma vez que o objetivo da área civil é avaliar as condições de conservação do concreto, tendo em vista diagnosticar uma possível patologia.

Neste trabalho se procurará levantar dados sobre a resistividade elétrica do concreto com outra finalidade: avaliar o concreto como meio condutor para a passagem de correntes elétricas.

3.1 Terminologia básica

Sempre que se especifica o concreto para uma determinada aplicação se faz referência ao traço do concreto e à relação de água/cimento utilizada. O conceito de traço será utilizado com frequência ao longo do trabalho. Sua indicação é feita normalmente na forma A:B:C, onde A, B e C são números que representam a proporção em massa entre cimento (conhecido tecnicamente como aglomerante), areia (agregado miúdo) e brita (agregado graúdo). A relação água/cimento

fornece a proporção em massa desses dois materiais. O traço, unido à especificação da relação água/cimento, é um conceito básico para o concreto e é um dos principais determinantes de suas propriedades mecânicas. O chamado concreto armado é a aplicação do concreto com armaduras entrelaçadas de aço, que trabalham assim de forma solidária. Sabe-se que o aço possui uma alta resistência mecânica à tração e à compressão, servindo de elemento essencial de reforço para a estrutura de concreto, uma vez que este suporta bem a compressão, mas não a tração (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

É frequente o uso do termo pasta para o concreto, que significa a mistura de cimento e água. O termo argamassa significa a mistura de cimento, areia e água. Com a adição de brita tem-se finalmente o concreto simples (ABESC, 2000).

A dosagem do concreto é a escolha das quantidades ótimas dos componentes do concreto para atender a determinadas características ou propriedades pré-estabelecidas. A proporção, definida pela dosagem, entre os compostos que fazem parte do concreto é conhecida por traço (ABESC, 2000).

3.2 Concreto - dados gerais

O concreto possui uma composição básica formada pelos quatro elementos citados: cimento, areia, brita e água. Há no mercado uma grande disponibilidade de outros produtos, conhecidos como aditivos e adições, para modificar as propriedades físico-químicas do concreto. Os aditivos e as adições podem provocar grandes variações nas propriedades do concreto, afetando muitas de suas propriedades: tratamento mecânico da mistura, lançamento do concreto, plasticidade, adensamento, trabalhabilidade, controle de fissuras, controle de temperatura, aumento de resistência, impermeabilização, aceleração e retardo de pega, incorporação de ar, etc. Para obter um detalhamento maior das propriedades afetadas pelos aditivos e adições, pode-se consultar (MEHTA; MONTEIRO, 1999). Todas essas variáveis tornam o concreto uma composição de análise bastante complexa no que se refere a seu comportamento elétrico. Até mesmo nas empresas que trabalham com o concreto chamado usinado, é comum a constatação de que há diferenças nas propriedades mecânicas do próprio cimento fornecido pelas cimenteiras, embora estas garantam a mesma composição química do produto. Ou seja, pequenas variações das condições de ensaio e dos materiais podem também provocar um alto impacto nas propriedades elétricas do concreto, tornando difícil sua análise.

A preocupação em seguir um roteiro de ensaio padronizado neste trabalho é, portanto, importantíssima para tentar reduzir a dispersão dos dados experimentais dos CP. Diversos parâmetros serão abordados a seguir, procurando dirigir a análise para a confecção adequada dos CP em laboratório, de modo a conseguir a máxima garantia de homogeneidade das propriedades elétricas das amostras.

3.2.1 Dosagem do concreto

A dosagem do concreto é um estudo primordial para sua aplicação. As variáveis mais importantes para essa escolha são: a resistência mecânica necessária para o projeto estrutural; a relação água/cimento (ou teor mínimo de cimento); o teor máximo de cimento, para evitar fissuração devido à temperatura ou devido à retração por baixas umidades; e a massa específica mínima para barragens de gravidade e estruturas similares (NEVILLE, 1997).

Quanto à durabilidade, pode-se abordar o tema sob dois pontos de vista. Em primeiro lugar, pode-se analisar o comportamento do concreto já aplicado, submetido a condições exigentes de uso. Aqui se incluem as condições mecânicas (impacto, abrasão, erosão, etc.), condições químicas (agentes naturais ou industriais, etc.) e condições físicas (temperatura, dilatação térmica, etc.) (NEVILLE, 1997). Por outro lado, os estudos de durabilidade se referem também à composição do concreto. De modo geral, neste sentido são levados em consideração principalmente o teor de cimento, a relação água/cimento e a resistência à compressão (NEVILLE, 1997).

3.2.2 Relação água/cimento

Em linhas gerais, na prática da Engenharia Civil se considera que a resistência mecânica do concreto depende basicamente de dois fatores: do grau de adensamento e da relação água/cimento (NEVILLE, 1997). Sobre a relação água/cimento, sabe-se que seu valor tem uma relação direta com a presença de poros na pasta, uma vez que parte da água não é incorporada ao concreto e permanece, durante o processo de endurecimento, ocupando uma parte do volume. Com o tempo, no entanto, a água que não reage com as partículas de cimento, evapora e acaba deixando vazios, que são os poros. É prática usual entre os projetistas evitar uma relação água/cimento elevada (por exemplo, acima de 0,60) para concretos com finalidade estrutural. No caso da resistividade elétrica, a relação água/cimento aumenta a quantidade de poros e a concentração iônica da solução aquosa que preenche os poros. Um maior número de poros levará a uma resistividade elétrica

tanto menor quanto maior for o teor de umidade (HOPPE, 2005).

A presença da água na mistura envolve fenômenos bastante complexos. No concreto endurecido, pode-se classificar essa presença da água incorporada sob três formas: por um lado, há uma porção de água livre entre os poros; outra parte da água se encontra combinada quimicamente formando compostos hidratados; há ainda outra parte retida sob outras formas variadas, relacionadas ao estado de gel (NEVILLE, 1997). Como se vê, a água está estreitamente relacionada à formação de parte dos poros.

3.2.3 Segregação

Sendo o concreto um material compósito, é natural a preocupação permanente com a possível separação dos materiais durante a execução dos corpos de prova. É o fenômeno conhecido como segregação. Esta pode ser definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea de modo que sua distribuição deixe de ser uniforme (NEVILLE, 1997).

O concreto é constituído por materiais de diferentes massas específicas. Os dados a seguir refletem valores típicos de massas específicas, ou seja, a relação massa/volume para cada material, sem considerar, portanto, os espaços de ar presentes em cada material quando este se encontra a granel. A consideração desses espaços nos forneceria a chamada massa unitária, que é, portanto, sempre inferior à massa específica. Esta é a mais fiel ao material presente na argamassa, uma vez que a mistura, teoricamente, elimina os espaços vazios entre as partículas dos materiais.

A areia tem massa específica variável, em função de sua composição mineralógica, mas um valor típico se situa em torno de 2,6 a 2,9 kg/dm^3 (este dado se encontra em (NEVILLE, 1997) p. 140, e se refere à rocha arenítica). No Laboratório de Materiais da Universidade Estadual de Londrina os ensaios mostraram, para a areia natural quartzosa da região, uma massa específica média de 2.630 kg/m^3 .

A massa específica típica da rocha basáltica se encontra na faixa de 2,6 a 3,0 kg/dm^3 (NEVILLE, 1997), ou seja, 2,6 a 3,0.10³ kg/m^3 , e é a origem da brita utilizada na mistura do concreto.

A massa específica do cimento exige uma análise mais complexa, uma vez que as partículas de cimento agregam água à sua composição na mistura. Segundo (NEVILLE, 1997), o cimento Portland hidratado possui massa específica em torno

de 1470 kg/m^3 (considerando que, segundo o autor, 100 g de cimento hidratado ocupam um volume de $67,9 \text{ ml}$).

O concreto simples e o concreto armado possuem, respectivamente, massas específicas da ordem de 2400 kg/m^3 e de 2500 kg/m^3 . A massa específica do aço se situa em torno de 7850 kg/m^3 .

A água, portanto, com sua conhecida massa específica em torno de 1.000 kg/m^3 é o menos denso dos materiais.

No caso do concreto fresco, a água apresenta viscosidade muito mais baixa do que a mistura, além de ter menor densidade. Ocorre, portanto, a tendência a um natural afloramento à superfície. A maior viscosidade da pasta fresca de cimento se opõe ao movimento descendente das partículas mais pesadas de agregado. Em consequência, misturas com relação água/cimento menor são menos propensas à segregação (NEVILLE, 1997).

O risco de segregação é menor quando o concreto não tiver que ser transportado a grandes distâncias e puder ser transferido diretamente da betoneira ou da caçamba para a posição final na forma. Por outro lado, se o concreto é lançado de grandes alturas, ou passar por calhas, principalmente com mudanças de direção, ou é descarregado contra obstáculos, se favorece a segregação (NEVILLE, 1997).

É sabido que o uso de vibradores deve ser moderado, justamente para evitar que a água se desloque para a parte superior da forma.

3.2.4 Exsudação

Um fenômeno decorrente da segregação é conhecido por exsudação, que trata da separação de parte da água do concreto, que acaba por aflorar à superfície de acabamento do concreto recém-aplicado. Com isso há um aumento da relação água/cimento na região da superfície da peça, prejudicando a integridade superficial do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

3.2.5 A mistura do concreto

Para garantir a homogeneidade da mistura e, portanto, uma menor variabilidade das propriedades medidas em corpos de prova, convém que a mistura se processe de modo a garantir que todas as partículas dos agregados do concreto estejam revestidas com pasta de cimento. É importante também que a mistura seja ho-

mogênea em macro-escala (NEVILLE, 1997).

Há muitas variáveis que podem afetar as condições físicas das amostras: o tipo de betoneira, o lançamento dos materiais, o tempo de mistura, a sequência de colocação dos agregados, a retirada da betoneira, etc. No caso da confecção dos corpos de prova, deve ser considerada a energia utilizada nos golpes de compactação das amostras, a proporção da relação altura/diâmetro das amostras, as condições de cura, etc. Mais à frente serão detalhadas as especificações da norma NBR 5738:2003. O tema da compactação será descrito no item sobre adensamento.

Há vários tipos de betoneiras e muitas vezes sua classificação é feita com base em seu método de descarga. No caso deste trabalho, a mistura se fará numa betoneira basculante, em que a mistura normalmente se inclinaria para a descarga. No caso deste trabalho, a opção escolhida foi de descarregar a betoneira sem lançar a mistura fora dela, mas recolhendo o material de dentro da betoneira, em pequenas quantidades, com o auxílio de uma concha metálica. Este ponto será detalhado na parte experimental. Nesse caso, o concreto poderia ser descarregado sem segregação significativa (NEVILLE, 1997).

Há uma grande variedade de tamanhos para as betoneiras. No entanto, se a quantidade misturada representa menos de 1/3 da capacidade nominal da betoneira, a mistura resultante corre maior risco de não ser uniforme (NEVILLE, 1997). Dentro da área específica de construção civil, as normas técnicas nacionais e internacionais exigem também uma série de critérios para avaliar a uniformidade da mistura, considerando a resistência à compressão, o teor de ar incorporado, a massa específica do concreto, etc. Outro parâmetro importante é o tempo de mistura, ou seja, qual o número adequado de revoluções para conseguir uma mistura uniforme. Os fabricantes podem especificar o número de revoluções da caçamba ou, mais simplesmente, o tempo de uso da betoneira. Existe uma velocidade ótima de mistura recomendada pelo fabricante, além de uma relação entre o tempo de mistura e a uniformidade (NEVILLE, 1997).

Uma das preocupações da preparação do concreto em trabalhos de laboratório é a perda da porção de argamassa que permanece colada naturalmente às paredes da betoneira após a descarga. Essa parte da mistura é constituída principalmente por pasta de cimento e agregado miúdo e, por revestir todas as paredes da betoneira, poderia representar uma parcela significativa da amostra, alterando assim a composição do material do corpo de prova. Em (NEVILLE, 1997) se encontra uma recomendação de que, em trabalhos de laboratório, é conveniente fazer o

untamento da betoneira. No caso deste trabalho, no entanto, para evitar o untamento, foi feito um aumento proposital no volume da mistura, de modo a haver uma grande sobra de material e tornar ínfima a proporção de cimento perdido por aderência às paredes da betoneira.

Para se conseguir uma mistura adequada, mais do que o tempo de mistura, deve ser controlado o número de revoluções da betoneira. Geralmente são suficientes em torno de 20 revoluções. Como existe uma velocidade ótima de mistura recomendada pelo fabricante da betoneira, o número de revoluções e o tempo estão relacionados (NEVILLE, 1997).

Em (NEVILLE, 1997) se encontram dados típicos obtidos em experiências, onde se nota que a mistura, quando executada em tempos inferiores a 1 minuto fornecem concretos sensivelmente mais variáveis. No entanto, tempos superiores a 1 1/4 minutos não fornecem aumentos significativos na uniformidade.

O tempo prolongado de mistura pode comprometer algumas das características das amostras. Geralmente ocorre evaporação de água da mistura, o que pode diminuir a trabalhabilidade do concreto e aumento da resistência mecânica. Além disso, o atrito entre as partículas produz um aumento de temperatura da mistura (NEVILLE, 1997).

3.2.6 Ordem de colocação dos materiais

A ordem de colocação dos materiais na betoneira deve seguir alguns cuidados básicos: geralmente coloca-se uma pequena quantidade de água, seguida de todos os materiais sólidos, de preferência colocados uniforme e continuamente. Com algumas betoneiras de tambor, é necessário, para misturas secas, colocar antes uma parte da água e o agregado graúdo, pois de outra forma sua superfície não seria suficientemente molhada. Nos casos em que o agregado graúdo estiver completamente ausente, a areia e o cimento correm o risco de ficar colados à entrada da betoneira e não se incorporarem à mistura. Outro possível problema ocorre quando a água e o cimento são colocados muito rapidamente ou estiverem muito quentes. Nesse caso, há o risco de se formarem grumos de cimento com até 70 mm de diâmetro. Com betoneiras pequenas de laboratório, é conveniente colocar o agregado miúdo, depois uma parte do agregado graúdo e o cimento, depois a água, e finalmente o restante do agregado graúdo, de modo a desfazer os possíveis nódulos de argamassa (NEVILLE, 1997).

3.2.7 Adensamento do concreto

A finalidade do adensamento do concreto, também conhecido como compactação, é alcançar a maior compacidade possível do concreto. A finalidade deste procedimento é eliminar, durante a fase de concreto fresco, o máximo possível das naturais bolhas de ar incorporadas à massa durante o processo de mistura. É a própria definição de adensamento. O meio mais usual de adensamento atualmente, para concretos lançados em obra, é a vibração (NEVILLE, 1997). No caso de ensaios de laboratório, o modo usual de adensamento é realizada por procedimento manual. Utiliza-se para tanto uma haste de aço cilíndrica, com superfície lisa, de diâmetro 16 mm e comprimento de 60 a 80 cm, com extremidade semi-esférica de diâmetro igual ao da haste (NBR-NM67, 1998). A haste, colocada na posição vertical, por diversas vezes é levada ao fundo do corpo de prova e retirada em seguida. São os chamados golpes de compactação.

A norma NBR 5738:2003 prevê o número de golpes de compactação e o número de camadas a serem colocadas entre a sequência de golpes. Na descrição do procedimento experimental este item será comentado com mais detalhes.

O recurso da vibração deve ser utilizado de forma moderada: o excesso de vibração, como já foi comentado, pode provocar a segregação dos componentes da mistura, fluidificando a área atingida e alterando a composição local (NEVILLE, 1997).

A prática com a manipulação do concreto tem mostrado diversas variáveis que interferem em suas características físicas. O concreto deve apresentar uma adequada trabalhabilidade, ou seja, a característica do concreto recém misturado que determina a facilidade e a homogeneidade com a qual o material pode ser misturado, lançado, adensado e acabado (GEYER, 2006). Neville define a trabalhabilidade como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade.

Outro parâmetro de análise é a chamada consistência, que é a medida da mobilidade da mistura (plasticidade), isto é, a maior ou menor facilidade de deformar-se sob a ação de cargas (ABESC, 2000). A consistência é avaliada pelo ensaio de slump, que mede o valor do chamado abatimento. O ensaio de slump é normalizado pela NBR NM 67:1998 e mede a deformação vertical (abatimento) de um corpo de concreto fresco ao ser retirado de um molde de forma cônica (cone de Abrams).

3.3 Fenômenos eletroquímicos relacionados ao concreto

O estudo de altas tensões aplicadas ao concreto envolve o conhecimento de fenômenos disruptivos que podem ocorrer durante a passagem de corrente. Não é objetivo deste trabalho entrar no tratamento dos materiais nesses aspectos. Porém, uma vez que a corrente elétrica atravessa um composto formado por alguns materiais de alta resistividade, convém analisar quais os caminhos possíveis para as correntes dentro do concreto.

De fato, muitos pesquisadores da Engenharia Civil estudam o comportamento eletroquímico do concreto para analisar a corrosão das armaduras. Sem entrar no vastíssimo tema das patologias, sabe-se que há uma relação importante das patologias eletroquímicas com a resistividade elétrica do concreto. Justifica-se assim a preocupação dos engenheiros civis por tornar o concreto um material de alta resistividade elétrica. A abordagem aqui apresentada, no entanto, é bastante superficial e se refere somente aos fenômenos que terão relação direta com a resistência elétrica do concreto. Um estudo breve, mas que fornece uma boa idéia de conjunto se encontra em (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

3.3.1 Poros do concreto

Para compreender melhor a natureza dos fenômenos eletroquímicos, é conveniente conhecer a natureza e algumas das propriedades dos poros do concreto, uma vez que grande parte da resistividade elétrica depende de sua formação.

Os poros são formados naturalmente pelo processo de mistura do concreto e têm uma grande importância em todo seu comportamento. São resultado da presença de ar e de água no processo de mistura. Posteriormente, pelo endurecimento da pasta, são incorporados ao volume.

Para compreender com mais detalhes a formação dos poros é necessário recorrer às propriedades microscópicas do concreto. Basicamente, a análise resumidamente aqui apresentada recolhe as propriedades do cimento Portland.

Uma vez endurecida, a pasta de concreto mostra uma composição química complexa com grades cristalinas não uniformemente distribuídas, formadas principalmente por silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e ainda por grãos de clínquer não hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 1999). O clínquer pode ser definido como o cimento numa fase básica de fabricação, a

partir do qual se obtém o cimento Portland, habitualmente com a adição de sulfato de cálcio, calcário e/ou escória siderúrgica.

Quatro compostos são usualmente considerados como os principais constituintes do cimento: o silicato tricálcico ($3CaO.SiO_2$), abreviado habitualmente por C_3S ; o silicato dicálcico ($2CaO.SiO_2$), abreviado por C_2S ; o aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$), abreviado por C_3A ; e o ferroaluminato tricálcico ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$), abreviado por C_4AF (NEVILLE, 1997).

O silicato de cálcio hidratado, comumente abreviado por C-S-H, constitui em torno de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado. Por suas propriedades físico-químicas, na literatura é muitas vezes denominado por C-S-H gel. Em sua composição, o C-S-H contém geralmente pequenas quantidades de Al, Fe, Mg e outros íons (NEVILLE, 1997).

O hidróxido de cálcio, também conhecido como portlandita, ocupa 20 a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada. Em contraste com o C-S-H, tem uma fórmula estequiométrica bem definida: $Ca(OH)_2$.

Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam 15 a 20% do volume. Na presença de água, a partir deste material se favorece a formação de trissulfato hidratado, conhecido como etringita ($6(CaO).Al_2O_3.3SiO_2.32H_2O$), que forma cristais prismáticos com forma de pontas. Os grãos de clínquer não hidratado ocupam em torno de 6 a 8% do volume. Esses grãos se referem à parcela de clínquer que, apesar de sua proximidade de outros grãos hidratados do próprio clínquer, mesmo após longo período de hidratação permaneceram não hidratados (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

A estrutura de formação dos poros e sua distribuição na pasta endurecida é um assunto bastante complexo. As informações contidas neste item têm a intenção somente de apontar a origem dos poros do concreto, pois estes têm uma relação importante com o fenômeno da passagem de corrente elétrica.

A água pode ser retida em parte nos chamados espaços interlamelares da estrutura C-S-H. São pequenos vazios (em torno de 25 angstroms, segundo os autores) em que a água pode ser retida por pontes de hidrogênio (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta. Com forma geométrica irregular, estes espaços têm grande importância nas propriedades mecânicas do concreto. Em pastas bem hidratadas, com baixa relação água/cimento, os vazios capilares podem variar entre 10 e 50 μm . Em outros casos, com relação água/cimento elevada, nas primeiras idades

de hidratação, os vazios podem atingir de 3 a 5 μm (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

Há ainda outra origem para os poros: o ar incorporado, geralmente de forma esférica. Refere-se ao ar aprisionado na pasta fresca de cimento durante o processo de mistura que depois se torna incorporado ao concreto endurecido. Os poros de ar aprisionado podem chegar a 3 mm; já os poros de ar incorporado variam na faixa de 50 a 200 μm . Tanto um como outro são, portanto, muito maiores que os poros descritos anteriormente (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

Assim, pode-se afirmar que na pasta endurecida a água será retida sob quatro formas básicas: a água capilar, a água adsorvida, a água interlamelar e a água quimicamente combinada (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

A água adsorvida é a água que está próxima da superfície do sólido. Esta parcela sofre a atração das superfícies dos sólidos da pasta. Alguns autores sugerem que estas moléculas estão retidas fisicamente por pontes de hidrogênio até seis camadas moleculares de água (15 angstroms). A maior parte da água adsorvida pode ser perdida por secagem da pasta, para uma umidade relativa em torno de 30%. Essa perda é a maior responsável pela retração do material na secagem (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

A água interlamelar é a parcela associada à estrutura C-S-H. Supõe-se que há uma camada monomolecular de água presente entre as camadas de C-S-H, fortemente ligada por pontes de hidrogênio. Essa água só é perdida por secagem forte, ou seja, com umidade relativa abaixo de 11%. Nesse caso há considerável retração da estrutura C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

A água quimicamente combinada é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Esta parcela não é perdida por secagem. Só é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento. A Figura 3.1 mostra os diferentes agrupamentos de moléculas de água segundo o modelo proposto por Feldman e Sereda (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

Importa ainda considerar uma parcela de vazios no concreto formados por outro fenômeno físico: a exsudação interna da água junto aos elementos macroscópicos presentes no concreto.

Como foi abordado no item 3.2.4, existe um acúmulo natural da água na superfície externa superior, formando uma pequena lâmina de água no concreto fresco recém lançado, por efeito da segregação, uma vez que a água é o material de menor massa específica.

No entanto, há ainda uma exsudação interna da água, ou seja, uma acu-

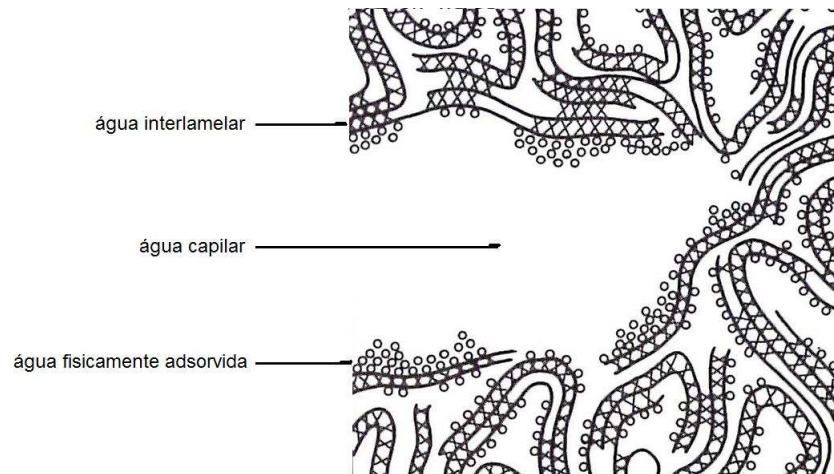


Figura 3.1: Posicionamento das moléculas de água sob diversas formas na pasta de cimento.

mulação de água nas vizinhanças das partículas de agregados, principalmente junto aos materiais de forma geométrica longa e achatada. Incluem-se aqui, além dos agregados miúdos e graúdos, também as armaduras. Os vazios, que podem ser de tamanhos e formas bastante variadas, ocupam espaços macroscópicos, visíveis a olho nu quando se secciona o concreto para análise.

A Figura 3.2 ilustra os espaços formados pela exsudação interna.

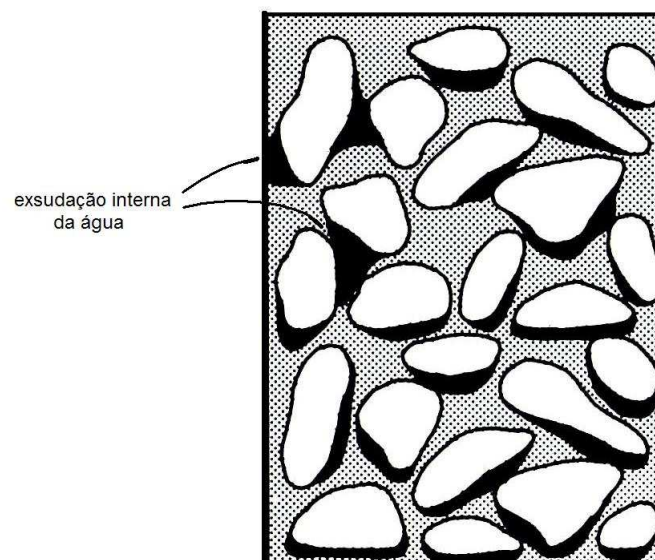


Figura 3.2: Exsudação da água junto aos agregados.

Quanto ao movimento de fluidos no interior da pasta de concreto, costuma-se chamar de percolação a esse deslocamento. Na verdade, é preciso reconhecer três mecanismos distintos de percolação: a permeabilidade, que se refere ao escoamento sob diferencial de pressão; a difusão, que trata do deslocamento de fluidos por diferença de concentração; a sorção, relativa à passagem de fluidos por elevação capilar (NEVILLE, 1997). O autor citado comenta as propriedades

dos poros sob vários aspectos. Nos primeiros capítulos da obra, trata de aspectos físicos e químicos. Mais ao final da obra, desenvolve o tema da continuidade dos poros, ou seja, poros não interligados não permitem o escoamento de fluidos. Esta propriedade tem grande importância para a condutividade elétrica, uma vez que a continuidade dos poros é uma garantia a mais da continuidade da corrente através do concreto.

Com as considerações feitas sobre a natureza dos poros e os fenômenos microscópicos, vê-se que a passagem de corrente elétrica será também um fenômeno de análise bastante difícil. Antes de entrar nas considerações sobre a corrente, serão abordados alguns dos fenômenos eletroquímicos mais importantes relacionados ao concreto.

3.3.2 Resistividade do concreto sob tensões eletroquímicas

O concreto úmido é um meio sólido com resistividade elétrica da ordem de $10^4 \Omega m$ (NEVILLE, 1997). O autor citado oportunamente fornece a resistividade para o concreto úmido. Outras fontes, no entanto, da área elétrica fornecem valores muito maiores. A referência (MORENO; COSTA, 1999), por exemplo, cita o valor de $3000 \Omega cm$ a $20^\circ C$. Este valor, porém, como não especifica a condição de umidade, traz uma afirmação imprecisa. O concreto seco, de fato, pode chegar a essa ordem de valores. O item 3.4 tratará da influência do teor de umidade na resistividade. O sistema interligado de armaduras garante baixa resistência no caminho percorrido pela corrente no aço (em geral menor que $1 \Omega m$), normalmente em torno de $0,25 \Omega m$ (MORENO; COSTA, 1999).

É possível obter valores bastante inferiores de resistividade para o concreto. Há experimentos com dois grupos de produtos conhecidos como cimento condutivo. O primeiro grupo tem a finalidade de acelerar a cura do concreto e diminuir o tempo de execução da obra. O segundo grupo tem a finalidade de diminuir a resistência de aterramento. No segundo caso, a resistividade chega a apresentar valores da ordem de $20 \Omega cm$ (HALLMARK, 2000).

Neste item serão estudadas algumas variáveis que podem afetar a resistividade elétrica do concreto. A maioria dos estudos aqui citados se refere à composição do concreto e à sua resistividade, com a finalidade de observar seu comportamento diante de correntes eletrolíticas, ou seja, um estudo direcionado à possível corrosão das hastes de aço da armadura, preocupação permanente e importante da Engenharia Civil. É preciso ter em conta, no entanto, uma diferença essencial de enfoque com relação à proposta do presente trabalho: neste capítulo se

estudará a resistividade do concreto em tensões bastante reduzidas (na ordem de tensões eletroquímicas) e, portanto, correntes também muito reduzidas. Esse estudo servirá somente como orientação para a tarefa principal que nos ocupa, uma vez que o contexto deste trabalho se refere ao comportamento do concreto sob correntes de descargas atmosféricas, ou seja, da ordem de kA.

Para a Engenharia Civil há interesse em conseguir uma composição do concreto a mais eletricamente resistiva possível para minimizar o processo corrosivo; para a Engenharia Elétrica importa conseguir um concreto que ofereça um caminho de baixa impedância, para que as correntes possam escoar mais facilmente da armadura para a terra. De fato, a resistividade elétrica do concreto tende a ser baixa, como será comentado mais à frente, principalmente devido à umidade do solo, que faz com que o concreto tenha um alto teor de umidade por efeito da absorção de água por capilaridade.

Um dado que mereceria um estudo aprofundado na área de eletroquímica é que o concreto, pela sua composição química, pode favorecer a presença, entre outros, de íons OH^- , SO_4 e Cl^- . Estes íons são conhecidos por sua alta condutividade molar, ou seja, a capacidade de oferecer um caminho de baixa impedância para a corrente, tanto em altas como em baixas concentrações desses eletrólitos (ATKINS; PAULA, 2009).

3.4 Variabilidade da resistividade do concreto em BT e AT

Quando se trata da resistividade elétrica do concreto sabe-se que seu valor pode apresentar uma alta dispersão. O fenômeno, como será mostrado com dados experimentais na sequência deste item, é frequentemente observado. Isso significa que, embora se proceda de modo padronizado na confecção de amostras em laboratório (normalmente as amostras são condicionadas em moldes padronizados), o valor medido da resistência elétrica nesses corpos, seja em AT ou em BT, pode apresentar uma variação muito elevada. Em ensaios de laboratório na UEL, por exemplo, os CP de um mesmo lote (provenientes de uma mesma mistura colocada na betoneira) chegaram a apresentar valores de resistência elétrica em torno de dez vezes maiores (SOUZA, 2009), ainda que seguindo os cuidados práticos básicos que serão detalhados mais à frente, nos Procedimentos Experimentais.

Para ilustrar o fenômeno, é possível tomar, a título de exemplo, o quadro de medidas apresentado na Tabela 3.1, realizadas nos Laboratórios de ensaios de AT

Tabela 3.1: Valores de impedância em Ω para CP 10x30 cm, traço 1:2:3 (amostras 1 e 2) e traço 1:1:2 (amostras 4 e 6), sob tensão impulsiva.

Amostra	10kV	20kV	50kV	70kV	100kV	Média	Desvio Padrão	Coef. Var.
1A	17.630	17.582	18.268	16.448	16.424	17.270	808	5
1B	17.446	20.831	23.424	24.187	20.044	21.186	2.713	13
1C	18.054	23.888	23.982	25.504	23.097	22.905	2.848	12
1D	22.900	32.444	25.477	34.231	35.344	30.079	5.551	18
3A	28.332	29.667	30.650	41.658	26.794	31.420	5.904	19
3B	26.672	32.662	37.198	41.421	58.042	39.199	11.871	30
3C	32.701	23.761	33.202	41.460	58.082	37.841	12.932	34
3D	23.095	26.869	34.064	41.479	39.818	33.065	7.987	24
4A	20.710	33.025	33.301	45.443	—	33.120	10.098	30
4B	20.473	39.443	38.746	41.277	32.621	34.512	8.495	25
4C	19.237	43.588	42.003	42.125	45.112	38.413	10.794	28
4D	31.528	37.133	53.215	55.714	51.191	45.756	10.737	23
6A	35.485	30.847	41.508	52.314	—	40.038	9.275	23
6B	32.338	31.011	53.370	56.356	45.982	43.811	11.715	27
6C	52.242	53.560	54.094	61.040	—	55.234	3.948	7
6D	46.016	47.535	61.443	38.779	53.292	49.413	8.484	17

do IEE-USP em 2009.

Os CP, de dimensões 10x30 cm (cilíndricos, medidas de diâmetro x altura), foram submetidos a ensaios de AT impulsiva, de 10 kV a 100 kV. Convém comentar que a escolha das dimensões não segue os padrões estabelecidos pela NBR 5738:2003, que fixa a altura do CP cilíndrico como o dobro do diâmetro. A escolha, além de facilitar o transporte das amostras, atende um critério de necessidade prática: a altura de 20 cm limitaria muito o nível de AT aplicada, uma vez que as correntes de impulso poderiam percorrer a lateral do CP sem passar pelo interior do concreto. Cabe dizer ainda que esses CP não foram submetidos a ensaios de compressão.

Os números que aparecem na especificação das amostras se referem a distintos lotes retirados da betoneira. Os lotes 1 e 3 possuem traço 1:2:3; as amostras 4 e 6 possuem traço 1:1:2. O lote 1 foi realizado com relação água/cimento de 0,60; o lote 3 com 0,50; o lote 4 com 0,60; o lote 6 com 0,50. As letras A, B, C, D se referem a amostras diferentes dentro de um mesmo lote.

Como se vê pela Tabela 3.1, o coeficiente de variação chegou a atingir 34%. Nos outros casos, somente dois deles apresentaram coeficiente de variação inferior a 10%, o que representa, de modo geral, uma alta dispersão.

Utilizando os mesmos CP, mas separando somente o lote número 4, a Tabela 3.2 também apresenta dados elevados de dispersão. Os CP, nesse caso, foram

Tabela 3.2: Valores de impedância em Ω , para CP 10x30 cm, traço 1:2:3 (amostras 1 e 2) e traço 1:1:2 (amostras 4 e 6), sob tensão impulsiva, para diferentes valores de temperatura ambiente.

4A		4B		4C		4D	
25°C		25°C		26°C		26°C	
V	Ω	V	Ω	V	Ω	V	Ω
40,9	54.533	40,6	130.968	40,3	223.889	40,6	580.000
49,6	54.505	51,8	132.821	51,0	212.500	51,7	574.444
60,9	54.865	59,5	129.348	60,8	209.655	60,8	552.727
72,0	54.545	70,6	128.364	69,7	205.000	71,3	548.462
80,4	54.694	79,0	127.419	79,6	204.103	80,4	536.000
91,7	54.583	90,1	126.901	92,0	204.444	90,0	500.000
99,7	54.780	100,6	127.342	101,7	203.400	100,0	500.000
109,7	54.577	109,5	125.862	110,0	203.704	110,5	502.273
120,1	54.591	120,6	125.625	119,8	203.051	119,4	497.500
129,7	54.726	130,9	124.667	129,5	202.344	130,5	501.923
140,2	54.766	140,0	125.000	140,5	203.623	141,0	486.207
145,0	54.511	144,8	123.761	144,8	201.111	145,1	483.667
Média	54.640		127.340		206.402		521.934

submetidos a valores de BT, CA, na faixa aproximada de 40 a 145 V. O traço utilizado aqui, como já citado, é 1:1:2, com relação água/cimento de 0,60, todos provenientes de um mesmo lote de ensaio. Como se pode notar, a média da resistência elétrica na amostra 4D fornece um valor próximo de dez vezes da média da resistência da amostra 4A; quatro vezes maior que a média de 4B; duas vezes e meia maior que a média de 4C, embora os quatro CP procedam da mesma amostragem, da mesma betoneira, do mesmo lote.

Esse fenômeno de alta dispersão nos valores de resistência elétrica do concreto é bastante comum na literatura. Veja-se, por exemplo, o trabalho de Torrenti (TORRENTI, 2009). Neste caso, o autor testou trinta e seis CP e encontrou uma distribuição de valores de resistividade entre 110 e 240 Ωm .

Nota-se que o concreto utilizado em ensaios, apesar dos cuidados nos procedimentos para a confecção e manuseio do material, costuma exibir uma alta dispersão nos valores obtidos.

Na verdade, essa alta dispersão se deve principalmente aos baixos teores de umidade utilizado nas amostras. De fato, para baixos teores, a resistividade tende a ser muito elevada e, nessas condições, pequenas variações no teor de umidade podem levar a grandes variações de resistividade, como se observa nos gráficos de resistividade elétrica fornecidos por (NEVILLE, 1997).

Neste trabalho, como será mostrado no Capítulo sobre Resultados e Dis-

cussão, os ensaios serão dirigidos para teores de umidade superiores a 85%, o que contribuirá de modo significativo para a uniformização dos dados. Essa escolha, no entanto, não suprime evidentemente a necessidade de preparar as amostras com um procedimento experimental mais rigoroso.

3.5 Fatores que afetam a resistividade do concreto

Analisando algumas das referências que tratam da resistividade elétrica nos estudos da construção civil, podem-se encontrar interessantes análises sobre os parâmetros que afetam a resistividade. De fato, o aço da armadura está sujeito a uma ação contínua de corrosão eletrolítica nas situações habituais de uso em fundações, especialmente em ambientes de alta salinidade.

A resistividade do concreto apresenta-se como uma propriedade extremamente sensível, e muitos são os fatores que a influenciam. São importantes para a resistividade do concreto aqueles fatores que estão diretamente ligados à sua composição, como a relação água/cimento, o consumo e o tipo de cimento, o tipo e a quantidade de agregado, as adições e os aditivos. Esses fatores irão influenciar o tamanho e a distribuição dos poros, o teor de umidade, a reserva alcalina, a sensibilidade à cura, entre outros aspectos. Afetam, assim, as propriedades físicas e químicas do concreto e, de alguma forma, a sua condutibilidade elétrica, ou seja, a resistividade. Em (NEVILLE, 1997) se encontra um estudo amplo sobre a porosidade. O fenômeno da formação de poros envolve muitos parâmetros de análise.

Com relação à atividade iônica dos eletrólitos, é sabido que quanto maior sua atividade iônica, menor a resistividade elétrica do concreto, sendo que um aumento na relação água/cimento, na umidade relativa do ambiente ou eventual presença de íons agressivos como Cl^- , SO_4^{2-} , H^{2+} e outros, reduzirá significativamente a resistividade do concreto. Teores de apenas 0,6% de Cl^- são suficientes para diminuir a resistividade de uma argamassa em cerca de 15 vezes (NEVILLE, 1997). A resistividade de um líquido é inversamente proporcional ao teor de sais dissolvidos enquanto a de materiais porosos é inversamente proporcional à umidade salina absorvida (HOPPE, 2005).

A resistividade elétrica do concreto depende principalmente da composição química da solução aquosa dos poros, da estrutura dos poros, da umidade e da temperatura do concreto, podendo o mesmo atuar como isolante ou como

semicondutor elétrico (HOPPE, 2005).

3.5.1 A umidade

Uma das principais variáveis que afetam a resistividade do concreto em tensões eletrolíticas é o teor de umidade, ou seja, a água contida no concreto no interior dos poros. A água aqui citada se refere a uma parcela que admite mobilidade no interior do concreto. Há, de fato, a grosso modo, duas parcelas de água na massa do concreto: a água livre, que possui mobilidade relativamente alta pelos poros; e a água combinada quimicamente formando uma parte definida dos compostos hidratados. Entre essas duas formas, há ainda uma parcela de “água de gel” retida sob vários outros modos. A água retida por forças superficiais das partículas de gel é denominada “água de adsorção” e a parte dessa água retida entre as superfícies de certos planos de um cristal é denominada “água intersticial” ou “zeolítica” (NEVILLE, 1997). Em (MEHTA; MONTEIRO, 1999) se encontra também uma análise interessante sobre essas formas da presença da água na argamassa do concreto.

Uma classificação mais cômoda para fins de pesquisa consiste em considerar a água como evaporável e não evaporável. A água evaporável pode ser determinada pela perda por secagem a alta temperatura (geralmente 105° C) (NEVILLE, 1997). Para este trabalho, o processo de secagem será conduzido por esse tratamento. Para estudos mais aprofundados do concreto, no entanto, são pesquisadas muitas outras variáveis e procedimentos. Sabe-se que a solução aquosa dos poros do concreto é o principal caminho da corrente elétrica. Nota-se que o volume dessa solução diminui com a redução do teor de umidade. Dessa forma, a corrente elétrica é reduzida e, conseqüentemente, a resistividade elétrica aumenta.

A resistividade, no entanto, é também caracterizada pela mobilidade de íons como Na^+ , K^+ , OH^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , presentes nos poros do concreto em solução aquosa. A maior concentração desses íons, portanto, também afeta a resistividade, diminuindo seu valor (KOLEVA et al., 2008).

A umidade é, na verdade, uma das muitas variáveis de análise para explicar o valor da resistividade do concreto. De modo geral, a resistividade depende dos compósitos envolvidos, do tipo de cimento, da matriz utilizada para a composição do concreto e, em grande parte, da umidade. O assunto é bastante complexo. Para maiores aprofundamentos, o trabalho de (HOPPE, 2005) recolhe uma série de análises sobre o tema. Um texto de particular interesse é o livro de (WHITING; NAGI, 2003).

No Capítulo sobre Metodologia de Ensaio será descrita uma forma de avaliar o teor de umidade presente no concreto por meio, basicamente, da secagem das amostras por aquecimento (para avaliar a massa seca) e pela imersão em água (para avaliar a massa saturada).

Para alguns autores, a condutividade elétrica do concreto é praticamente nula para um teor de umidade de aproximadamente 42%. Embora, nessa mesma umidade, a pasta de cimento ainda contenha quantidades significativas de água em seus poros (acima de 4% do volume do concreto), de fato o concreto apresenta uma condutividade muito reduzida (HOPPE, 2005). A Dissertação de Hoppe, citada diversas vezes neste trabalho, mostra uma pesquisa de Gjørv ((GJORV; VENNESLAND; EL-BUSAIDY, 1977)), que investigou o efeito do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto, para várias relações água/cimento (0,42, 0,48, 0,60 e 0,70). Amostras de concretos saturadas foram secas até a umidade de 40%, sendo determinada a resistividade elétrica para alguns valores de teor de umidade, conforme mostra a Figura 3.3. Com a amostra saturada de concreto, a resistividade variou aproximadamente de 4,5 a 7 $k\Omega.cm$, para as diferentes relações de água/cimento. No teor de umidade de 40%, os valores variaram de 100 a 7000 $k\Omega.cm$, para as diferentes relações de água/cimento. Portanto, a resistividade elétrica aumentou com a redução da relação água/cimento, efeito este verificado mais intensamente à medida que o teor de umidade diminuiu. Por exemplo, com a amostra saturada de concreto, a resistividade elétrica aumentou em aproximadamente 1,6 vezes, com a redução da relação água/cimento de 0,70 para 0,42, enquanto que, com 60% de umidade, o aumento na resistividade elétrica foi de aproximadamente sete vezes, com a redução da relação água/cimento de 0,70 para 0,42.

3.5.2 Outras variáveis importantes

Além da umidade, cabe destacar principalmente o valor da relação água/cimento, por sua relação direta com a formação de poros que, uma vez preenchidos com água, servirão de caminho para a condução de correntes. Não serão abordados aqui o tema dos aditivos.

3.5.2.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento é sem dúvida um dos principais parâmetros controladores das características do concreto, influenciando a resistência mecânica e as propriedades ligadas à sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1999). Trata-se da

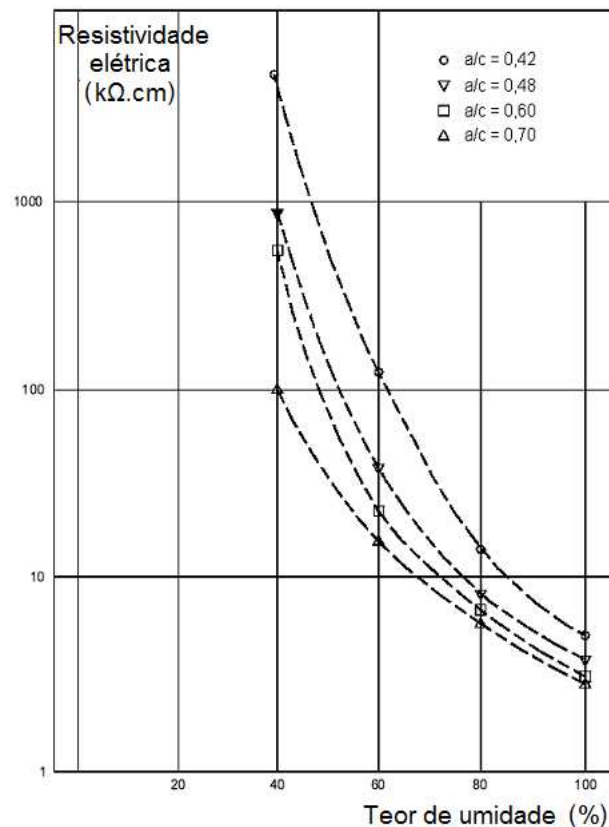


Figura 3.3: Efeito do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto ((GJORV; VENNESLAND; EL-BUSAIDY, 1977)).

proporção de água (em massa) com relação ao cimento, definida pela dosagem, que será aplicada à mistura. É um parâmetro de forte influência, uma vez que qualquer aumento do volume de água e da concentração de íons na solução aquosa dos poros diminui a resistividade da pasta de cimento. A Figura 3.4 mostra o comportamento das variáveis. De fato, a resistividade decresce rapidamente com o aumento da relação água/cimento, devido principalmente à maior disponibilidade de eletrólito e maior porosidade. Uma redução no consumo de cimento do concreto também resulta em aumento na resistividade elétrica, pois com a relação água/cimento constante, mas com um consumo menor de cimento, existe menos eletrólito disponível para a passagem de corrente, conforme se pode observar na Figura citada (NEVILLE, 1997).

Percebe-se ainda que, à medida que a relação água/cimento diminui, a variação na resistividade elétrica também decresce.

3.5.2.2 Resistividade dos agregados

A resistividade elétrica dos agregados (areia quartzosa, brita calcária, mármore, basalto, etc.) utilizados no concreto é muito maior do que a resistividade elétrica

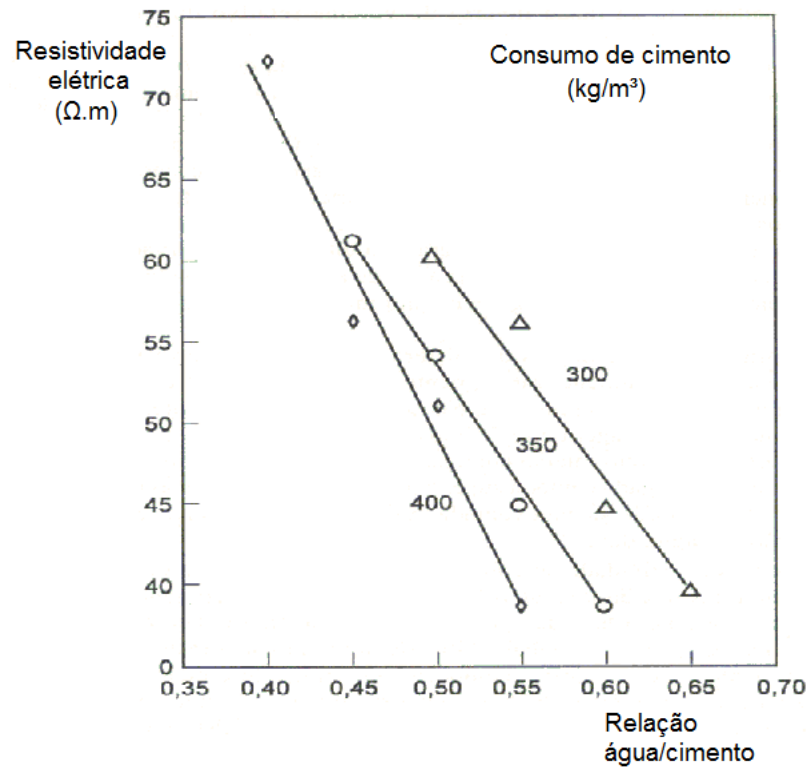


Figura 3.4: Resistividade elétrica x relação água/cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado a 28 dias.

da pasta de cimento. Para ter uma idéia de valores, são citados aqui alguns agregados típicos: arenito ($18 \text{ k}\Omega.\text{cm}$), pedra calcária ($30 \text{ k}\Omega.\text{cm}$), mármore ($290 \text{ k}\Omega.\text{cm}$) e granito ($880 \text{ k}\Omega.\text{cm}$). Embora a resistividade elétrica do concreto dependa principalmente da pasta de cimento, mudanças no tipo e no teor do agregado influenciam o valor da resistividade elétrica do concreto. É de se esperar que ao substituir um agregado por outro de maior resistividade, promova-se um aumento da resistividade do concreto (HOPPE, 2005).

A Figura 3.5 mostra a influência do teor do agregado na resistividade do concreto. Quando o teor de agregado graúdo ($D_{\text{máx}} = 40 \text{ mm}$), expresso como múltiplo da massa de cimento, aumentou de 2,92 para 4,36, a resistividade passou de 4,86 para $5,73 \text{ k}\Omega.\text{cm}$ para uma relação água/cimento de 0,50, mostrando que, com o aumento do teor do agregado, eleva-se a resistividade elétrica do concreto (HOPPE, 2005).

Outros autores, pesquisando a influência do agregado na condutividade elétrica de concretos de cimento Portland, concluíram que, quando o teor de agregado aumenta, a condutividade elétrica do concreto diminui (HOPPE, 2005). Isso devido ao fato da resistividade elétrica do agregado ser muito maior do que a da pasta. Há ainda outras variáveis eletroquímicas a serem discutidas, mas extrapolariam o contexto deste trabalho.

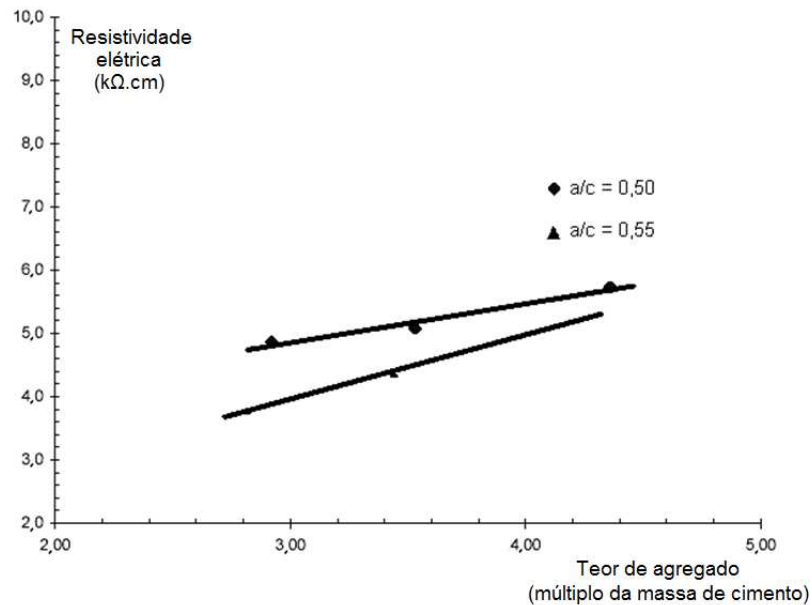


Figura 3.5: Efeito do teor do agregado sobre a resistividade elétrica do concreto.

3.5.2.3 Temperatura

A temperatura ambiente tem um efeito significativo na resistividade elétrica do concreto, pois influencia a condutividade elétrica da solução aquosa dos poros. Ou seja, quando a temperatura aumenta, a viscosidade do eletrólito diminui, intensificando a mobilidade dos íons, o que leva a uma maior condutividade elétrica do eletrólito e conseqüentemente a uma menor resistividade elétrica do concreto. A Figura 3.6 expressa a variação da resistividade para vários valores de traço do concreto (HOPPE, 2005).

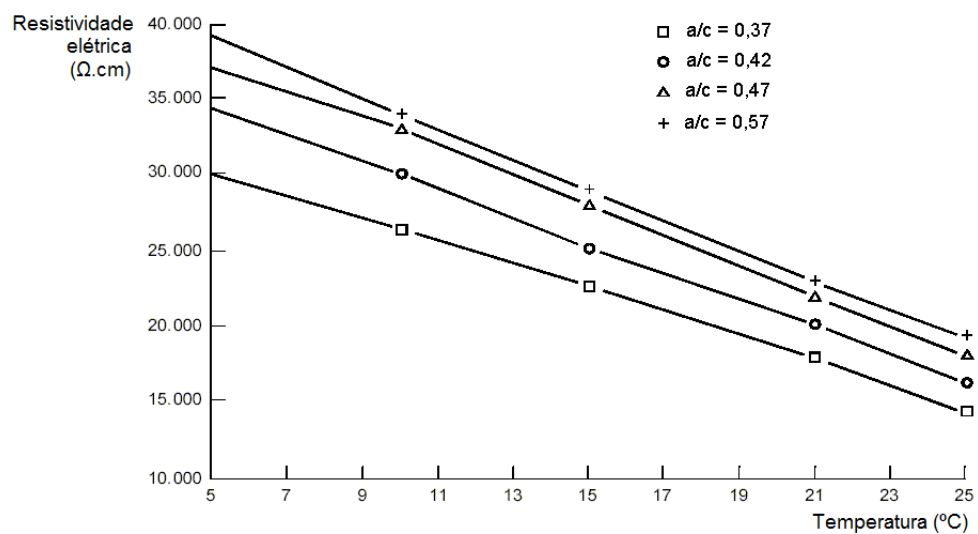


Figura 3.6: Efeito da temperatura sobre a resistividade elétrica do concreto.

3.6 Descargas atmosféricas: conceitos básicos

Neste item serão apresentados alguns conceitos sobre as descargas atmosféricas que serão úteis à análise geral do trabalho. Interessam-nos principalmente os valores observados de tensão e corrente das descargas, bem como suas formas típicas de onda.

Uma primeira classificação das descargas atmosféricas pode ser dada em termos dos elementos envolvidos: somente nuvem (intra-nuvem ou entre nuvens), nuvem-solo e solo-nuvem. As descargas que ocorrem nas nuvens (intra e entre nuvens) representam em torno de 70% do total das descargas atmosféricas. Das 30% restantes, mais de 99% das descargas são do tipo nuvem-solo. Destas, em torno de 90% são descargas negativas, ou seja, o caminho de ionização do ar é aberto a partir da concentração das cargas negativas (INPE). As descargas chamadas “positivas” são também movimentos de elétrons, mas o canal de descarga é aberto a partir da carga positiva. Para maiores detalhes consultar, entre outros (VISACRO, 2005).

Sabe-se que o valor médio de carga transferido por uma descarga está em torno de 10 C e que a tensão ao longo do canal de descarga é de aproximadamente 100 MV (INPE). Interessa particularmente ao tema deste trabalho o valor da corrente, uma vez que a transferência dessa carga, o tempo de descarga e as formas de onda associadas determinarão vários parâmetros da proteção.

É comum na literatura relativa à proteção contra descargas referir-se a uma onda dupla exponencial para representar o impulso atmosférico. Essa representação não é, no entanto, fiel às muitas variações possíveis das correntes de descarga. Essa aproximação procede somente da necessidade de padronização dos ensaios experimentais, evidenciando satisfatoriamente alguns parâmetros de desempenho de equipamentos, dispositivos e materiais.

Pensando também na padronização de ensaios, a (NBR6936, 1992) estabelece o padrão de impulso em 1,2/50, ou seja, tempo de frente de onda de 1,2 μs e tempo até o meio valor de 50 μs ((NBR6936, 1992), item 5.3.1.2). O tempo de frente é definido pela norma como 1,67 vezes o intervalo de tempo T entre os instantes correspondentes a 30% e 90% do valor de pico; o tempo até o meio valor é o intervalo de tempo entre a origem virtual (pseudo-início da subida, obtida por prolongamento virtual da curva de subida, em direção próxima à origem) e o instante no qual a tensão atinge a metade do valor de pico, na cauda ((NBR6936, 1992), itens 5.3.1.7 a 5.3.1.9). écnica distingue os impulsos atmosféricos (tempo

de frente até 20 μs) dos impulsos de manobra (tempo de frente maior que 20 μs , cfr. (NBR6936, 1992), item 3.1, nota d).

3.6.1 Conceitos e fenômenos de AT aplicados a ensaios

O trabalho com AT desperta questões complexas com relação aos fenômenos elétricos. A tensão elevada traz uma abordagem diferenciada no comportamento dos materiais, onde com frequência ocorrem fenômenos de ruptura dielétrica durante a passagem de corrente. Serão comentados neste capítulo alguns princípios básicos sobre o assunto.

É preciso ter em conta que a impedância de aterramento não é composta apenas de resistência ôhmica. Por sua subida rápida, a descarga atmosférica deve ser tratada como fenômeno transitório, uma vez que a frequência correspondente pode chegar a 1 MHz. Este dado acrescenta uma informação essencial para a análise do aterramento, ou seja, será que um aterramento projetado simplesmente para oferecer uma baixa resistência ôhmica é seguro? Uma vez que o comportamento da corrente de descarga tem uma subida rápida (de poucos μs), não seria altamente recomendável o tratamento complexo para a impedância?

Há ainda muitos estudos sobre a impedância de aterramento em AT. É fato que as tensões em AT provocam ionização dos materiais. Isso significa que os campos elétricos, ao atingirem as diversas partes do sistema de aterramento, podem promover o rompimento dos dielétricos em seu caminho. A Figura 3.7 mostra uma onda impulsiva típica de tensão padronizada, utilizada como referência para ensaios de materiais em AT.

3.6.2 A ruptura do concreto

Um fenômeno que causa sempre preocupação aos engenheiros civis e eletricitistas é a possibilidade de descargas atmosféricas em pontos não convencionais, estejam ou não sob a suposta proteção do sistema de aterramento. É uma situação que pode ocorrer em locais onde habitualmente se tem alta atividade cerâmica, normalmente em pontos altos. É comum encontrar descargas sobre edifícios altos nas grandes cidades. Nesses casos, observa-se que as descargas atmosféricas costumam atingir beirais de prédios. As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 refletem essa tendência.

Não há uma regra rígida sobre a forma de incidência do raio em edificações. Há casos em que a descarga contraria muito a previsão mais provável. É o caso,

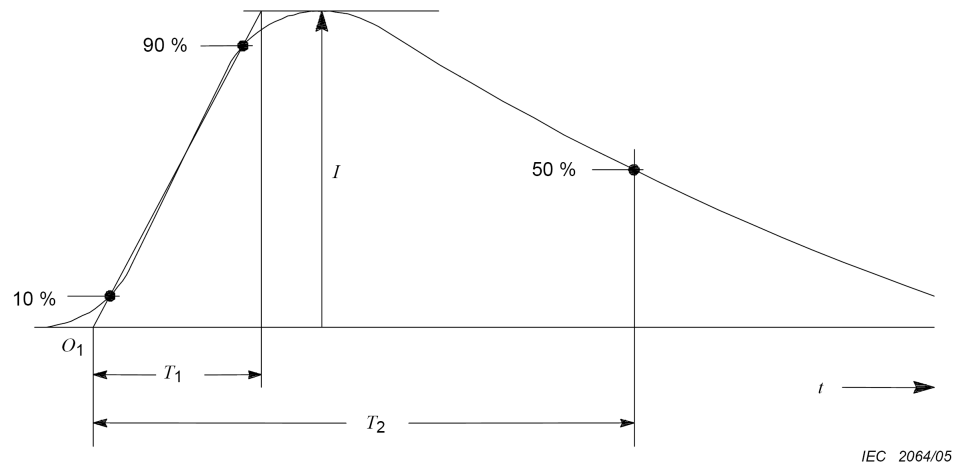


Figura 3.7: Curva padronizada de tensão impulsiva. O_1 - origem virtual; I - valor de pico da corrente; T_1 - tempo de subida; T_2 - tempo compreendido da origem até a metade do valor de pico na descida da onda. Fonte: IEC INTERNATIONAL STANDARD 62305-1, Protection against lightning Part 1: General principles.



Figura 3.8: Beiral atingido por descarga atmosférica. Fonte: (Hartono 2000)

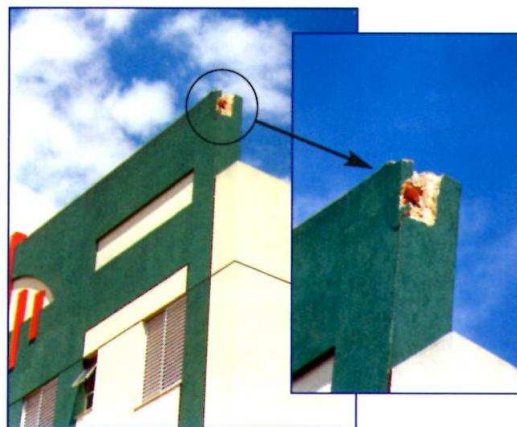


Figura 3.9: O rompimento do concreto deixa exposta a armadura. Fonte: (ALVES, 2006)

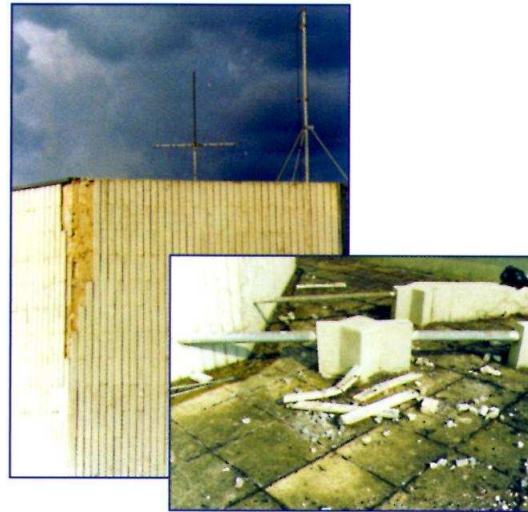


Figura 3.10: Fragmentos caídos de beiral atingido por descarga: perigo para pessoas. Fonte: (ALVES, 2006)

por exemplo, de uma descarga ocorrida na cidade de Londrina, em dezembro de 2009, num bairro da Zona Norte da cidade, próximo da Av. Saul Elkind. Contrariando todas as probabilidades normais, a descarga atingiu a parede lateral de uma residência, num dia de forte chuva, provocando choques elétricos em três membros da família e danos materiais em muitos vizinhos (a descarga se propagou pela rede elétrica de BT), embora felizmente não tenha provocado danos graves às pessoas. O caso é pelo menos improvável: havia esperas (pontas salientes de ferro supostamente aterradas) no muro a três metros da parede atingida pelo raio. A descarga passou por cima da rede elétrica na frente da casa e atingiu uma parede abaixo do nível dos condutores da rede.

Outro caso é o de uma residência em Belo Horizonte, localizada em meio rural, em que a descarga atingiu o telhado da casa e desceu pelas paredes (ALVES, 2006). Neste caso houve infelizmente uma vítima fatal que, no momento da descarga, se encontrava no piso superior, com as mãos apoiadas sobre uma janela de esquadria metálica. A diferença de potencial entre o beiral da janela e o piso provocou sua morte. A edificação não contava com parrairos nem estava equipotencializada. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram detalhes do local.

Como se vê, o caminho preferido pela descarga atmosférica chega a ser bastante imprevisível. Nota-se que a descarga, nos momentos em que sua trajetória é definida, pela ação de campos elétricos, acaba encontrando os pontos onde a impedância é mais baixa, ou seja, os caminhos mais condutivos para chegar aos elementos aterrados (no caso, os vergalhões das armaduras).

Observa-se também que a passagem de corrente atmosférica pelos materiais sólidos pode provocar explosões. O fenômeno é explicado pela presença de umi-



Figura 3.11: Edificação rural atingida por descarga. Fonte: (ALVES, 2006)



Figura 3.12: Detalhes do telhado por onde penetrou a descarga. Fonte: (ALVES, 2006)

dade nos materiais: essa pequena porção de água, ao ser atravessada por correntes intensas, se evapora instantaneamente e provoca uma rápida frente de pressão. Esta é a responsável pela explosão.

Os casos apresentados são uma das objeções colocadas pelos projetistas de estruturas: a descarga pode, eventualmente, provocar a explosão do concreto nos baldrames. Nesse caso, a armadura ficaria fatalmente exposta e o processo de corrosão da armadura seria acelerado. É intenção deste trabalho mostrar que a condição das peças de concreto armado que compõem a fundação favorecem bastante o não rompimento.

3.6.3 Comportamento elétrico do concreto em AT

Segundo (MIRANDA, 2003b), as fundações passaram a ser utilizadas como elementos de aterramento na década de 1960 na Alemanha. Os projetistas constataram que, como as fundações permanecem úmidas no solo, a massa de concreto apresenta uma resistividade semelhante à de um solo de resistividade média a baixa. Segundo a prática americana, atribui-se ao concreto de fundações uma resistividade em torno de $30 \Omega m$. A prática alemã, no entanto, aponta valores entre 120 e $500 \Omega m$.

3.6.3.1 Constante dielétrica do concreto

A relação entre a densidade de fluxo elétrico e a intensidade de campo elétrico define a permissividade absoluta de um dielétrico. A permissividade relativa com relação ao vácuo é também chamada de constante dielétrica. Como já foi discutido anteriormente, a resistividade do concreto é afetada em grande parte pela presença de poros, que oferecem espaços para a penetração de água, por capilaridade, nesses interstícios. Outro fator importante, também vinculado aos materiais, é a chamada constante dielétrica. Esta, que está relacionada à capacidade de suportar tensões elétricas sem rompimento iônico do material, exige também uma análise mais pormenorizada. Antes de entrarmos propriamente nas questões conceituais, é interessante examinar alguns fenômenos típicos de ruptura dielétrica pela ocorrência de descargas atmosféricas.

3.6.3.2 Ionização do concreto em altas frequências

Um fenômeno ligado à ocorrência das descargas atmosféricas é a possível ionização dos materiais. O estudo é conhecido entre os especialistas em aterramentos: a

alta frequência associada às descargas atmosféricas pode provocar descargas parciais nos materiais, ou seja, a forma de onda de uma tensão impulsiva facilita a ruptura dielétrica dos materiais, formando íons que facilitam a passagem de corrente elétrica, diminuindo o valor da impedância do material (KUFFEL; ZAENGL; KUFFEL, 2000). O primeiro trabalho conhecido sobre a ionização de solos em aterramentos é de Towne, de 1929, quando foram realizados alguns experimentos constatando a diminuição da resistência de terra no solo ionizado (TOWNE, 1929).

Para se ter uma idéia de valores de tensão para a ionização do solo, embora os autores diverjam bastante nas faixas apresentadas, serão citados alguns valores típicos: Towne encontrou valores na faixa de 160 a 520 kV/m; Loboda e outros encontraram 560 a 900 kV/m; outros na faixa de 600 a 1850 kV/m. Todos partiram de dados experimentais. O valor adotado pelo CIGRE é de 400 kV/m, embora não dê explicações para essa escolha (JINLIANG, 2005).

O trabalho de (JINLIANG, 2005) observa que a maioria dos valores de tensão de ruptura dielétrica para diferentes tipos de solos, apresenta uma faixa de 300 a 400 kV/m (solos argilosos ou de húmus) até 900 a 1.000 kV/m (solo arenoso), que são valores muito menores que a tensão de ruptura do ar.

Sabe-se que a capacidade disruptiva do material está relacionada à expressão: $E = J\rho$, onde E é o valor do campo elétrico (N/C); J é a densidade de corrente (A/m^2) e ρ a resistividade do material em questão (no caso que nos interessa, o concreto).

É evidente que não só o concreto, mas também o solo está sujeito à ionização dos seus componentes. É um fato experimental que a ionização afeta grandemente a resistividade dos materiais, diminuindo seu valor. Essa redução se explica pela formação de caminhos iônicos nos materiais afetados, exatamente da mesma forma como é produzida a descarga atmosférica no ar úmido entre a nuvem e o solo.

Quanto às impedâncias complexas, é também conhecido o fenômeno simultâneo das três impedâncias: na subida da corrente, especialmente nos instantes iniciais dessa frente de subida, se nota a presença de impedâncias capacitivas. Também a componente indutiva pode aparecer aqui com mais força, uma vez que depende diretamente da frequência. Quanto à resistência (ou à condutância), esta se manifesta, como já foi citado, em valores muito inferiores ao valor DC desde que haja uma suficiente densidade de corrente para a ionização. Ou seja, para baixas intensidades de corrente, não há alteração significativa da resistência (VISACRO; SOARES, 1994).

É conhecido também um fenômeno de AT relacionado à presença de materiais diferentes numa determinada amostra submetida a ensaios de impulso: a presença de poros que, preenchidos com gases ou com líquidos, faz com a ruptura dielétrica do conjunto se dê com mais facilidade. Ou seja, no interior dos poros de um material qualquer é muito maior a probabilidade de uma descarga disruptiva, dando início a uma ionização de todo o conjunto (Kuffel 2000).

4 Metodologia

Neste capítulo serão detalhados os procedimentos utilizados para a obtenção dos dados experimentais. Cabe ressaltar a importância de dirigir os experimentos para CP para valores elevados de teor de umidade, uma vez que essa situação é efetivamente esperada para o concreto utilizado em elementos de fundação.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para os experimentos são baseados principalmente em CP de três tamanhos: CP com dimensões 10x20 cm, CP com dimensões 15x30 cm e CP com dimensões 10x30 cm.

Os primeiros serviram para testes gerais de tensão e corrente em BT, pesagem para levantamento de dados de massa seca e saturada e para ensaios de resistência à compressão; o segundo grupo de CP foi utilizado para levantamento de massa seca e saturada e para ensaios de resistência à compressão; o terceiro grupo foi utilizado para ensaios de massa seca e saturada e para ensaios de tensão e corrente em AT e BT.

Tendo em conta que os experimentos têm a finalidade de avaliar a resistividade elétrica em função do teor de umidade e da relação água/cimento, os principais parâmetros que poderiam gerar variações nos dados foram fixados. Dessa forma, os dados que foram levantados inicialmente para duas relações de água/cimento (1:1:2 e 1:2:3), foram depois fixados somente na relação 1:2:3.

Para os ensaios foi utilizado o cimento Portland CP II E32, comumente utilizado em construção civil, areia média natural quartzosa seca e peneirada, brita de basalto número 1 e água potável.

4.2 Metodologia de ensaio para confecção dos CP em BT

A metodologia de ensaios inicia-se na determinação de procedimentos para elaboração do concreto, de forma a uniformizar a resistência elétrica CP, com a finalidade de obter dados mais confiáveis nas medidas.

Uma observação importante sobre os trabalhos executados em anos anteriores se refere ao modelo básico utilizado, ou seja, CP com dimensões de 10x20 cm, mas com uma haste de ferro no interior do CP, posicionada ao longo do eixo longitudinal, como mostra a Figura 4.1.

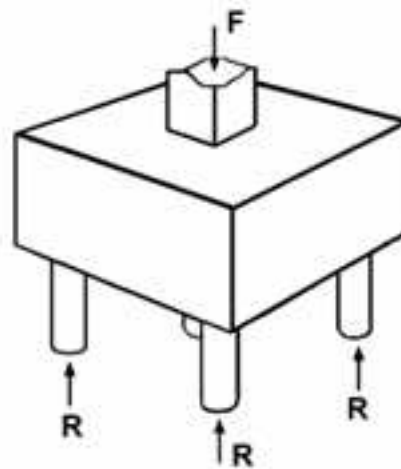


Figura 4.1: Bloco de coroamento montado sobre quatro estacas.

As correntes foram introduzidas pela haste metálica e recolhidas pela lateral do CP, por meio de uma faixa de papel-alumínio, prensada contra as paredes por meio de fita adesiva, sujeitada fortemente contra o papel-alumínio.

Por conveniência de ensaio, foi escolhido para este trabalho o CP tradicional utilizado em laboratório, mas com a aplicação de correntes no sentido longitudinal. No entanto, a configuração utilizada provoca naturalmente uma distribuição não adequada para a corrente, uma vez que a densidade de corrente por unidade de área não é constante ao longo do material, uma vez que a seção aumenta com o afastamento do centro.

Os moldes utilizados em Construção Civil têm a vantagem de serem disponíveis no Laboratório de Materiais, possuem superfícies regulares, sistema de abertura lateral e medidas padronizadas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (10x20 cm), conforme (NBR6936, 1992). Foram utilizados também alguns CP confeccionados em moldes de 15x30 cm, também normalizados, para alguns testes de resistência à compressão.

Para os ensaios de AT, foram utilizados CP com dimensões de 10x30 cm, diferentes dos padrões da (NBR6936, 1992), como já comentado em 3.4.

Para testar de modo mais conclusivo as propriedades dos materiais, foram confeccionados dez CP de 10x20 cm e mais dois CP de 15x30 cm. Dos primeiros, foram levantados os valores de resistência elétrica, massa e teor de umidade para os 10 CP; quatro deles foram escolhidos ao acaso para os ensaios (destrutivos) de resistência à compressão. Os dois CP de 15x30 cm foram utilizados somente para os ensaios de resistência à compressão.

A betoneira utilizada possui capacidade de 100 litros. É um produto comercial da Empresa Engemac, modelo BSK 100, comumente utilizado em obras de pequeno porte de construção civil. A Figura 4.2 mostra uma foto do equipamento. O modelo, no entanto, não é plenamente adequado para laboratório pois a mistura não se processa bem para pequenos volumes de material. Por isso, respeitando suas características, nos ensaios realizados foi utilizada sempre uma quantidade de mistura com pouco mais de 200% do valor da massa necessária para preencher dez CP de 10x20 cm mais dois CP de 15x30 cm.



Figura 4.2: Betoneira utilizada nos ensaios.

A moldagem dos CP foram realizados sempre nos horários entre 10h00 e 12h30 a.m.. Pela importância da confiabilidade dos dados experimentais, foram levantados alguns dados climáticos básicos para evidenciar as condições em que foram realizados os ensaios. Os ensaios de moldagem, momento em que o concreto está mais sensível às condições climáticas, foram realizados nos dias e vinte nove de junho e seis de julho de 2010. Segundo os dados coletados pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) , no dia vinte e nove de junho a temperatura média foi de 16,9° C, com mínima de 12,3° C e máxima de 22,8° C, com umidade relativa de 75,7%. Considerando que a moldagem foi realizada sempre no

horário citado, é razoável considerar que a temperatura estava próxima do valor médio fornecido. No dia seis de julho, também com base nos dados do IAPAR, a temperatura média foi de 18,9° C, com mínima de 11,9° C e máxima de 26,2° C, e umidade relativa de 61,1%. Com esses dados, nota-se que o regime climático foi razoavelmente homogêneo para as três moldagens, com uma umidade relativa não baixa, o que evitou um possível excesso de evaporação da água durante a mistura.

A escolha do traço do concreto foi feita com base nas experiências: em testes anteriores, constatou-se que os traços 1:1:2 e também 1:3:4 não eram adequados para os experimentos, pois com facilidade conduziam a uma mistura não uniforme do concreto. O traço 1:2:3 mostrou-se mais adequado, mas as relações água/cimento não forneceram misturas homogêneas para relações maiores que 0,60. Depois de algumas tentativas, verificou-se que as relações água/cimento de 0,50, 0,53 e 0,56 eram adequadas para trabalho e forneciam uma mistura consistente. A Figura 4.3 mostra um dos testes preliminares, com traço 1:1:2 e relação água/cimento de 0,60. Claramente se nota a segregação da mistura.



Figura 4.3: Mistura de concreto com segregação evidente.

A ordem de colocação dos materiais seguiu a recomendação da (NBR5738, 2003) umedecimento inicial da betoneira; colocação de toda a brita e metade da água; um minuto de mistura na betoneira. A seguir, colocação de todo o cimento e de toda a areia; um minuto de mistura. Colocação da segunda metade da água; dois minutos de mistura.

Observando a dificuldade da massa da mistura conseguir incorporar todos os agregados (uma parte do cimento e da areia tendia sempre a permanecer coladas às paredes), por diversas vezes foi variada a direção do eixo da betoneira, sem interromper o movimento e sem alterar o sentido de rotação. O resultado final

era sempre razoável: não se notava qualquer parte do material não incorporado à mistura.

A inspeção visual da mistura foi sempre essencial. Foram descartadas no início algumas misturas não uniformes. As misturas aceitas possuíam sempre uma consistência razoável, de modo que a brita permanecia dispersa na mistura.

Foi evitado sempre que a mistura fosse despejada da betoneira para proceder ao preenchimento dos moldes. Essa medida tinha a finalidade de evitar o impacto do concreto ao sair da betoneira. Por ter a menor densidade dentre os materiais da mistura, esse impacto poderia favorecer a natural segregação da água.

As amostras foram recolhidas com uma concha apropriada, sempre retirando o material do centro da betoneira, onde se supunha uma homogeneidade maior da mistura, evitando sempre movimentos bruscos no manuseio. O preenchimento dos moldes foi feito em duas camadas.

Foram aplicados um total de 15 golpes de compactação em cada camada. Na primeira destas, a barra de adensamento era utilizada de modo a evitar golpear o fundo do molde. Na segunda camada, a barra penetrava alguns centímetros da camada anterior, conforme previsto na norma (NBR5738, 2003). No final era realizada a regularização da superfície superior.

Os CP, após o término do preenchimento dos moldes, eram deixados em repouso durante 24 horas. Após esse tempo, os CP eram retirados dos moldes e imersos em água com cal durante 28 dias para o processo de cura saturada.

Após esse período, eram medidas as massas dos CP, consideradas como de teor de umidade de 100%, ou seja, saturados.

Os CP eram então submetidos a um processo de secagem em estufa com temperatura controlada em 105° C, durante 24 horas. Depois disso, eram retirados os CP e medidas suas massas, consideradas como “massa seca”, ou seja, com teor de umidade de 0%. Com esses dois valores como referência, eram calculadas as massas de todos os CP para os outros valores desejados de umidade relativa (95%, 90%, 85%, 80%).

Voltando a colocar todos os CP na água, foi depois realizada uma secagem superficial dos CP saturados, procurando posicionar o teor de umidade nos valores escolhidos. Foi constatado, porém, que é bastante difícil interromper o processo de secagem nos valores exatos de teor de umidade. Em alguns casos, foi adicionada água às paredes dos CP. Em poucos segundos, o CP absorvia a água. Com isso, seu peso atingia o valor estipulado de projeto para a umidade desejada. No

entanto, para que a água permeasse todo o CP e não permanecesse somente nas superfícies, era conveniente que os CP permanecessem um tempo em repouso.

4.3 Metodologia de ensaio para confecção dos CP para ensaios em AT

No ano de 2009, durante o processo de moldagem dos CP (SOUZA, 2009), ocorreram problemas nos procedimentos de confecção da mistura do concreto. No entanto, naquele momento, ainda não havia um conhecimento detalhado dos procedimentos para garantir a homogeneidade dos valores de ensaio.

Foram constatados os seguintes problemas:

- a mistura formada com relação a/c no valor de 0,60 estava excessivamente fluida e os CP, embora tenham apresentado um endurecimento normal, apresentavam alta segregação da brita, que provavelmente se acumulava no fundo do CP, o que não é conveniente para os caminhos de corrente, uma vez que deve ter havido estrangulamento de seções;
- a sequência básica foi obedecida na colocação dos materiais, mas houve um tempo de mistura maior que o recomendado: 2 minutos após a colocação do cimento e mais 2 minutos após a colocação da areia. Esse tempo a mais pode ter contribuído para uma incorporação maior de bolhas de ar na mistura;
- o que provavelmente mais prejudicou a não homogeneidade do concreto foi a relativamente pequena quantidade de mistura (considerando a capacidade da betoneira), pois os materiais foram calculados para apresentar somente 10% de sobra.

4.4 Metodologia de ensaio para levantar valores de resistência em BT

O método experimental para obtenção dos valores de resistência em BT pode ser realizado com a ajuda de medidores de tensão e corrente alternadas, em frequência de 60 Hz. A resistência elétrica do CP é calculada pelo quociente V/I . Desprezam-se aqui os componentes reativos da impedância, que são muito baixos. O ensaio é realizado com o auxílio de duas placas metálicas colocadas nas extremidades planas dos CP, como mostra a Figura 4.4. Como a superfície de contato do

concreto possui muitas irregularidades (visíveis a olho nu), o contato elétrico direto das placas metálicas é relativamente ruim. Para melhorar o contato, foi utilizado um gel condutor de baixa resistividade, aplicado normalmente como elemento condutivo em vários tipos de exames médicos (eletrocardiogramas, FES, etc.).

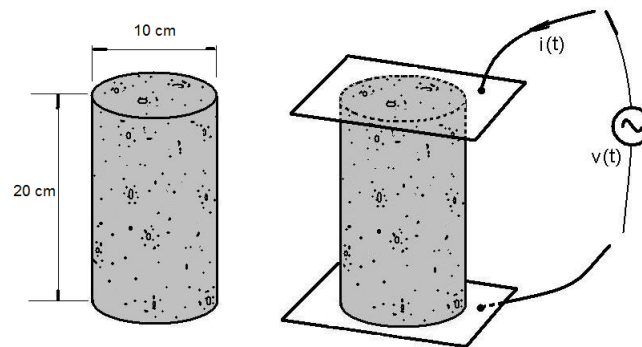


Figura 4.4: Corpo de prova 10x20 cm com placas metálicas paralelas para aplicação de tensão e corrente.

O tamanho das amostras já está fixado pelas dimensões dos CP utilizados normalmente em laboratórios de Construção Civil. Os CP escolhidos possuem dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, como referenciado na Figura 4.4. Como foi comentado anteriormente, a posição das placas e a escolha dos modelos de ensaio foram definidas para que a corrente possa fluir encontrando uma superfície de área de seção constante. Este detalhe é importante, pois o valor da densidade de corrente por unidade de área deve ser o mais homogêneo possível. É relevante destacar esse detalhe. Em experimentos antigos se utilizavam os mesmos moldes, mas com uma haste metálica no centro do cilindro, percorrendo o eixo do CP. Nessa haste se aplicava a corrente de ensaio, que era recolhida na lateral cilíndrica com a ajuda de uma folha de papel-alumínio. A montagem, no entanto, produz uma densidade de corrente não uniforme no CP, uma vez que a área de seção da corrente aumenta à medida que a corrente se afasta da haste.

Como os valores de resistividade elétrica variam com a umidade (NEVILLE, 1997), (MEHTA; MONTEIRO, 1999), há a necessidade de definir valores adequados de umidade para os ensaios. Neste ponto surge uma importante definição para o trabalho: pelo fato de que o estudo é dirigido às aplicações de concreto em elementos de fundações, os valores de umidade utilizados para ensaios devem girar em torno dos valores encontrados no concreto dessas estruturas. A escolha desses valores será comentada oportunamente nos dados experimentais.

Sobre os critérios para definir o teor de umidade a ser utilizado nos ensaios, serão tomados como referências dois valores: o primeiro será a massa do CP

depois de ser submetido ao processo de secagem em estufa por 24 horas; este valor será a referência de massa seca, com teor de umidade assumida de 0%. O outro valor será obtido pela massa do CP depois de estar imerso em água durante o tempo suficiente para atingir a saturação; essa será a referência de saturação para o CP, considerada como o valor máximo de umidade. É importante frisar que o intervalo de dez dias é somente um valor estimado para que a saturação chegue próxima do valor final. Há evidências de que a umidade relativa ainda cresça após esse período. Esse fenômeno será discutido nos resultados experimentais.

Sendo assim, ao citarmos um teor de umidade de, por exemplo, 50%, isso significa que o CP terá uma quantidade de água tal que sua massa será a média aritmética entre o valor seco e o valor saturado. O modo como é tratada a umidade é, portanto, em valores relativos. Parece conveniente explicitar a definição utilizada, uma vez que é comum em Engenharia Civil trabalhar com a umidade de solos com o valor absoluto de água. Ao deparar-se com o valor de 35%, por exemplo, da umidade de um determinado solo, isso significa que 35% da massa considerada é água. No caso dos CP, mesmo no estado de saturação, a umidade absoluta gira em torno de 5%.

4.5 Metodologia de ensaio para levantar valores de resistência em AT

Para os ensaios de AT, realizados no Laboratório do IEE-USP, foram utilizados os CP de medidas 10 cm de diâmetro por 30 cm de altura, descritos anteriormente. Antes de proceder às medições próprias de AT impulsiva, convém obter algumas medidas prévias sobre os valores de impedância e corrente dos CP. Esses valores, medidos com tensões na faixa de poucos kV, devem servir de referência para a calibração dos equipamentos de tensões mais elevadas.

Para se avaliar o valor da impedância para cada corpo de prova, convém que cada amostra seja submetida a vários impulsos de tensão, procurando simular as reais condições de um impulso de descarga atmosférica.

Cada CP preparado para ensaio deve ter uma de suas bases aterradas solidamente por meio de um condutor específico para AT. Com os corpos devidamente preparados para os ensaios pode ser realizada a aplicação dos impulsos de tensão e respectivas medições. O procedimento permite o cálculo das impedâncias de impulso, ou seja, o quociente entre o valor de pico de tensão pelo valor de pico da corrente. Nesse cálculo não é levado em conta, portanto, o atraso entre as

duas formas de onda. Esta impedância também é conhecida como “resistência dinâmica”, e é comumente empregada para descrever o comportamento impulsivo dos aterramentos, (SUETA, 2005).

Os CP preparados para os ensaios de AT foram 24 amostras, divididas em grupos de quatro CP cada uma. Metade delas foi moldada com traço 1:2:3 e outra metade com traço 1:1:2. Cada grupo de quatro CP possuía uma diferente relação a/c, nos valores de 0,50, 0,55 e 0,60.

Foi prevista a aplicação de impulsos de tensão para os 24 blocos, com a finalidade de terminar a resistência dinâmica. Além disso, é conveniente também a aplicação de impulsos em alguns CP com teor de umidade elevado, para observar a variação da impedância em função do teor de umidade. Também é oportuna a verificação do comportamento do concreto em tensões de impulso negativo, para comparar a resposta impulsiva sob corrente inversa.

5 Resultados e discussão

Respeitando a natureza dos fenômenos, os resultados são apresentados com a divisão básica entre ensaios em AT e ensaios em BT. Considerando que os CP utilizados em AT eram mais antigos e apresentavam maior variabilidade nos valores medidos, os CP destinados a ensaios de BT foram refeitos e produzidos com maior rigor metodológico. Por esse fato, os CP utilizados para BT foram submetidos a um tratamento experimental mais extenso.

Basicamente, os CP em AT são apresentados com a finalidade de avaliar as medidas de impedância para ensaios de tensão impulsiva. Já os CP utilizados em BT são utilizados para fornecer medidas de massa seca, massa úmida saturada e resistência à compressão. Além disso, foram observadas as impedâncias em tensões AC com a variação do teor de umidade e a variação da relação água/cimento.

Também foram levantados alguns valores do teor de umidade para CP enterrados em solo natural, com a finalidade de obter parâmetros de análise para avaliar o real teor de umidade de elementos de fundações.

5.1 Valores de impedância em AT

Como foi descrito no Capítulo sobre Metodologia, no item referente aos ensaios de AT, foi realizada uma medição preliminar que serviu como uma amostra para a calibração dos equipamentos de tensão impulsiva. Essa medição consistiu em testes com um medidor de resistência de isolamento, Megger, gerando uma tensão de aproximadamente 2500V DC, com a finalidade de levantar a resistência ôhmica do corpo de concreto. O primeiro resultado apontou para uma resistência do corpo de prova da ordem de alguns M Ω . Com a utilização de gel condutor, no entanto, a resistência caiu para algumas centenas de k Ω , comprovando a eficiência do gel também para AT, uma vez que já era conhecida sua utilidade em BT. Portanto, para todos os resultados apresentados foi utilizado o gel condutor para uniformizar a superfície do concreto e melhorar o contato entre os eletrodos e o corpo de prova.

Os testes preliminares apontaram, portanto, mesmo com uso do gel, para uma resistência relativamente elevada do concreto aos impulsos de corrente.

Os ensaios de AT foram realizados nos laboratórios de alta tensão do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. Foram escolhidos impulsos com polaridade positiva, com níveis de tensão de pico de onda da ordem de 10, 20, 50, 70 e 100 kV, e forma de onda com um tempo de frente de $1 \mu s$ e um tempo de cauda de $57 \mu s$. O gráfico 5.1 ilustra a condição de aplicação das tensões, com uma tensão de pico em torno de 14 kV.

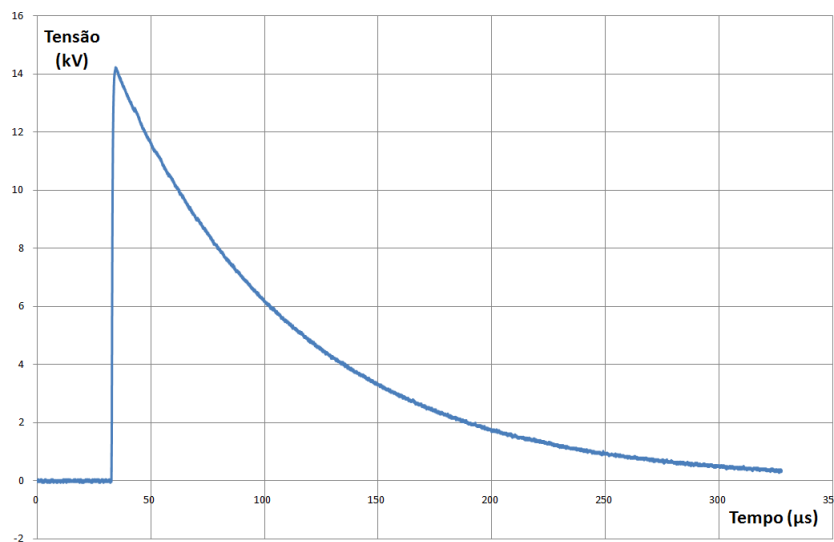


Figura 5.1: Gráfico com forma típica de tensão impulsiva com pico de 14kV

Depois de medir os valores de tensão e corrente para os 24 blocos, foram mergulhados três CP (1B, 1D e 6D) em água durante aproximadamente 24 horas. Os CP 1B e 1D foram então submetidos aos mesmos valores de AT impulsiva do dia anterior; o CP 6-D foi submetido ao mesmo regime de tensões, mas com polaridade negativa.

O equipamento de AT utilizado oferece a possibilidade de aplicação de impulsos de AT simulando descargas atmosféricas, conforme descrito no Capítulo de Metodologia, com o registro simultâneo da curva de tensão e de corrente sobre cada CP. São coletados, para cada disparo de tensão, três colunas de 16.384 valores cada, para tensão, corrente e instante de tempo.

Aplicando os níveis descritos de tensões, foi levantada a seguinte tabela de valores de resistência dinâmica, já apresentada anteriormente no Capítulo de Fundamentos Teóricos para comentar a grande variabilidade dos dados, aqui repetida para facilitar a visualização. A Tabela 5.1 é agora complementada com os ensaios de impulso para CP úmidos e tensão de impulso negativa. Os valores apresentados são o resultado do valor máximo da tensão impulsiva dividida pelo valor máximo

Tabela 5.1: Valores de resistência dinâmica em Ω , para CP 10x30 cm, traço 1:2:3 (amostras 1 e 3) e traço 1:1:2 (amostras 4 e 6), sob tensão impulsiva.

Amostra	10kV	20kV	50kV	70kV	100kV	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação %
1A	17.630	17.582	18.268	16.448	16.424	17.270	808	5
1B	17.446	20.831	23.424	24.187	20.044	21.186	2.713	13
1C	18.054	23.888	23.982	25.504	23.097	22.905	2.848	12
1D	22.900	32.444	25.477	34.231	35.344	30.079	5.551	18
3A	28.332	29.667	30.650	41.658	26.794	31.420	5.904	19
3B	26.672	32.662	37.198	41.421	58.042	39.199	11.871	30
3C	32.701	23.761	33.202	41.460	58.082	37.841	12.932	34
3D	23.095	26.869	34.064	41.479	39.818	33.065	7.987	24
4A	20.710	33.025	33.301	45.443	—	33.120	10.098	30
4B	20.473	39.443	38.746	41.277	32.621	34.512	8.495	25
4C	19.237	43.588	42.003	42.125	45.112	38.413	10.794	28
4D	31.528	37.133	53.215	55.714	51.191	45.756	10.737	23
6A	35.485	30.847	41.508	52.314	—	40.038	9.275	23
6B	32.338	31.011	53.370	56.356	45.982	43.811	11.715	27
6C	52.242	53.560	54.094	61.040	—	55.234	3.948	7
6D	46.016	47.535	61.443	38.779	53.292	49.413	8.484	17
Média	26.720	32.740	37.746	41.216	38.907			
1B úmido	3.546	3.487	3.477	3.498	—	3.502	31	0,9
1D úmido	3.194	3.172	3.141	3.150	—	3.164	24	0,7
6D seco	73.540	37.421	61.400	60.339	35.269	5.3594	16.595	31,0
pol.neg.								

da corrente, ou seja, os valores da resistência dinâmica já definidos anteriormente.

5.1.1 Valores de resistividade para CP úmidos

Os valores de resistividade para os CP 1B e 1D mostrados na Tabela 5.1 se referem às amostras que haviam sido imersas em água por 24 horas. Calculando a resistência dinâmica em AT, esses CP mostraram um valor médio de $92 \Omega m$ para o CP 1B e $83 \Omega m$ para o CP 1D. Sabe-se que os dois CP citados possuíam alto teor de umidade, embora o valor exato não tenha sido levantado. De nenhum modo esse teor deve ser considerado como 100% (saturado), embora nos ensaios de Construção Civil se padronize como valor saturado o estado do CP que, após seco em estufa, é imerso em água por vinte e quatro horas. No caso apresentado, o CP não estava seco, mas com umidade absorvida naturalmente do ar ambiente por vários dias e depois imerso 24 horas em água. Como será mostrado no item 5.2, a saturação completa do CP demora vários dias para ocorrer, ou seja, a incorporação completa de água demora a ser atingida e os CP tomados como úmidos na análise em questão com certeza não possuem teor de umidade de

100%.

É importante dizer que a (NBR5419, 2005) considera solos de baixa resistividade aqueles que apresentam valores até $100 \Omega m$. Esse ensaio foi uma primeira confirmação dos baixos valores de resistividade esperados para CP próximos da saturação.

5.1.2 Análise geral de AT: valores encontrados

Reexaminando os valores de massa seca e massa úmida dos CP levados a testes em AT, constatou-se que os grupos de CP das amostras de número 2 e de número 5 continham valores que não eram coerentes no que se refere aos valores de massa seca e massa úmida saturada, provavelmente devido a alguma alteração experimental. Por esse motivo foram descartados da Tabela e das análises posteriores. Esta exclusão das amostras só se refere, portanto, aos CP 10x30 cm e não aos CP 10x20 cm utilizados nos ensaios de BT.

Os valores faltantes na faixa de 100 kV para os CP 4A seco, 6A seco, 6C seco, 1B úmido e 1D úmido, se referem a ensaios onde a tensão impulsiva abriu caminho pela superfície externa do CP, impedindo a medida da corrente pela massa real de concreto.

Dos valores apresentados pode-se afirmar que:

- As impedâncias calculadas para os CP úmidos são bastante menores. Dos valores disponíveis, no CP 1B, a relação entre as impedâncias médias para CP úmido/CP seco é de 6,05, ou seja, a impedância para CP seco é mais de seis vezes maior. No caso do CP 1D, a impedância para CP seco é quase 10 vezes maior (9,5 vezes) que o valor úmido.
- Os valores de impedância para os CP secos mostram uma variabilidade notoriamente elevada quando comparados aos valores de amostras úmidas, bastando analisar os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.
- Como foi comentado, os CP 1B e 1D não estavam plenamente saturados. Isso significa que as impedâncias dos CP poderiam cair ainda mais com um teor de umidade maior, acentuando mais a diferença de impedâncias entre o concreto seco e o saturado. Esse comportamento será observado nos ensaios de BT.

A título de exemplo, são apresentados os gráficos 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 obtidos com os ensaios impulsivos, com CP 1B, com baixo teor de umidade, sob

tensões impulsivas em torno de 70 kV, tomados das séries de dados número 017 (tensão) e 018 (corrente):

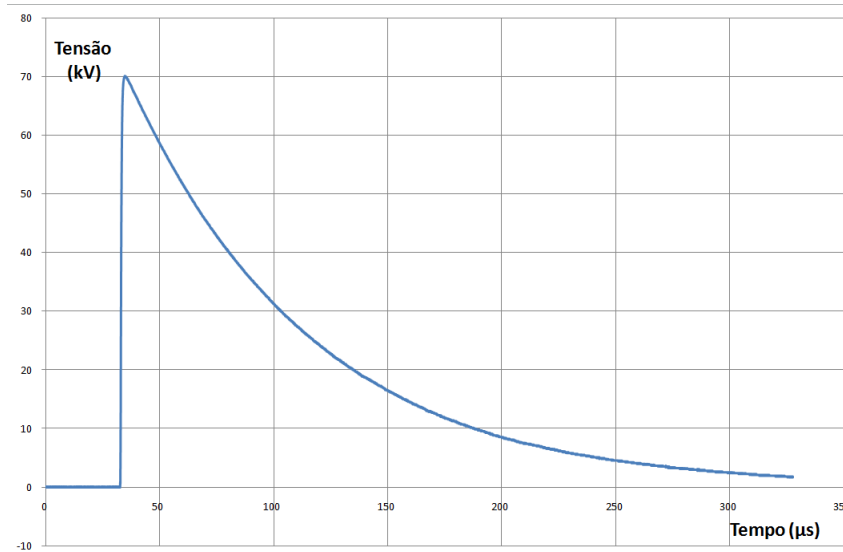


Figura 5.2: Gráfico de tensão impulsiva aplicada sobre CP com baixo teor de umidade, com pico em torno de 70 kV.

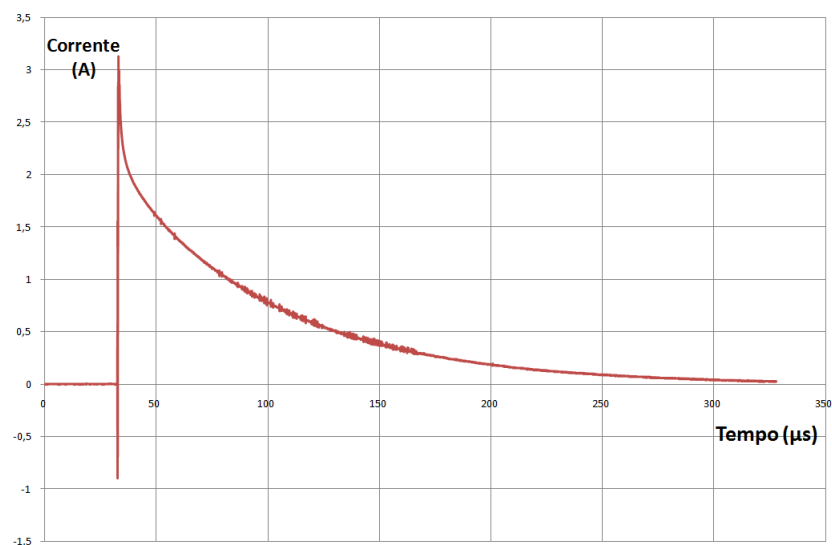


Figura 5.3: Gráfico de corrente em CP com baixo teor de umidade, sob tensão impulsiva de 70 kV.

Para ilustrar o contraste com CP secos, são apresentados os gráficos 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 obtidos com os ensaios impulsivos, com CP 1B, com alto teor de umidade, sob tensões impulsivas de 70 kV, tomados das séries de dados número 235 (tensão) e 236 (corrente):

Foram realizados também alguns ensaios com tensão impulsiva negativa. Para tal aplicação, foi utilizado o CP de número 6D, com baixo teor de umidade. As Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 mostram o comportamento das curvas de tensão e corrente, sob tensões impulsivas negativas de 70 kV, tomados das

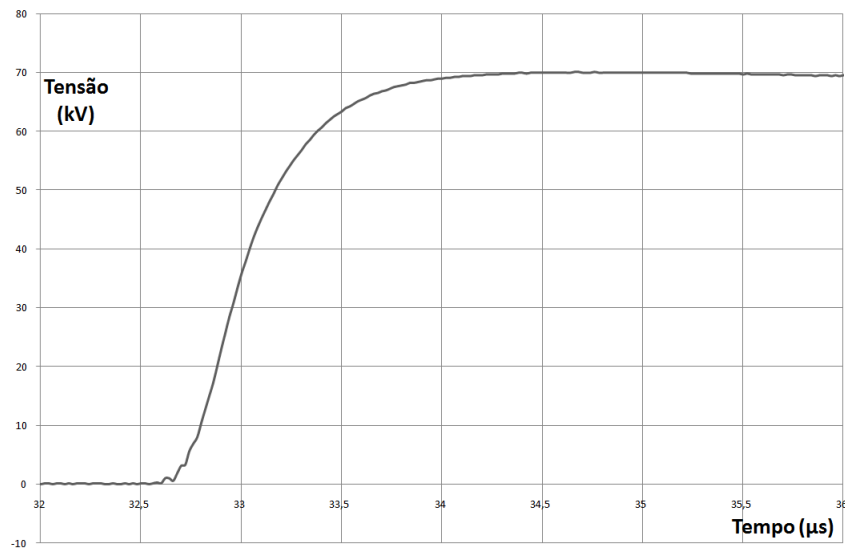


Figura 5.4: Gráfico com detalhe da subida de tensão impulsiva em CP com baixo teor de umidade.

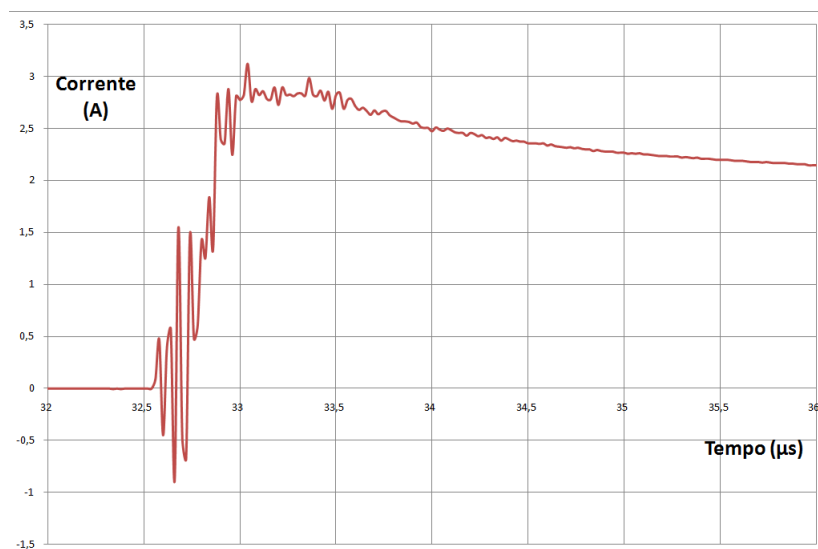


Figura 5.5: Gráfico com detalhe da subida da corrente impulsiva em CP com baixo teor de umidade.

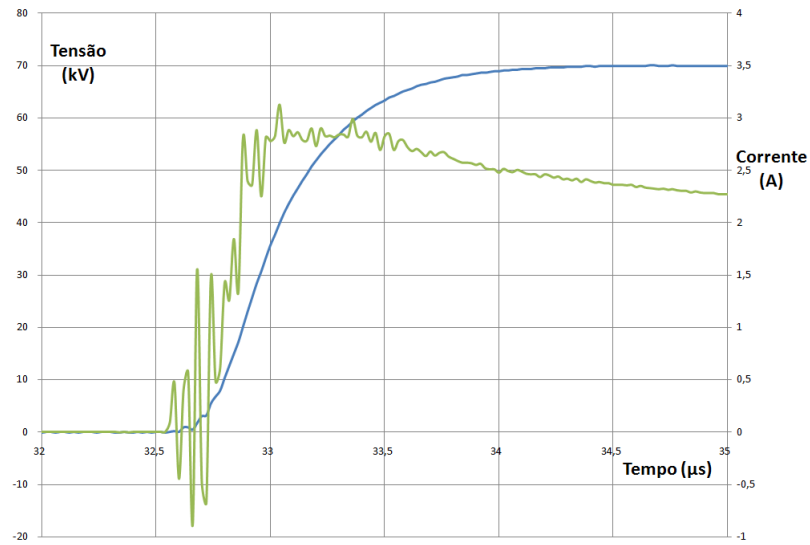


Figura 5.6: Gráfico da tensão e corrente, comparando formas de onda sobre CP com baixo teor de umidade.

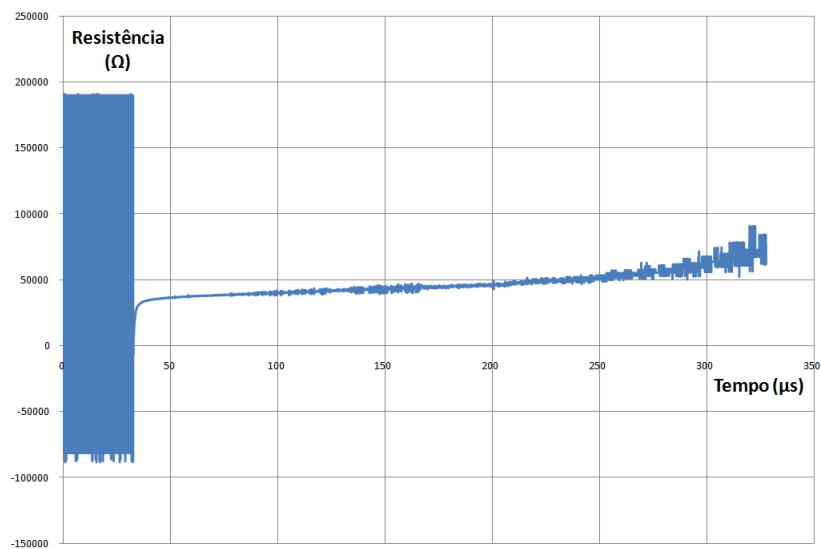


Figura 5.7: Gráfico da impedância em ohms sob tensão impulsiva para CP com baixo teor de umidade.

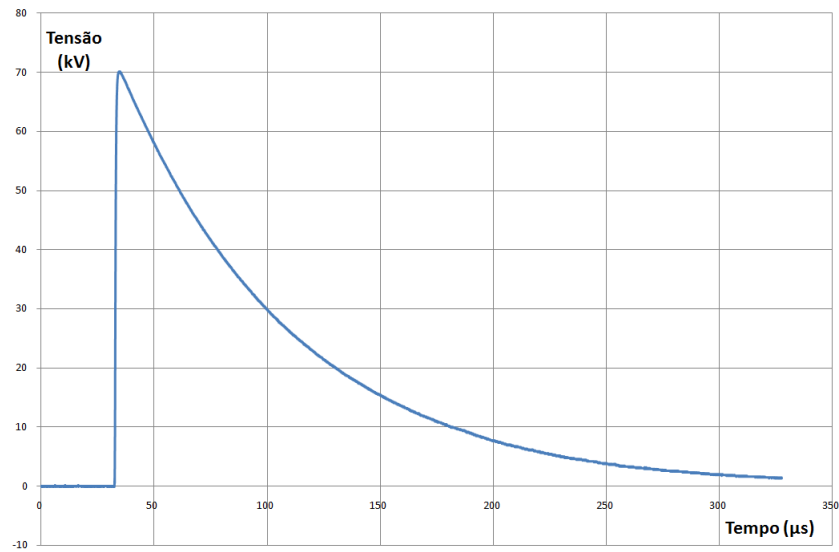


Figura 5.8: Gráfico de tensão impulsiva aplicada em CP com alto teor de umidade, com pico em torno de 70 kV.

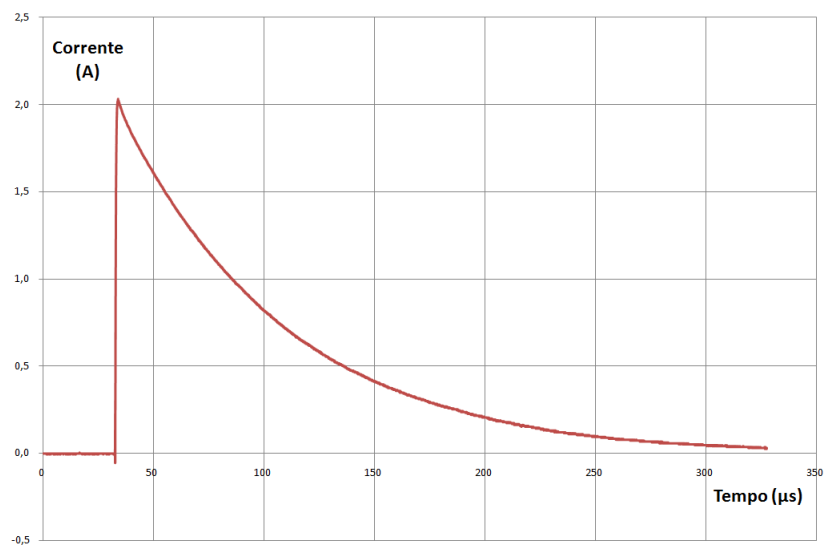


Figura 5.9: Gráfico de corrente impulsiva em CP com alto teor de umidade, sob tensão impulsiva de 70 kV.

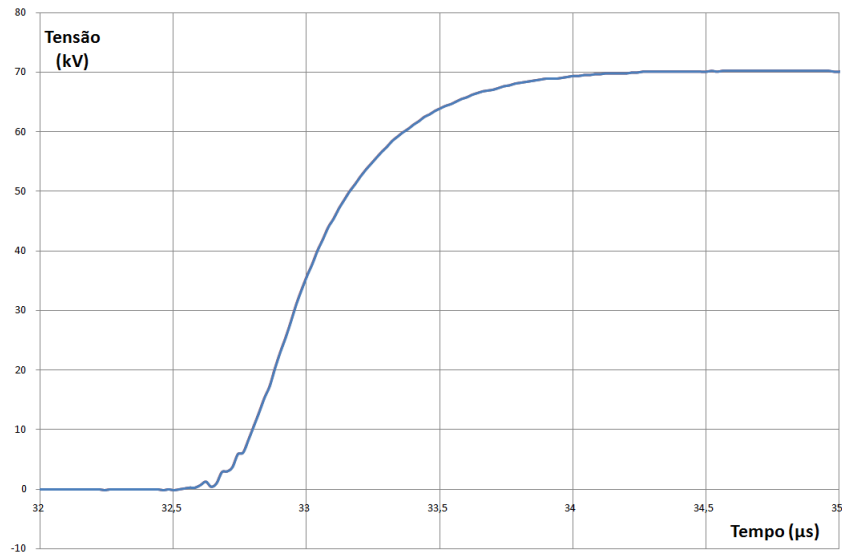


Figura 5.10: Gráfico com detalhe da subida de tensão impulsiva em CP com alto teor de umidade.

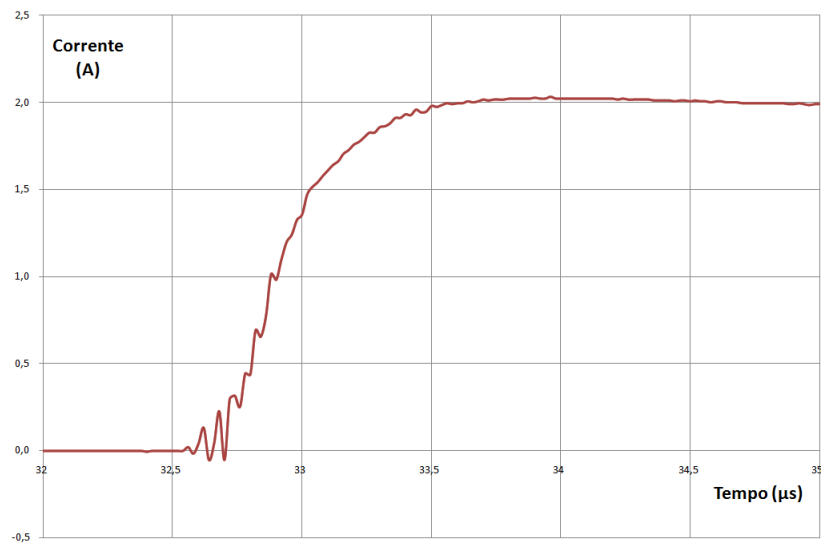


Figura 5.11: Gráfico com detalhe da subida da corrente impulsiva em CP com alto teor de umidade.

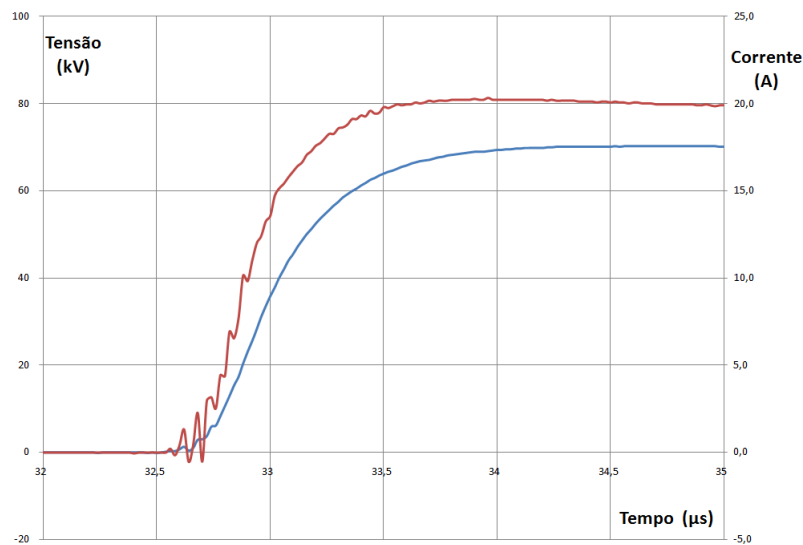


Figura 5.12: Gráfico da tensão e corrente em CP com alto teor de umidade, comparando formas de onda.

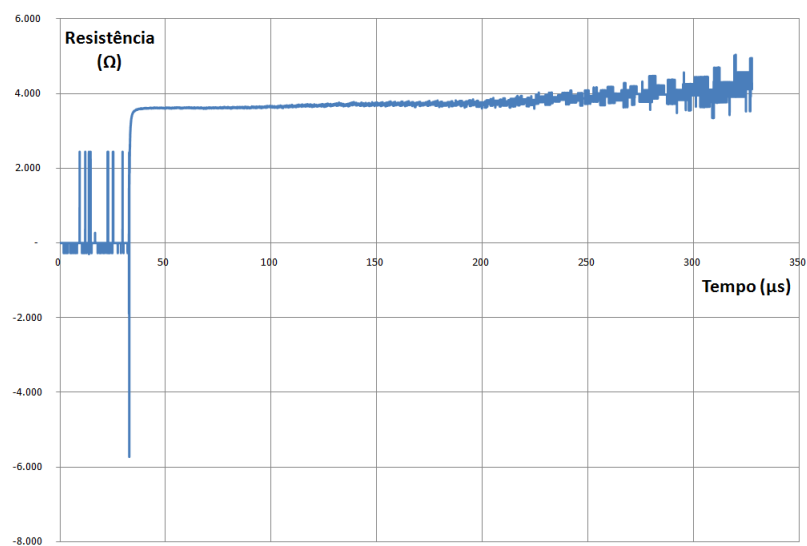


Figura 5.13: Gráfico da impedância em ohms sob tensão impulsiva para CP com alto teor de umidade.

séries de dados número 245 (tensão) e 246 (corrente).

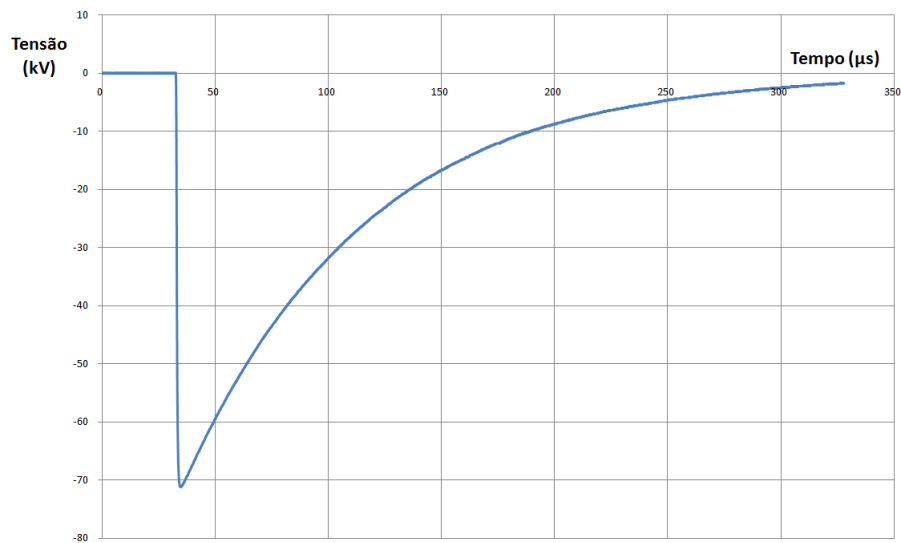


Figura 5.14: Gráfico de tensão impulsiva negativa aplicada em CP com baixo teor de umidade, com pico em torno de 70 kV.

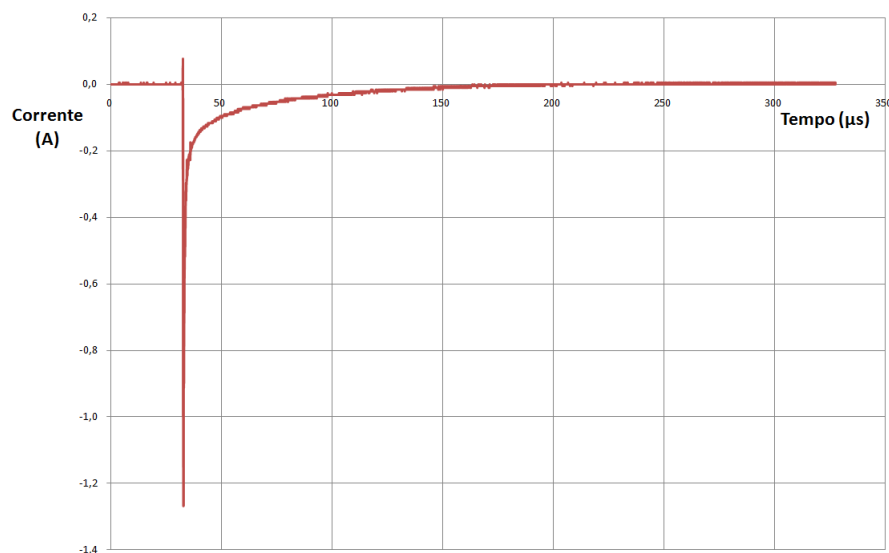


Figura 5.15: Gráfico de corrente impulsiva em CP com baixo teor de umidade, sob tensão impulsiva de 70 kV.

Cabem aqui diversas considerações:

- Os sinais de alta frequência para a tensão e especialmente para a corrente que aparecem no início do disparo são ruídos presentes no sistema, provenientes de interferências magnéticas devidas principalmente ao disparo da fonte. Alguns ruídos aparecem também antes do disparo. Não há nenhum fenômeno elétrico próprio do circuito em estudo que leve a corrente a assumir sinal negativo. Portanto, os valores de correntes negativas observadas são também provenientes dessas interferências.

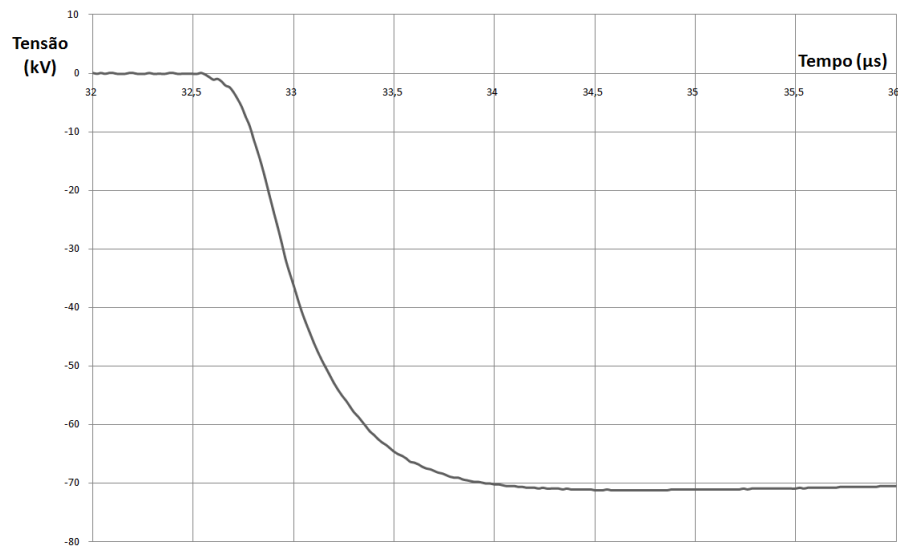


Figura 5.16: Gráfico com detalhe da variação de tensão impulsiva negativa em CP com baixo teor de umidade.

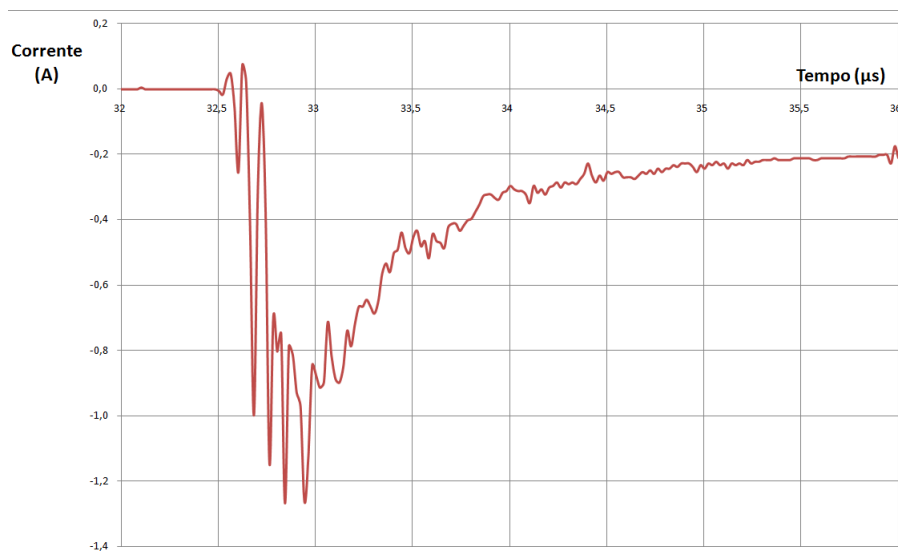


Figura 5.17: Gráfico com detalhe da variação da corrente impulsiva em CP com baixo teor de umidade.

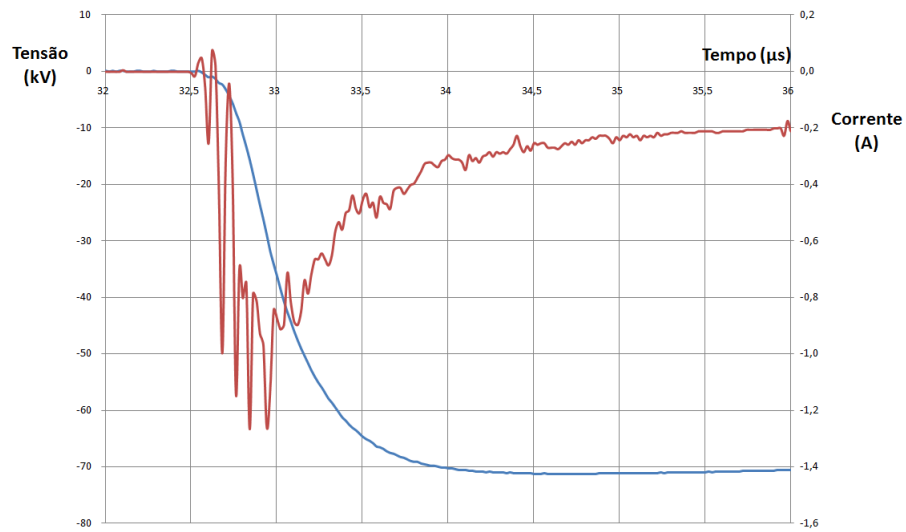


Figura 5.18: Gráfico da tensão impulsiva negativa e corrente em CP com baixo teor de umidade, comparando formas de onda.

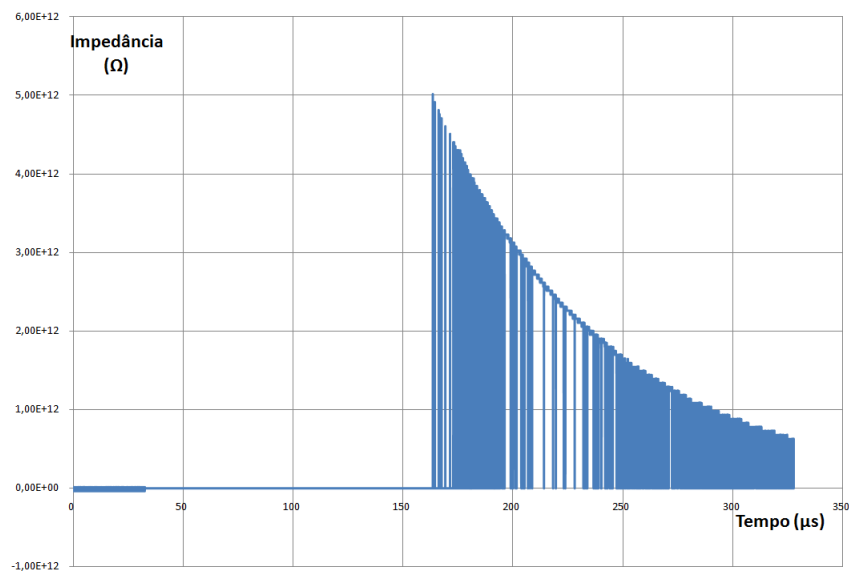


Figura 5.19: Gráfico da impedância impulsiva para impulso negativo sobre CP com baixo teor de umidade.

- É possível reconhecer um comportamento resistivo para a corrente nos ensaios de CP úmidos e um comportamento de característica capacitiva para os CP secos. Para que se possa interpretar as curvas é necessário recorrer a um modelo básico de circuito. Observando o modo como foi realizada a montagem do ensaio, pode-se considerar o circuito como uma reatância capacitiva em paralelo com um resistor. No caso do CP seco, a impedância resistiva é alta e a corrente assume característica capacitiva, pois esta é predominante. No caso de CP úmido, a impedância resistiva é baixa e a corrente resistiva predomina.
- As capacitâncias observadas nos ensaios são devidas ao arranjo físico dos eletrodos (duas placas metálicas, uma em cada extremidade do CP), ao tamanho dos eletrodos e ao valor da constante dielétrica do concreto.
- Comparando os valores de impedância em AT para o CP 1B, a resistência dinâmica do CP úmido é de 3.498Ω . O valor para CP seco é de 24.187Ω . Os dois valores aparecem na Tabela 5.1.
- Observando as curvas mostradas na Figura 5.6, para CP seco, é possível perceber uma componente capacitiva na corrente, uma vez que seu decaimento se inicia em torno de $0,8 \mu s$ antes do decaimento da tensão.
- Observando agora o comportamento das curvas de tensão e corrente na Figura 5.12, referentes ao CP 1B úmido, percebe-se que a característica é muito próxima de uma carga resistiva, uma vez que a curva de corrente parece acompanhar a curva de tensão. Olhando com mais cuidado, no entanto, percebe-se um adiantamento da corrente em relação à tensão. Comparando os máximos, a diferença também se situa em torno de $0,8 \mu s$. A aparência resistiva das curvas em CP úmidos é favorecida pelo nível de corrente: no caso citado, a corrente de pico atinge mais de 20 A no CP úmido, enquanto que no seco não chega a 3 A na inflexão da curva. A componente capacitiva neste caso, portanto, aparece com mais realce.
- A leitura mais exata dos tempos de defasagem exigiria um estudo estatístico mais elaborado, com a filtragem das interferências, que permitiria o cálculo das constantes de tempo e das impedâncias. No caso desta Dissertação, por não ser objetivo do trabalho, não foi realizado.
- As curvas de impedância mostram um comportamento variável ao longo do tempo. Para o CP 1B seco, a impedância se estabiliza no decaimento da curva num valor próximo de $45 \text{ k}\Omega$. Para o CP 1B úmido, a impedância se

Tabela 5.2: Médias de valores de impedância em Ω , para CP 10x30 cm, traço 1:2:3 (amostras 1 e 3) e traço 1:1:2 (amostras 4 e 6), sob tensão impulsiva AT (resistência dinâmica) e sob tensão alternada BT.

CP	Médias AT	Médias BT
1A	17.270	25.440
1B	21.186	38.667
1C	22.905	52.002
1D	30.079	95.963
Médias	22.860	53.018
3A	31.420	93.415
3B	39.199	120.564
3C	37.840	87.595
3D	33.065	70.480
Médias	35.381	93.013
4A	33.120	54.753
4B	34.512	131.561
4C	38.413	214.547
4D	45.756	550.580
Médias	37.950	237.860
6A	38.250	630.351
6B	43.000	194.072
6C	55.234	592.503
6D	48.183	732.520
Médias	46.167	537.362

situa em torno de 3.500Ω . Para a tensão de impulso negativo, a impedância oscila entre $100 \text{ k}\Omega$ e $1 \text{ M}\Omega$, até que seu valor sobe a $5 \text{ E}+12 \Omega$ quando próximo de $160 \mu\text{s}$. As variações da impedância em AT são um fenômeno complexo e têm relação com as descargas parciais no material sólido. Nesta Dissertação não se fará uma análise detalhada desse processo.

Uma questão que poderia ser levantada se refere aos valores de impedância, ou seja, se os ensaios de AT e de BT não entrariam em fenômenos essencialmente diferentes e se há fundamento experimental em querer deduzir propriedades do concreto em tensão AT impulsiva quando a maioria dos resultados que serão mostrados a seguir são apresentados em BT, sob AC.

Para comparar as impedâncias em AT e BT, é apresentada a Tabela 5.2. Os valores foram levantados com base nos mesmos CP de concreto.

Como se pode observar, há uma diferença grande entre os valores de impedâncias em AT e BT. É importante recordar que os valores apresentados na Tabela 5.2 foram todos levantados para CP secos. Resta saber se a comparação entre os dados de AT e BT seriam mais próximos para CP com alto teor de umidade. No momento não há dados disponíveis para responder a essa questão.

5.2 Um teste: enterrando CP para determinar o valor de umidade

Como comentado anteriormente, toda a análise deste trabalho está voltada para o concreto de fundações. Por isso, importa muito conhecer o valor de umidade típico para essas estruturas em condições normais de uso. Com essa finalidade, foi realizado o seguinte teste:

- Dois CP com dimensões de 10 cm de diâmetro e 30 cm de altura, traço 1:2:3, com relação a/c de 0,60, foram recolhidos de experiências anteriores. Os CP estavam guardados em local seco e coberto. Trata-se de CP utilizados anteriormente em ensaios de AT, com dimensões não normalizadas.
- Os dois CP foram então enterrados a aproximadamente 50 cm de profundidade, em solo próximo do Laboratório de Materiais da UEL e deixados, em posição horizontal, separados um do outro por aproximadamente cinco centímetros. O local está distante das edificações (em torno de 8 metros) e exposto permanentemente ao sol. Os CP permaneceram 43 dias enterrados, de 5 de julho a 17 de agosto de 2010. Nesse período houve o seguinte regime de chuvas: entre os dias 12 a 16 de julho, houve um subtotal de chuvas de 33,1 mm; entre os dias 2 e 5 de agosto, houve um subtotal de chuvas de 30,4 mm. Ou seja, houve um período seco entre os dias 6 e 17 de agosto. Sabe-se ainda que a média das temperaturas máximas alcançadas durante o dia nesse período de 11 dias foi de quase 24° C (ver Anexos IAPAR).
- Os CP foram então retirados e receberam um trabalho rápido de limpeza da terra aderida às paredes, de forma que sua massa não ficasse alterada por esse material. Imediatamente foram medidas as massas dos CP.
- Os CP foram então secados em estufa por 24 horas. Novamente suas massas foram medidas.
- Em seguida, os dois CP foram mergulhados em água por 24 horas para a determinação de sua massa saturada. Obviamente era esperado que as massas estivessem num valor superior às leituras realizadas quando foram retiradas da terra, supondo que agora a saturação tivesse sido atingida. No entanto, ao constatar que as massas estavam com valores inferiores aos dos CP enterrados, foram devolvidos à água para observação. Comprovou-se que a saturação completa só ocorreu em torno de 12 dias mais tarde, fornecendo a Tabela ??.

Tabela 5.3: Valores de massa e teores de umidade

CP	Massa com umidade da terra (kg)	Massa de corpo seco (kg)	Massa de corpo saturado (kg)	Teor de umidade (%)
1	5,86	5,50	5,90	90
2	5,68	5,24	5,72	92

Como se pode notar, por meio dessa experiência relativamente simples foi possível comprovar um índice elevado de umidade para os CP que permaneceram enterrados, mesmo com um período seco de 11 dias antes da retirada. Nota-se que o concreto, ao absorver umidade, tarda muito em perdê-la.

Este experimento orientou todos os dados que foram levantados a seguir. É razoável supor que se os CP tivessem sido enterrados junto às paredes das edificações, o teor de umidade seria ainda maior e, presumivelmente, mais próxima da umidade real encontrada em baldrame. De qualquer forma, para medir os valores de resistência dos CP foram utilizados os valores de teor de umidade em torno de 90%. Para tanto, foram escolhidos os valores de 85, 90, 95 e 100% para os teores de umidade.

Para ter uma medida mais precisa do tempo necessário para a saturação das amostras foi realizado ainda o seguinte experimento:

- Foram tomados seis CP, dois de cada relação água/cimento, de forma aleatória, e colocados em estufa a 105°C por vinte e quatro horas.
- As massas dos seis CP foram medidas ao retirá-los da estufa e, em seguida, imersas em água.
- Durante quinze dias, os CP eram retirados da água e secados ligeiramente somente na superfície externa com um pano. Eram então medidas as massas dos seis CP e devolvidos à água.
- A curva da massa média dos CP, indicando a absorção média de água aparece na Figura 5.20. Os dados apresentados são valores médios dos seis corpos de prova:

Como se pode notar, depois de quinze dias a massa dos CP se estabilizou, mostrando com isso que o concreto interrompeu o processo de absorção, indicando a saturação completa dos CP.

A partir dos resultados obtidos foi possível estabelecer uma distinção importante: sempre que se fizer referência ao valor de massa saturada, tal valor será

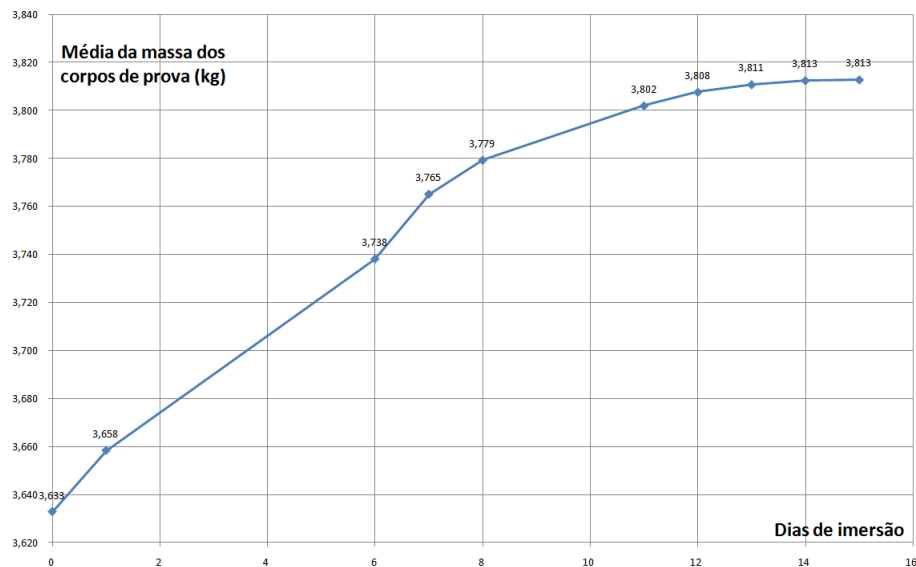


Figura 5.20: Curva da massa média dos CP imersos em água.

aquele obtido por imersão em água por pelo menos quinze dias. Como havia sido comentado, a massa saturada utilizada nos ensaios de Engenharia Civil se refere à imersão do corpo seco em água por somente vinte e quatro horas.

5.3 Levantamento dos valores de massa seca e saturada

Os valores levantados de massa seca e saturada em kg para os CP com relação $a/c = 0,50$ aparecem na Tabela 5.4.

Os valores levantados de massa seca e saturada em kg para os CP com relação $a/c = 0,53$ aparecem na Tabela 5.5.

Os valores levantados de massa seca e saturada em kg para os CP com relação $a/c = 0,56$ aparecem na Tabela 5.6.

Como se pode observar, os valores de massa seca e de massa saturada estão proporcionalmente bastante próximos entre as amostras. O coeficiente de variação nas três tabelas não chega a 2%. A absorção de água não é, no entanto, tão uniforme: no caso dos CP de 10x20 cm, os coeficientes de variação se situam em torno de 15%. Essas variações, no entanto, são valores aceitáveis para ensaios de concreto.

Dentro dos ensaios do concreto, a Tabela 5.7 mostra os valores de resistência à compressão levantados para três grupos de CP: o primeiro grupo com relação água/cimento de 0,50, o segundo com relação 0,53 e o terceiro com relação 0,56. Cada um dos grupos é composto por 6 CP: quatro deles com dimensões 10x20 cm

Tabela 5.4: Valores medidos de massa seca e massa saturada, com quantidade de água absorvida e teor de umidade para CP de 10x20 cm e 15x30 cm, com relação a/c = 50%.

CP 10x20	Massa úmida saturada(kg)	Massa de corpo seco(kg)	Massa de água(kg)
1	4,010	3,820	0,190
2	3,990	3,740	0,250
3	4,000	3,780	0,220
4	4,010	3,820	0,190
5	3,970	3,720	0,250
6	4,000	3,820	0,180
7	4,000	3,790	0,210
8	4,000	3,750	0,250
9	3,980	3,800	0,180
10	3,980	3,790	0,190
Média	3,994	3,783	0,211
Desv.Padr.	0,013	0,036	0,030
Coef.Var.	0,32	0,94	14,03
CP 10x30	Massa úmida saturada(kg)	Massa de corpo seco(kg)	Massa de água(kg)
11	13,340	12,810	0,530
12	13,260	12,640	0,620
Média	13,300	12,725	0,575
Desv.padr.	0,057	0,120	0,064
Coef.Var.	0,43	0,94	11,07

Tabela 5.5: Valores medidos de massa seca e massa saturada, com quantidade de água absorvida e teor de umidade para CP de 10x20 cm e 15x30 cm, com relação a/c = 53%.

CP 10x20	Massa úmida saturada(kg)	Massa de corpo seco(kg)	Massa de água(kg)
1	3,980	3,740	0,240
2	3,880	3,590	0,290
3	3,970	3,750	0,220
4	3,900	3,600	0,300
5	3,880	3,650	0,230
6	3,980	3,690	0,290
7	3,960	3,720	0,240
8	3,940	3,710	0,230
9	4,030	3,730	0,300
10	3,980	3,750	0,230
Média	3,950	3,693	0,257
Desv.padr.	0,047	0,060	0,033
Coef.Var.	1,19	1,62	12,98
CP 10x30	Massa úmida saturada(kg)	Massa de corpo seco(kg)	Massa de água(kg)
11	12,960	12,190	0,770
12	13,030	12,310	0,720
Média	12,995	12,250	0,745
Desv.padr.	0,049	0,085	0,035
Coef.Var.	0,38	0,69	4,75

Tabela 5.6: Valores medidos de massa seca e massa saturada, com quantidade de água absorvida e teor de umidade para CP de 10x20 cm e 15x30 cm, com relação a/c = 56%.

CP 10x20	Massa úmida saturada(kg)	Massa de corpo seco(kg)	Massa de água(kg)
1	3,830	3,650	0,180
2	3,880	3,670	0,210
4	3,830	3,560	0,270
5	3,860	3,670	0,190
6	3,900	3,700	0,200
7	3,830	3,610	0,220
8	3,760	3,590	0,170
9	3,890	3,690	0,200
10	3,890	3,620	0,270
11	3,830	3,550	0,280
Média	3,850	3,631	0,219
Desv.padr.	0,040	0,053	0,040
Coef.Var.	1,05	1,47	18,32
CP 10x30	Massa úmida saturada(kg)	Massa de corpo seco(kg)	Massa de água(kg)
11	12,760	12,160	0,600
12	12,520	11,860	0,660
Média	12,640	12,010	0,630
Desv.Padr.	0,170	0,212	0,042
Coef.Var.	1,34	1,77	6,73

Tabela 5.7: Valores de resistência mecânica em MPa para CP 10x20 cm e 15x30 cm, traço 1:2:3, para três relações de água/cimento.

Relação a/c 50%	Resist. à compressão simples em MPa
CP 3	29,5
CP 4	32,5
CP 8	34,0
CP 10	34,2
CP 11	28,8
CP 12	26,1
Média	30,9
Desvio Padrão	3,2
relação a/c 53%	
CP 1	30,7
CP 2	30,5
CP 5	29,0
CP 6	26,1
CP 11	24,4
CP 12	23,8
Média	27,4
Desvio Padrão	3,1
relação a/c 56%	
CP 3	25,6
CP 6	27,4
CP 9	22,4
CP 7	27,1
CP 11	20,9
CP 12	21,8
Média	24,2
Desvio Padrão	2,8

e dois (amostras de números 11 e 12) com 15x30 cm. Os valores foram levantados no Laboratório de Materiais da UEL.

5.4 Levantamento dos valores de resistência em BT

Para que se tenha uma ideia preliminar da variabilidade dos valores de resistência elétrica, são aqui apresentados os valores de resistência dinâmica obtida em tensão AC, BT. Os valores de tensão, corrente e resistência calculada no quadro da Tabela 5.8 se referem aos CP com relação de água/cimento de 0,56, em estado saturado.

Como se pode notar, os valores de resistência à compressão são uniformes para cada grupo de relação a/c. Além disso, as médias mostram uma diminuição da resistência à compressão simples com o aumento da relação a/c, como era

Tabela 5.8: Quadro de valores de tensão, corrente e resistência elétrica para 10 CP com relação a/c de 56%, com teor de umidade de 100%.

	1		2		4		5		6		7		8		9		10	
(V)	I (mA)	R (k Ω)	I (mA)	R (k Ω)	I (mA)	R (k Ω)	I (mA)	R (k Ω)	I (mA)	R (k Ω)	I (mA)	R (k Ω)	I (mA)	R (k Ω)	I (mA)	R (k Ω)	I (mA)	R (k Ω)
10	3,6	2,78	3,8	2,63	4,3	2,33	3,9	2,56	3,8	2,63	4,3	2,33	4,0	2,50	4,2	2,38	3,7	2,70
20	6,8	2,94	7,2	2,78	7,9	2,53	6,9	2,90	7,2	2,78	7,6	2,63	7,4	2,70	7,4	2,70	7,0	2,86
30	9,5	3,16	10,6	2,83	11,3	2,66	10,2	2,94	10,5	2,86	11,0	2,73	10,9	2,75	11,0	2,73	10,1	2,97
40	12,8	3,13	13,8	2,90	14,7	2,72	13,3	3,01	13,6	2,94	14,6	2,74	14,3	2,80	14,1	2,84	13,0	3,08
50	15,9	3,15	17,1	2,92	18,4	2,72	16,5	3,03	16,9	2,96	18,0	2,78	17,5	2,86	17,6	2,84	16,5	3,03
60	19,0	3,16	20,6	2,91	22,1	2,72	19,7	3,05	20,4	2,94	21,3	2,82	21,2	2,83	21,3	2,82	19,5	3,08
70	21,9	3,20	23,8	2,94	25,7	2,72	23,1	3,03	23,5	2,98	24,8	2,82	24,6	2,85	24,7	2,83	22,7	3,08
80	25,0	3,20	27,3	2,93	29,4	2,72	26,3	3,04	26,9	2,97	28,5	2,81	28,2	2,84	28,1	2,85	25,9	3,09
90	28,3	3,18	30,8	2,92	33,0	2,73	29,6	3,04	30,4	2,96	31,8	2,83	31,6	2,85	31,7	2,84	29,1	3,09
100	31,3	3,20	33,9	2,95	36,7	2,73	32,9	3,04	33,7	2,97	35,6	2,81	34,9	2,87	34,8	2,87	32,3	3,10
110	34,4	3,20	37,5	2,93	40,3	2,73	36,2	3,04	37,0	2,97	39,3	2,80	38,4	2,87	38,6	2,85	35,6	3,09
120	37,5	3,20	40,6	2,96	43,8	2,74	39,5	3,04	40,4	2,97	42,6	2,82	42,0	2,86	42,1	2,85	38,5	3,12
130	40,2	3,23	44,3	2,94	47,6	2,73	42,0	3,10	43,5	2,99	46,2	2,81	45,4	2,86	45,7	2,85	41,7	3,12
140	43,9	3,19	47,5	2,95	51,4	2,72	46,1	3,04	47,2	2,97	49,9	2,81	49,1	2,85	49,1	2,85	44,9	3,12
150	47,0	3,19	50,9	2,95	54,9	2,73	49,2	3,05	50,3	2,98	53,5	2,80	52,4	2,86	52,6	2,85	48,2	3,11
160	50,0	3,20	54,4	2,94	58,8	2,72	52,7	3,04	53,3	3,00	56,9	2,81	56,0	2,86	56,2	2,85	51,2	3,13
170	53,3	3,19	57,8	2,94	62,3	2,73	56,3	3,02	57,0	2,98	60,6	2,81	59,6	2,85	59,7	2,85	54,5	3,12
180	56,3	3,20	61,4	2,93	63,3	2,84	59,5	3,03	60,6	2,97	64,2	2,80	63,1	2,85	63,3	2,84	57,6	3,13
190	59,5	3,19	64,6	2,94	69,8	2,72	62,8	3,03	64,1	2,96	67,8	2,80	66,7	2,85	67,3	2,82	60,6	3,14
200	62,5	3,20	68,2	2,93	73,8	2,71	66,1	3,03	67,5	2,96	71,5	2,80	70,2	2,85	70,7	2,83	63,9	3,13
210	65,9	3,19	71,8	2,93	77,5	2,71	69,7	3,01	70,9	2,96	75,2	2,79	74,0	2,84	74,5	2,82	67,0	3,13
220	69,1	3,18	75,8	2,90	81,2	2,71	72,9	3,02	74,4	2,96	79,1	2,78	77,6	2,84	78,2	2,81	70,1	3,14
230	72,3	3,18	78,7	2,92	84,9	2,71	76,6	3,00	77,9	2,95	82,6	2,79	81,3	2,83	81,7	2,82	73,2	3,14
240	76,0	3,16	82,2	2,92	89,1	2,69	80,2	2,99	81,2	2,96	86,5	2,78	84,9	2,83	85,6	2,80	76,1	3,15
Média		3,16		2,91		2,70		3,00		2,94		2,77		2,82		2,81		3,08
D.Padr.		0,10		0,07		0,09		0,10		0,08		0,10		0,08		0,10		0,10
Coef.V.%		3,1		2,4		3,5		3,4		2,7		3,7		2,8		3,5		3,3

Tabela 5.9: Massas esperadas para os CP com relação água/cimento de 0,50 nos teores de umidade de 85%, 90% e 95%.

CP10x20 cm	m (kg) 85%	m (kg) 90%	m (kg) 95%
1	3,982	3,991	4,001
2	3,953	3,965	3,978
3	3,967	3,978	3,989
4	3,982	3,991	4,001
5	3,933	3,945	3,958
6	3,973	3,982	3,991
7	3,969	3,979	3,990
8	3,963	3,975	3,988
9	3,953	3,962	3,971
10	3,952	3,961	3,971
CP15x30 cm	m (kg) 85%	m (kg) 90%	m (kg) 95%
11	13,261	13,287	13,314
12	13,167	13,198	13,229

esperado (MEHTA; MONTEIRO, 1999).

Para observar a variação da resistência elétrica com a variação do teor de umidade, foram escolhidos os valores correspondentes a 85%, 90% e 95% para o teor de umidade, além do valor saturado. Como foi comentado anteriormente, devido ao alto teor de umidade esperado para o concreto utilizado em elementos de fundações, foram descartadas as opções de medidas de resistências para teores de umidade inferiores a 85%. Um problema prático a ser contornado, no entanto, era como conseguir que os CP apresentassem os valores escolhidos de teor de umidade para que se pudesse proceder às medições.

Inicialmente foram calculadas as massas de cada CP correspondentes aos teores de umidade escolhidos. Para esse cálculo, foram tomados como referência os valores de referência de massa úmida saturada e de massa seca. A seguir foram calculados, com a proporção devida de água, os valores da massa esperada para cada teor de umidade. Esse cálculo utiliza o fato de que o corpo seco teórico possui teor de umidade zero e que a massa saturada possui teor de 100%. Por regra de três foram calculados os valores de massa correspondentes a 85%, 90% e 95% de umidade.

A Tabela 5.9 mostra os valores esperados de massa para CP com relação a/c de 0,50.

A Tabela 5.10 mostra os valores esperados de massa para CP com relação a/c de 0,53.

A Tabela 5.11 mostra os valores esperados de massa para CP com relação a/c

Tabela 5.10: Massas esperadas para os CP com relação água/cimento de 0,53 nos teores de umidade de 85%, 90% e 95%.

CP 10x20 cm	m (kg) 85%	m (kg) 90%	m (kg) 95%
1	3,944	3,956	3,968
2	3,837	3,851	3,866
3	3,937	3,948	3,959
4	3,855	3,870	3,885
5	3,846	3,857	3,869
6	3,937	3,951	3,966
7	3,924	3,936	3,948
8	3,906	3,917	3,929
9	3,985	4,000	4,015
10	3,946	3,957	3,969
CP 15x30 cm	m (kg) 85%	m (kg) 90%	m (kg) 95%
11	12,845	12,883	12,922
12	12,922	12,958	12,994

Tabela 5.11: Massas esperadas para os CP com relação água/cimento de 0,56 nos teores de umidade de 85%, 90% e 95%.

CP 10x20 cm	m (kg) 85%	m (kg) 90%	m (kg) 95%
1	3,803	3,812	3,821
2	3,849	3,859	3,870
3	3,790	3,803	3,817
4	3,832	3,841	3,851
5	3,870	3,880	3,890
6	3,797	3,808	3,819
7	3,735	3,743	3,752
8	3,860	3,870	3,880
9	3,850	3,863	3,877
10	3,788	3,802	3,816
CP 15x30 cm	m (kg) 85%	m (kg) 90%	m (kg) 95%
11	12,670	12,700	12,730
12	12,421	12,454	12,487

de 0,56.

Como haviam sido moldados dez CP para cada relação água/cimento (nos valores de 0,50, 0,53 e 0,56), havia um total de 30 CP. Para todos eles foram medidos os valores de massa seca e massa úmida saturada. Para que se pudesse ter uma amostragem experimental segura das propriedades mecânicas, foram rompidos quatro CP de cada relação de água/cimento para a verificação da resistência mecânica. Com isso, restaram seis CP de cada relação água/cimento para as medições de resistência elétrica, totalizando 18 CP. Como cada CP deveria ser submetido a quatro valores de teor de umidade, para medir o valor das resistências elétricas foi necessário agrupar os dados para esses 72 conjuntos de valores. Cada grupo mostra as leituras dos valores de tensão (de 20 a 240 V) e corrente apli-

cados a um determinado CP. Dessa forma é determinada a impedância em ohms para cada par tensão/corrente.

A maior dificuldade das leituras era conseguir que os CP apresentassem um teor de umidade pré-determinado. Para isso, depois de experimentar vários recursos, foi realizado o seguinte procedimento:

- Com os valores conhecidos de massa seca e massa úmida saturada para cada CP, era determinada a massa que este deveria apresentar para o teor de umidade escolhido.
- Os CP eram então colocados em estufa com 105 graus Celsius de forma a atingir um teor de umidade considerado como seco. Em seguida, os CP eram lançados na água durante alguns minutos. Eram então retirados, enxugava-se a superfície externa do CP com um pano e era medida sua massa em balança. Caso a massa do CP tivesse passado do valor desejado, era novamente lançado à estufa para secagem por um período mais breve de tempo.
- Ao sair da estufa, o CP não pode ser submetido de imediato aos testes de resistência elétrica: a temperatura, como foi abordado no Capítulo de Fundamentos, influencia fortemente o valor da resistividade. Era necessário, portanto, esperar que esfriasse à temperatura ambiente. Além disso, tanto para o aquecimento como para a imersão, é conveniente que se espere em torno de 24 horas para que a água no interior do CP se distribua de modo mais uniforme, uma vez que a variação do teor de umidade, tanto para a secagem como para a imersão, tende a afetar mais diretamente a água próxima das paredes do CP. Essa distribuição desigual de umidade no corpo da amostra pode afetar indevidamente as leituras.
- Ao conseguir que um determinado CP tivesse o valor escolhido de teor de umidade, era então submetido às medições de tensão e corrente AC. A tensão era variada de 20 a 240 V, com saltos de 20 em 20 V.

As Tabelas 5.12, 5.13 e 5.14 mostram os valores medidos de tensão e corrente, com os correspondentes valores de resistência elétrica. Não são mostrados todos os valores de leitura, mas somente as médias, ou seja, cada valor apresentado nas tabelas se refere a uma média de doze pares de leituras de tensão e corrente, entre 20 e 240 V.

Tabela 5.12: Valores médios de resistência elétrica para relação água/cimento 0,50 em k Ω para vários teores de umidade.

Teor de umidade	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	Média
100%	4,646	4,552	4,993	4,764	4,121	4,958	4,672
95%	5,436	5,365	5,198	4,992	5,446	5,822	5,376
90%	5,816	5,869	5,457	6,567	5,867	5,307	5,814
85%	6,938	6,117	5,683	7,374	6,052	7,239	6,567

Tabela 5.13: Valores médios de resistência elétrica para relação água/cimento 0,53 em k Ω para vários teores de umidade.

Teor de umidade	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	Média
100%	4,324	4,455	4,244	4,198	4,570	4,260	4,342
95%	4,761	4,780	4,528	4,410	4,829	4,662	4,662
90%	4,970	7,230	6,305	4,903	5,250	5,515	5,696
85%	7,287	8,240	7,364	7,122	5,617	6,214	6,974

Para relação de água/cimento de 0,50, a Tabela 5.12 mostra os valores médios de resistência elétrica obtidos com a variação do teor de umidade.

Para relação de água/cimento de 0,53, a Tabela 5.13 mostra os valores médios de resistência elétrica obtidos com a variação do teor de umidade.

Para relação de água/cimento de 0,56, a Tabela 5.14 mostra os valores médios de resistência elétrica obtidos com a variação do teor de umidade.

Com os dados obtidos na seção anterior foi levantado um grupo de curvas que procuram mostrar o comportamento da resistência elétrica com a variação da relação água/cimento e teor de umidade das amostras.

As curvas 5.21 mostram a variação da resistência elétrica em função do teor de umidade para os três valores da relação água/cimento.

Reagrupando os dados, as curvas 5.22 mostram a variação da resistência elétrica em função da relação água/cimento para os quatro valores de teor de umidade utilizados nos ensaios.

Analisando os gráficos pode-se observar que:

Tabela 5.14: Valores médios de resistência elétrica para relação água/cimento 0,56 em k Ω para vários teores de umidade.

Teor de umidade	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	Média
100%	3,162	2,917	3,017	2,949	2,830	3,092	2,994
95%	6,570	4,422	4,427	4,799	4,423	7,661	5,384
90%	7,332	5,682	6,176	5,890	6,987	8,437	6,751
85%	8,062	6,068	6,720	7,207	6,988	9,810	7,476

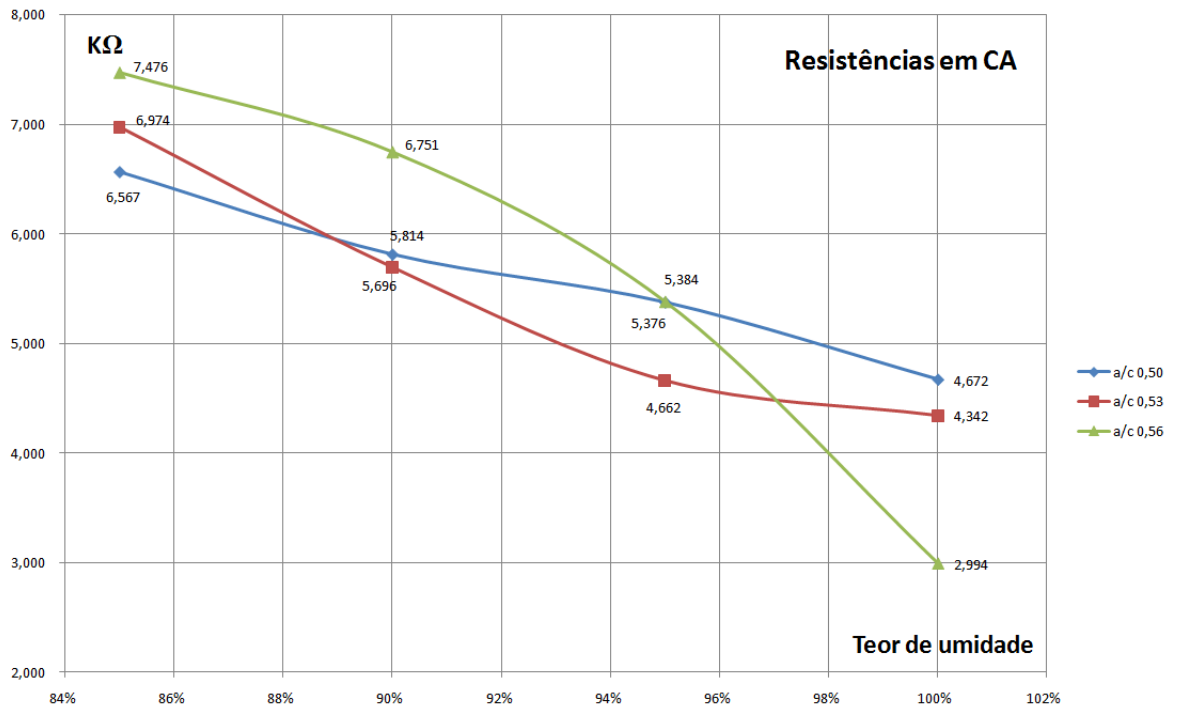


Figura 5.21: Curvas de variação de resistência elétrica em função do teor de umidade para três valores de relação água/cimento.

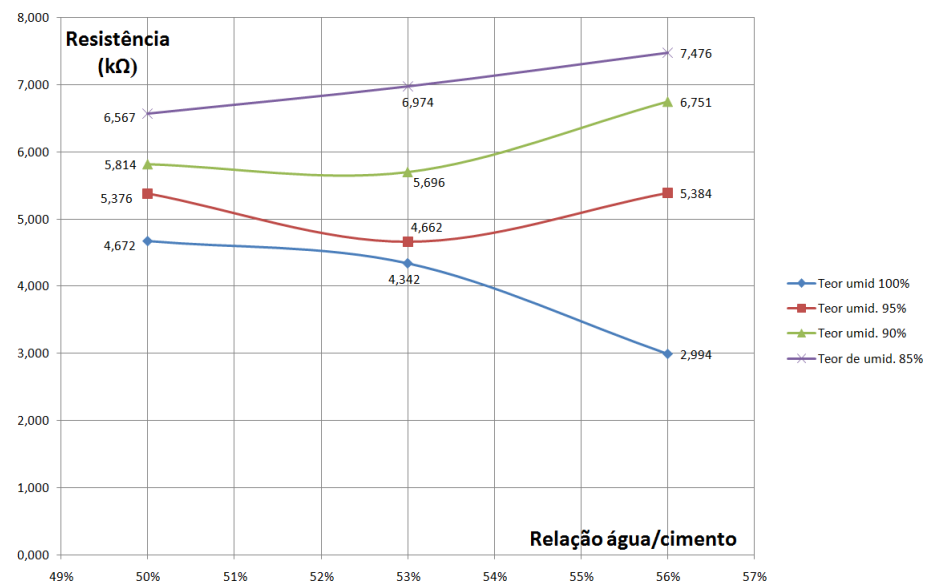


Figura 5.22: Curvas de variação de resistência elétrica em função da relação água/cimento para quatro valores de teor de umidade.

- Nas curvas de Resistência versus Teor de umidade, os valores de resistência diminuem à medida que aumenta o teor de umidade, para as três relações de água/cimento. Sem analisar a coerência dos valores das curvas entre si, o resultado está de acordo com os fenômenos teóricos esperados, uma vez que valores mais altos de teor de umidade fazem com que haja mais água livre entre os poros do concreto, facilitando a passagem de corrente elétrica.
- Nas curvas de Resistência versus Relação água/cimento, a curva correspondente ao teor de umidade de 100% apresenta um comportamento dentro do esperado, uma vez que, fixado o teor de umidade, o valor da resistência elétrica deve cair com o aumento da relação água/cimento, pois sabe-se que maiores valores dessa relação indicam também uma maior quantidade de poros deixados pela água no processo de endurecimento do concreto. Com o CP saturado, há grande quantidade de água entre os poros.
- Observando ainda a variação de Resistência versus Relação água/cimento, para teores de umidade diferentes do saturado, há uma distorção nos teores de 90 e 95%, pois os valores de R para teores de umidade de 56% mostram um aumento de R. No caso do teor de umidade fixado em 85% a distorção é ainda maior: a curva sobe com o aumento da relação água/cimento.

As distorções apresentadas podem ser explicadas por pelo menos dois fatores possíveis. Um deles é a dificuldade de estabilizar o teor de umidade em algum valor escolhido, uma vez que para controlar o teor de umidade é necessário recorrer ao aquecimento ou imersão dos CP. Estes, no entanto, se estiverem aquecidos não podem ser levados a ensaios, pois a temperatura influencia fortemente o valor da resistência elétrica. Com isso, ao conseguir chegar ao valor da massa esperada para cada teor de umidade, o CP deve ser resfriado até a temperatura ambiente.

Há outra razão ainda para retardar a execução dos ensaios de tensão e corrente: como foi visto no ensaio de saturação dos CP, o concreto demora em torno de quinze dias para chegar à saturação. Como o interesse dos ensaios é variar o teor de umidade, deve-se supor a necessidade de tempo para estabilizar a distribuição de água no CP, uma vez que todo o corpo da amostra deve apresentar idêntica umidade local. O tempo adotado para a espera foi de vinte e quatro horas. Pode-se supor que esse espaço de tempo é ainda curto. Talvez seja necessário esperar em torno de quinze dias para cada um dos 72 casos testados.

Outra razão possível para as diferenças pode ser encontrada na formação dos poros. Sabe-se que estes dependem basicamente da quantidade de água livre

na mistura e do ar aprisionado pela agitação do concreto. Como a mistura é processada em betoneira, a distribuição de poros de ar aprisionado pode variar de uma relação de água/cimento para outra, uma vez que a trabalhabilidade da pasta de cimento é diferente. Ou seja, embora o procedimento tenha sido o mesmo de uma para outra mistura, pelo fato de haver diferentes relações de água/cimento, a agitação dos agregados na betoneira pode produzir maior ou menor número de partículas de ar aprisionado.

6 Conclusão

Em função dos resultados obtidos, podem-se extrair várias conclusões:

A umidade esperada para o concreto em elementos de fundações é elevada. Nota-se que o concreto possui propriedade higroscópica e a umidade natural do solo favorece a absorção de água pelo concreto. Além disso, o concreto demora a perder a umidade no subsolo.

Este resultado é importante no estudo de sistemas de aterramento, pois sempre que se faz referência a ensaios de aterramento sobre elementos de fundação, deve-se necessariamente estimar o concreto com alto teor de umidade (por exemplo, maior que 90%). Este critério não é observado em muitos estudos sobre o tema. A omissão do teor de umidade do concreto pode simplesmente condenar a análise de um estudo de aterramento.

A falta de uniformidade dos dados de resistividade em CP observados nos ensaios do ano de 2009, se deve muito provavelmente à falta de controle na metodologia de preparação dos CP. De fato, qualquer descuido nos detalhes práticos de controle da mistura pode provocar grandes variações nos resultados. Os valores de resistência elétrica levantados foram bastante homogêneos quando o procedimento experimental foi mais rigoroso.

Com os dados experimentais foi possível a comprovação da diminuição da resistividade com o aumento do teor de umidade para um valor fixado de relação água/cimento. No entanto, fixando-se o teor de umidade, a resistividade não caiu com o aumento da relação água/cimento, como seria previsível pelos resultados da literatura. Esse resultado deve ser revisto através de um controle diferente da relação água/cimento, uma vez que, como foi observado, os valores de massa úmida saturada mostraram uma incorporação de água livre com uma variação relativamente grande. Isso significa que a uniformidade nos valores de massa seca, massa úmida saturada e mesmo de resistividade elétrica, não garantem um comportamento homogêneo da água nos poros para diferentes relações de água/cimento.

Um resultado importante para efeitos de segurança de aterramentos estruturais é o fato de que o concreto com alto teor de umidade apresenta resistividade elétrica inferior aos solos considerados mais condutivos. Isso significa que a corrente de descarga atmosférica encontra menor impedância no concreto dos elementos de fundação do que na própria terra.

Não foi possível com os dados disponíveis do trabalho fazer uma comparação entre valores levantados em AT e valores em BT para o concreto úmido. Esta análise seria de bastante proveito para o estudo do concreto em aterramentos, uma vez que poderia permitir um estudo básico da impedância do concreto sem recorrer aos ensaios de AT. Para o concreto seco verificou-se que há diferenças grandes de impedância entre AT e BT, devido à natureza complexa dos fenômenos de condução em sólidos.

Por todos os elementos teóricos expostos, nota-se que a presença dos poros no concreto determina grande parte de suas propriedades elétricas. É, além disso, um tema complexo por tratar diretamente da microestrutura do concreto. No entanto, o fato conhecido de que o concreto apresenta percolação é uma garantia de que, para altos teores de umidade, haja um caminho físico contínuo para a circulação de correntes elétricas, o que explicaria sua grande diferença de resistividade ao passar do estado seco para o úmido.

Seria importante que os engenheiros eletricitistas se familiarizassem mais com as técnicas construtivas e o conhecimento básico das propriedades do concreto, uma vez que fatores como a umidade e a relação a/c , por exemplo, afetam diretamente suas propriedades elétricas.

Outro campo de grande interesse seria estudar os fenômenos de condução pelas substâncias presentes na solução formada pela água livre do concreto e pelos eletrólitos dissolvidos a partir da pasta de cimento. O alto teor de umidade nos elementos de fundação favorece a formação de íons que podem auxiliar muito a condução de correntes de descargas atmosféricas e diminuir ainda mais o risco de ruptura do concreto. O estudo teria um interesse ainda maior devido à presença provável de íons de forte condutividade molar originados por cloretos, sulfatos e hidroxilas.

Anexo A - Datos Meteorológicos

Tabela A.1: Dados meteorológicos fornecidos pelo IAPAR correspondentes aos meses de junho de 2010.

IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ		26/10/2010											
Bda – Banco de Dados Agrometeorológico		ANO: 2010											
Bdabom – Relatório do Boletim Mensal		MES: JUNHO											
ESTACAO: 2351003 – LOCAL: LONDRINA		LATITUDE: 23:22 – S											
ANO INICIAL: 1976		LONGITUDE: 51:10 – W											
		ALTITUDE: 585 M											
DIA	MEDIA	TEMPERATURA (C)	UMID. RELAT (%)	CHUVA 24-HR (MM)	CHUVA DURACAO (HORAS)	EST GER TPO	EVAP. PICHE (MM)	INSO-LACAO (HORAS)	RADIAC. SOLAR CAL CM2 D	KM ACUMUL	VENTO MAX (M/S)	DIR PICO	DIR PRE
1	14.9	20.8	73.8	0.0	0:00	NUB	4.0	10.0	278.0	173.0	5.3	SW	SW
2	15.5	21.2	79.2	0.0	0:00	NUB	1.5	8.5	249.0	281.0	8.6	E	E
3	17.7	23.0	76.3	0.0	0:00	ENC	3.0	7.3	223.0	273.0	6.8	E	E
4	17.6	19.9	97.2	0.0	0:00	ENC	3.5	0.1	69.0	280.0	7.0	E	E
5	14.1	19.4	74.0	9.6	4:00	NUB	1.0	10.1	279.0	196.0	8.4	SW	SW
6	12.2	19.6	69.1	7.0	0:00	NUB	3.7	10.0	286.0	253.0	10.7	W	W
7	12.6	21.0	71.7	0.0	0:00	CLA	3.3	10.0	294.0	108.0	4.8	SW	W
8	16.2	23.3	60.0	0.0	0:00	NUB	2.3	9.7	273.0	120.0	4.3	E	E
9	15.1	21.4	70.9	0.0	0:00	NUB	4.2	9.3	238.0	175.0	4.2	E	E
10	15.2	20.2	83.4	0.0	0:00	NUB	3.0	4.1	164.0	181.0	5.5	E	E
11	15.0	21.4	76.9	0.3	-	NUB	1.4	8.8	242.0	148.0	4.9	E	SE
12	14.5	20.4	71.8	0.0	0:00	NUB	2.2	9.2	250.0	305.0	8.4	E	E
13	13.4	20.6	74.7	0.0	0:00	NUB	4.5	9.3	280.0	348.0	10.6	E	E
14	15.2	22.0	79.2	0.0	0:00	NUB	3.0	7.8	250.0	178.0	5.2	E	SE
15	17.2	24.4	72.8	0.0	0:00	CLA	2.5	9.5	264.0	156.0	6.6	E	E
16	19.5	26.6	63.6	0.0	0:00	CLA	3.0	9.8	266.0	153.0	5.5	NE	W
17	19.4	27.4	70.1	0.0	0:00	CLA	3.6	9.7	256.0	148.0	5.4	N	N
18	18.6	26.9	70.0	0.0	0:00	NUB	3.2	8.7	255.0	129.0	5.2	NW	NE
19	21.1	27.7	50.6	0.0	0:00	NUB	3.2	9.7	266.0	111.0	4.7	N	NE
20	20.9	28.6	66.0	0.0	0:00	NUB	2.6	9.0	256.0	177.0	8.3	N	N
21	23.3	29.5	67.1	0.0	0:00	NUB	4.2	8.3	224.0	147.0	7.8	W	NW
22	19.5	24.2	92.5	3.0	1:06	ENC	3.0	0.1	87.0	146.0	5.5	W	NW
23	15.3	20.2	80.9	4.8	2:18	ENC	1.0	3.4	196.0	232.0	8.0	E	E
24	18.9	26.6	79.2	0.0	0:00	CLA	2.3	9.2	259.0	222.0	9.0	E	E
25	20.2	27.4	72.4	0.0	0:00	CLA	2.7	9.7	250.0	149.0	5.0	N	SE
26	19.2	26.6	66.4	0.0	0:00	CLA	3.0	9.8	259.0	119.0	4.7	NE	W
27	18.0	25.1	68.9	0.0	0:00	CLA	4.2	9.5	275.0	169.0	5.6	E	SE
28	18.6	27.4	65.2	0.0	0:00	NUB	3.1	8.8	268.0	148.0	4.9	NE	W
29	16.9	22.8	75.7	0.0	0:00	NUB	3.5	8.4	263.0	134.0	7.0	E	SE
30	17.3	25.4	76.0	0.0	0:00	NUB	3.3	9.0	264.0	225.0	9.0	E	E
MES	17.1	23.7	73.1	17.7	7:24	NUB	89.0	247.8	7283.0	5584.0			E
MAIOR DIA	23.3	29.5	17.8	9.6			4.5	10.1	294.0	348.0	10.7	SW	
	21	21	21	5			13	5	7	13	6		
MENOR DIA	12.2	19.4	5.0	NDC			1.0	0.1	69.0	108.0	4.2	E	
	6	5	7	4					4	7	9		

Tabela A.2: Dados meteorológicos fornecidos pelo IAPAR correspondentes ao mês de julho de 2010.

IAPAR – INSTITUTO AGRONOMICO DO PARANA														
Bda – Banco de Dados Agrometeorológico														
Bdarbom – Relatório do Boletim Mensal														
MES: JULHO ANO: 2010														
26/10/2010														
ESTACAO: 2351003 - LOCAL: LONDRINA														
ANO INICIAL: 1976														
DIA	TEMPERATURA (C)		UMID. RELAT (%)	CHUVA 24-HR (MM)	CHUVA DURACAO (HORAS)	EST TPO	EVAP. PICHE (MM)	INSO-LACAO (HORAS)	RADIAC. SOLAR CAL CM2 D	KM ACUMUL	VENTO		ALTITUDE: 585 M	
	MEDIA	MAX									MIN	PICO MAX (M/S)		DIR PICO
1	17.2	25.8	11.5	0.0	0:00	CLA	2.9	9.8	262.0	122.0	5.0	NE	W	
2	17.2	25.4	10.7	0.0	0:00	CLA	3.9	9.7	278.0	140.0	3.3	NE	SW	
3	18.1	25.8	11.2	0.0	0:00	CLA	4.3	9.9	275.0	167.0	5.6	NE	SW	
4	17.6	25.0	11.8	0.0	0:00	CLA	3.3	9.9	286.0	131.0	4.0	E	E	
5	17.5	25.2	12.0	0.0	0:00	CLA	4.3	9.8	285.0	177.0	5.4	NE	E	
6	18.9	26.2	11.9	0.0	0:00	CLA	3.5	9.8	278.0	158.0	5.4	NE	W	
7	18.7	26.8	13.0	0.0	0:00	NUB	3.7	6.3	240.0	125.0	4.7	NE	W	
8	18.9	26.6	14.4	0.0	0:00	NUB	3.3	7.4	224.0	103.0	5.0	NE	W	
9	18.6	26.0	12.6	0.0	0:00	CLA	3.8	9.5	270.0	115.0	4.3	NE	SE	
10	19.3	25.2	14.7	0.0	0:00	NUB	3.6	7.5	249.0	152.0	5.4	NE	SE	
11	17.5	24.4	13.2	0.0	0:00	NUB	3.6	5.0	181.0	227.0	7.6	E	E	
12	20.4	29.1	12.6	1.3	0:42	NUB	1.7	7.6	212.0	146.0	7.6	W	SE	
13	14.4	22.3	11.7	8.2	1:18	ENC	3.0	0.7	108.0	236.0	12.3	NW	W	
14	12.6	15.5	10.0	0.0	0:00	ENC	2.0	0.4	89.0	206.0	7.5	SW	SW	
15	12.5	14.0	11.0	2.8	-	ENC	1.3	0.0	35.0	147.0	4.8	W	SE	
16	14.4	17.6	12.2	20.8	7:06	ENC	0.5	2.1	141.0	187.0	6.8	SW	SE	
17	17.1	22.0	13.0	0.0	0:00	NUB	2.4	5.4	226.0	382.0	10.6	E	E	
18	19.1	24.4	14.6	0.0	0:00	NUB	3.8	4.3	210.0	385.0	10.4	E	E	
19	16.5	23.4	13.5	0.0	0:00	ENC	4.0	3.5	170.0	287.0	9.0	E	E	
20	16.9	23.8	9.6	0.0	0:00	NUB	1.5	9.2	262.0	193.0	8.2	NW	W	
21	21.6	28.4	14.4	0.0	0:00	CLA	2.5	10.0	287.0	131.0	4.8	NE	E	
22	21.8	29.6	13.8	0.0	0:00	CLA	5.0	9.5	285.0	176.0	9.0	N	NE	
23	21.3	27.8	18.0	0.0	0:00	NUB	4.5	7.2	250.0	181.0	8.5	NW	W	
24	19.1	25.4	13.5	0.0	0:00	CLA	1.5	9.9	300.0	185.0	6.0	E	SE	
25	19.9	26.3	13.9	0.0	0:00	CLA	4.3	9.9	305.0	276.0	9.0	E	E	
26	19.8	27.6	11.2	0.0	0:00	NUB	4.9	9.4	284.0	180.0	8.0	N	NE	
27	17.4	23.6	12.4	0.0	0:00	NUB	4.3	9.8	307.0	150.0	6.0	E	NW	
28	19.1	25.9	14.1	0.0	0:00	NUB	4.8	8.2	280.0	288.0	8.0	SE	E	
29	20.4	28.4	14.0	0.0	0:00	NUB	4.2	8.3	271.0	191.0	7.4	NE	E	
30	20.5	28.4	14.3	0.0	0:00	CLA	4.3	10.0	298.0	127.0	5.3	NE	NE	
31	22.1	28.6	13.3	0.0	0:00	NUB	4.5	8.4	296.0	189.0	8.5	NE	NE	
MES	18.3	24.9	12.9	33.1	9:06	NUB	105.2	228.4	7444.0	5860.0			E	
MAIOR DIA	22.1	29.6	18.0	20.8			5.0	10.0	307.0	385.0	12.3		NW	
	31	22	23	16			22		27	18	13			
MENOR DIA	12.5	14.0	9.6	NDC			0.5	0.0	35.0	103.0	4.0		E	
	15	15	20	4			16	15	15	8	4			

Tabela A.3: Dados meteorológicos fornecidos pelo IAPAR correspondentes ao mês de agosto de 2010.

IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ		26/10/2010											
Bda – Banco de Dados Agrometeorológico													
Bdabom – Relatório do Boletim Mensal													
MES: AGOSTO ANO: 2010													
ESTACAO: 2351003 – LOCAL: LONDRINA		LATTITUDE: 23:22 – S LONGITUDE: 51:10 – W ALTITUDE: 585 M											
ANO INICIAL: 1976													
DIA	MEDIA	TEMPERATURA (C)	UMID. RELAT (%)	CHUVA 24-HR (MM)	CHUVA DURACAO (HORAS)	EST GER TPO	EVAP. PICHE (MM)	INSO-LACAO (HORAS)	RADIAC. SOLAR CAL CM2 D	KM ACUMUL	VENTO PICO MAX (M/S)	DIR PICO	DIR PRE
1	19.2	25.8	87.1	0.0	0:00	ENC	6.3	3.0	135.0	196.0	8.5	N	N
2	16.4	19.4	93.4	16.4	4:54	ENC	1.7	3.0	159.0	163.0	12.5	W	E
3	15.1	19.0	87.3	12.8	2:18	ENC	1.0	1.1	130.0	204.0	6.3	E	E
4	11.9	16.4	86.7	0.0	0:00	ENC	1.5	0.1	95.0	275.0	6.1	E	E
5	12.9	20.1	82.2	1.2	1:48	NUB	1.5	8.6	262.0	189.0	8.3	SE	S
6	12.3	20.0	77.7	0.0	0:00	NUB	2.0	5.5	224.0	144.0	4.2	SW	SW
7	13.9	23.0	71.3	0.0	0:00	CLA	2.5	10.2	346.0	195.0	4.5	E	E
8	17.7	27.6	61.8	0.0	0:00	CLA	3.0	10.5	337.0	114.0	3.9	E	N
9	19.5	29.3	59.7	0.0	0:00	CLA	4.0	9.9	310.0	82.0	2.6	SE	W
10	17.8	25.6	69.7	0.0	0:00	NUB	4.7	8.4	278.0	175.0	5.9	E	E
11	17.3	25.2	71.5	0.0	0:00	CLA	3.6	9.7	320.0	257.0	7.3	E	E
12	21.0	29.4	49.4	0.0	0:00	CLA	5.0	9.2	317.0	281.0	8.9	E	SE
13	15.6	22.9	64.6	0.0	0:00	NUB	7.1	7.0	225.0	259.0	9.5	NE	N
14	13.3	22.4	59.3	0.0	0:00	CLA	2.6	9.7	342.0	246.0	9.0	SW	SW
15	12.9	21.4	7.3	0.0	0:00	CLA	4.0	10.5	359.0	162.0	4.3	SW	SW
16	13.3	21.4	60.8	0.0	0:00	CLA	4.8	10.6	370.0	291.0	10.1	E	SE
17	15.3	23.0	54.9	0.0	0:00	CLA	6.7	10.6	370.0	422.0	13.2	E	E
18	16.3	24.4	51.3	0.0	0:00	CLA	6.3	10.4	361.0	349.0	10.0	E	E
19	17.4	26.4	53.0	0.0	0:00	NUB	5.7	10.1	329.0	228.0	8.4	E	E
20	19.6	28.0	48.9	0.0	0:00	CLA	5.0	9.3	317.0	143.0	5.0	NE	W
21	19.8	28.3	48.9	0.0	0:00	CLA	5.0	9.8	329.0	104.0	3.6	NE	W
22	20.9	30.1	39.1	0.0	0:00	CLA	6.5	10.2	357.0	170.0	5.6	NE	W
23	23.2	31.4	34.4	0.0	0:00	CLA	7.7	10.4	364.0	165.0	6.3	N	E
24	23.1	32.8	36.7	0.0	0:00	CLA	7.5	10.4	360.0	150.0	5.6	N	NE
25	23.8	33.0	35.3	0.0	0:00	CLA	7.5	10.5	353.0	152.0	8.9	N	W
26	24.2	33.2	34.1	0.0	0:00	CLA	9.0	10.3	355.0	137.0	4.8	NE	E
27	24.5	32.8	29.3	0.0	0:00	CLA	9.0	10.1	346.0	138.0	5.0	NE	NE
28	23.5	32.9	35.3	0.0	0:00	CLA	8.6	10.3	346.0	115.0	4.0	NE	W
29	24.1	34.2	34.2	0.0	0:00	CLA	9.3	10.2	344.0	135.0	5.0	NE	W
30	23.8	32.5	17.8	0.0	0:00	CLA	9.0	9.7	341.0	126.0	5.5	NE	S
31	21.3	29.9	13.8	0.0	0:00	CLA	11.0	9.6	317.0	349.0	10.9	E	E
MES	18.4	26.5	57.1	30.4	9:00	CLA	169.1	268.9	9398.0	6116.0			E
MAIOR DIA	24.5	34.2	17.8	16.4			11.0	10.6	370.0	422.0	13.2	E	
	27	29	30	2			31			17	17		
MENOR DIA	11.9	16.4	5.8	NDC			1.0	0.1	95.0	82.0	2.6	SE	
	4	4	7	3			3	4	4	9	9		

Referências

- ABESC. Manual do concreto dosado em central. *Associação Brasileira das empresas de serviços de concretagem - ABESC*, São Paulo, 2000.
- ALVES, N. V. B. Acidentes com descargas atmosféricas: descrições e imagens. *Eletricidade Moderna*, n. 385, 2006.
- ANDERSON, R. D.; ERIKSSON, A. J. Le paramètres de la foudre en vue des applications industrielles. *Electra*, v. 69, p. 98, 1980.
- ATKINS, P.; PAULA, J. D. *Elements of physical chemistry*. [S.l.]: WH Freeman & Co, 2009. ISBN 1429218134.
- BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRONINGER, H. *Commission (Conférence) Internationale des Grands Réseaux Electriques (à haute tension)*. [S.l.]: Paris, julho 1975.
- COTRIM, A. *Instalações elétricas*. [S.l.]: Mcgraw-Hill do Brasil, 2003. ISBN 8587918354.
- FUSCO, P. *Fundamentos da técnica de armar: estruturas de concreto*. [S.l.]: São Paulo, Grêmio Politécnico, 1975.
- GEYER, A. L. B. *Importância do Controle de Qualidade do Concreto no Estado Fresco*. Goiânia, Julho 2006.
- GJORV, O. E.; VENNESLAND, U.; EL-BUSAIDY, A. H. S. Electrical resistivity of concrete in the oceans. In: *Offshore Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 1977.
- GOMES, G. L. Sistema de aterramento e proteção contra raios utilizando ferragens do concreto armado. *Eletricidade Moderna*, p. 54–55, 2007.
- HALLMARK, C. L. *The use of conductive cement to extend and protect made ground electrodes*. Shelby, USA, 2000.
- HOPPE, T. *Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- JINLIANG, H. Soil ionization phenomenon around grounding electrode under lightning impulse. In: *VIII International Symposium on Lightning Protection*. São Paulo: [s.n.], 2005. p. 520–525.
- KOKKINOS, D.; KOKKINOS, N.; KOUTSOUBIS, J.; KLABANA, M.; TRIANTAFILLIDES, A. Effect of direct lightning strike in the down conductors embedded into the reinforcement. In: *28th International Conference on Lightning Protection*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1304–1310.

- KOLEVA, D.; COPUROGLU, O.; BREUGEL, K. van; YE, G.; WIT, J. de. Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 30, n. 8, p. 731–744, 2008.
- KUFFEL, E.; ZAENGL, W.; KUFFEL, J. *High voltage engineering: fundamentals*. [S.l.]: Ed. Newnes, 2000.
- LEITE, D. M.; SUETA, H. E.; BURANI, G. F.; GRIMONI, J. A. B. Accidents reduction in brazil due to of lightning: adopted solutions according to the iec 1024-1 standard and ieec 62305 series. In: *In: International Symposium on lightning protection - SIPDA - São Paulo - IEE-USP*. Foz do Iguaçu: [s.n.], 2007. p. 225–229.
- MEHTA, P.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. [S.l.]: Editora Pini, 1999.
- MIRANDA, A. P. R. Sistema de captação de raios para proteção de edificações. *Eletricidade Moderna*, Maio 2003a.
- MIRANDA, A. P. R. Análise do conceito de condutor dedicado na proteção contra descargas atmosféricas. *Eletricidade Moderna*, n. 353, p. 166–169, Agosto 2003c.
- MIRANDA, A. R. Aterramento pelas fundações para a proteção contra raios. *Eletricidade Moderna*, março 2003b.
- MIRANDA, A. R. Aterramento para proteção contra fenômenos naturais e produzidos pelo homem. *Eletricidade Moderna*, n. 358, p. 128–133, jan 2004.
- MIYAZAKI, S.; ISHII, M. Campos magnéticos induzidos em edifícios atingidos por raios. *Eletricidade Moderna*, p. 56–71, 2007.
- MORENO, H.; COSTA, P. Aterramento elétrico. *São Paulo: Procobre*, 1999.
- NBR-NM67. ABNT NBR NM 67 - Concreto Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. *ABDEN Técnicas*, Rio de Janeiro, 1998.
- NBR5410. Instalações elétricas de baixa tensão. *ABNT 5410*, 2004.
- NBR5419. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. *ABNT 5419*, 2005.
- NBR5738. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. *Técnicas, A.B.D.E.N.*, Rio de Janeiro, 2003.
- NBR6936. Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão. *ABNT 6936*, 1992.
- NEVILLE, A. D. *Propriedades do concreto*. São Paulo: [s.n.], 1997.
- PANICALI, A. R. Current distribution on metallic structures hit by lightning. In: *VIII International Symposium on Lightning Protection*. São Paulo: [s.n.], 2005. p. 344–347.
- SOUZA, P. M. L. *Estudo da resistência elétrica do concreto armado em alta tensão para sistemas de aterramento estrutural*. 2009.

SUETA, H. *Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas-uma visão relativa aos danos físicos*. Tese (Doutorado) — USP, São Paulo, 2005.

TORRENTI, J. *Caractérisation de la variabilité des performances des bétons. application á la durabilité des structures*. 2009.

TOWNE, H. Impulse characteristics of driven grounds. *Gen. Elect. Rev.*, v. 31, n. 11, p. 605–609, 1929.

VISACRO, F. S.; SOARES, J. A. O efeito da intensidade de corrente de descarga sobre o comportamento dos sistemas de aterramento. In: *III SIPDA - International Seminar on Lightning Protection*. São Paulo: [s.n.], 1994. p. 3.17–3.23.

VISACRO, S. F. *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. [S.l.]: Artliber, 2005. ISBN 8588098318.

WHITING, D.; NAGI, M. Electrical resistivity of concrete-a literature review. *R&D Serial*, v. 2457, 2003.