

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**OTIMIZAÇÃO DE TRAÇOS DE CONCRETO: ESTUDO  
APLICADO A POSTES DE CONCRETO ARMADO VISANDO  
O AUMENTO DA VIDA ÚTIL**

**Lucas Alexandre Reginato**

Porto Alegre  
2014

LUCAS ALEXANDRE REGINATO

**OTIMIZAÇÃO DE TRAÇOS DE CONCRETO: ESTUDO  
APLICADO A POSTES DE CONCRETO ARMADO VISANDO  
O AUMENTO DA VIDA ÚTIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre  
2014

### CIP - Catalogação na Publicação

Reginato, Lucas Alexandre  
OTIMIZAÇÃO DE TRAÇOS DE CONCRETO: ESTUDO APLICADO  
A POSTES DE CONCRETO ARMADO VISANDO O AUMENTO DA  
VIDA ÚTIL / Lucas Alexandre Reginato. -- 2014.  
143 f.

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-  
RS, 2014.

1. poste. 2. postes de concreto armado. 3. vida  
útil. 4. estruturas de concreto armado. 5. dosagem  
de concreto. I. Silva Filho, Luiz Carlos Pinto da ,  
orient. II. Título.

**LUCAS ALEXANDRE REGINATO**

**OTIMIZAÇÃO DE TRAÇOS DE CONCRETO: ESTUDO  
APLICADO A POSTES DE CONCRETO ARMADO VISANDO  
O AUMENTO DA VIDA ÚTIL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área da Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador, co-orientadora e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 19 de Setembro de 2014.

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
PhD. pela University of Leeds / UK  
orientador

Prof. Armando Miguel Awruch  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal (UFRGS)  
PhD. North Carolina State University, EUA

Prof. João Luiz Calmon Nogueira da Gama (UFES)  
Dr. pela Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)  
PhD. pela University of Sheffield, SHEFFIELD, Inglaterra

Alexandre Lorenzi (UFRGS)  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Àqueles que por sua especialidade merecem o universo,  
dedico um pedaço do meu mundo: meus pais Sérgio e  
Elita e a minha Irmã Alana.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de uma forma ou de outra colaboraram para o desenvolvimento desta dissertação. São poucas linhas para fazer este agradecimento e espero não ser injusto e não esquecer ninguém. Porém, não posso deixar de agradecer às pessoas que fizeram parte dessa caminhada.

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos, orientador deste trabalho, pela oportunidade oferecida, por ter me acolhido neste grupo de pesquisa (LEME), agradeço as oportunidades de crescimento dentro do próprio grupo, além do crescimento como pessoa e principalmente pelo incentivo a me tornar um pesquisador, despertando a paixão pela pesquisa. Agradeço por ter aceitado orientar este trabalho e pelos conhecimentos repassados mesmo nas mais atribuladas horas.

Agradeço ao Laboratório de Ensaaios e Modelos Estruturais, as pessoas que constituem este grupo e estiveram presentes nessa etapa. Aos meus amigos e colegas de pós-graduação Rafael, Josué, Fernanda, Débora, Camila, Tamara, Diego, Bruno... Em especial as pessoas que me ajudaram, me apoiaram e contribuíram para a elaboração dos ensaios e redação da dissertação, Deise, Luiza, Morgane, Rafaela, Luciane, Luciani, Alexandre, Angela.

Juntamente, agradeço a todos os bolsistas de iniciação científica que colaboraram durante todo o período em especial a Rafa, “minha bolsista” em particular, que foi de fundamental importância na realização dos ensaios. Aos técnicos do Laboratório, Sr. Edgar e Sr. Fontes pela ajuda na execução dos ensaios nos postes.

Agradeço aos demais professores do LEME, prof. João Luiz Campagnolo e ao Prof. Dario Klein. Especialmente a Profa. Angela Gaio Graeff, que além de ser uma excelente profissional e um exemplo de pesquisadora, agradeço-lhe pela ajuda durante a realização dos ensaios, ideias, dicas e auxílio na redação da dissertação.

Ao CNPQ pelo auxílio que me possibilitou dedicação à esta pesquisa.

A AES Sul pela colaboração com esta pesquisa e todo o apoio prestado para a logística dos postes, aquisição dos materiais.

Agradeço as minhas amigas Deise, Luiza, Morgane e Rafa pela ajuda durante esse período e apoio, dizendo que daria tudo certo no momento em que tudo dava errado.

Agradeço a toda a minha família, em especial a minha mãe, Elita, por aguentar esse filho, mas principalmente por me dar o maior apoio quando escolhi seguir nesta área, sempre podendo contar contigo. Repito as mesmas palavras a minha irmã Alana, você é a melhor irmã que eu tenho (apesar de ter uma só.. hehe), juntamente agradeço ao meu pai, Sergio (*in memorian*), que apesar de não estar aqui, sempre esteve do meu lado, servindo como uma fonte de inspiração e de muita admiração.

Agradeço a uma pessoa muito especial, a ti Bruna, incondicionalmente em todas as situações, sendo elas as melhores e as piores, obrigado pelo seu apoio, sua compreensão, sua dedicação, sua ajuda, mas principalmente por acreditar em mim, nunca duvidando que eu fosse capaz e também por estar presente comigo, estar ao meu lado nos momentos que mais precisei. Agradeço-lhe em especial, por tornar essa caminhada muito mais agradável e prazerosa.

Agradeço a uma pessoa muito especial, a ti Bruna, obrigado pelo seu apoio, sua compreensão, sua dedicação, sua ajuda, mas principalmente por acreditar em mim nunca duvidando da minha capacidade. Também lhe agradeço por estar junto comigo em todas as situações, sendo elas as melhores e as piores, obrigado por estar comigo nos momentos que mais precisei. Agradeço-lhe por tornar essa caminhada muito mais agradável e prazerosa.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.

*Albert Einstein*



## RESUMO

REGINATO, L. A. Otimização de traços de concreto: estudo aplicado a postes de concreto armado visando o aumento da vida útil. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A energia elétrica é, sem dúvida, um recurso indispensável para a sociedade moderna. A mesma revolucionou o modo de vida do ser humano em todos os aspectos e melhorou substancialmente sua qualidade de vida. A distribuição da energia elétrica cabe ao Sistema Elétrico de Potência – SEP, dividido basicamente em três macro setores: geração, transmissão e distribuição. A eletricidade é efetivamente entregue aos consumidores pelo sistema de distribuição, formado principalmente por redes aéreas sustentadas por postes, estes na sua maioria, feitos de concreto armado. Tendo em vista o adequado fornecimento da energia elétrica à sociedade, se faz necessário assegurar as linhas de distribuição de energia, na qual os postes exercem papel fundamental. Entende-se que o aumento da vida útil dos postes de concreto armado pode colaborar para a redução da manutenção da rede de distribuição, reduzindo o investimento em substituições ou reparos em postes por parte das concessionárias. Deste modo, esse trabalho propõe a otimização do traço utilizado na produção de postes de concreto armado em uma empresa de artefatos de concreto, visando à vida útil do mesmo. Para tanto foram realizados estudos visando o aprimoramento da composição dos agregados, adição de material pozolânico, adição de fibras e utilização de aditivos superplastificantes. Para análise dos traços em escala real foram moldados 12 postes, tipo duplo T com 9 metros de comprimento, empregando 5 traços com características distintas. Os postes foram avaliados seguindo a metodologia e requisitos da NBR 8451-1 (ABNT, 2011), parâmetros de resistência mecânica do concreto e penetração de íons cloreto ASTM C1202 (2012). Por meio da análise dos resultados, é apresentado o traço indicado para produção de postes de concreto armado, onde foi possível aprimorar o traço atualmente produzido pela empresa, reduzindo o consumo de cimento de 429 kg/m<sup>3</sup> para 351 kg/m<sup>3</sup> e reduzindo a taxa de penetração de íons cloreto e aumentando a vida útil do poste de concreto armado de 10 para 60 anos. À vista disso, foi possível aumentar a vida útil do elemento, mesmo com a redução do consumo de cimento e o custo para a produção do traço de concreto.

**Palavras-chaves:** poste; postes de concreto armado; vida útil; estruturas de concreto armado; dosagem de concreto.

## ABSTRACT

REGINATO, L. A. Optimization of concrete mixtures: study applied to reinforced concrete poles aiming to increase service life.. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Electricity is undoubtedly an indispensable resource for modern society. The same has revolutionized the way of life of the human being in all aspects and substantially improved their quality of life. The distribution of electricity is up to the Electric Power System - EPS, basically divided into three macro sectors: generation, transmission and distribution. Electricity is actually delivered to consumers by the distribution system, consisting mainly of overhead lines supported by pylons, these mostly made of reinforced concrete. Given the adequate supply of electricity to society, it is necessary to ensure the power distribution lines, in which the poles play a fundamental role. It is understood that increasing the useful life of reinforced concrete poles can contribute to the reduction of maintenance of the distribution network, reducing investment in replacements or repairs on poles by concessionaires. Thus, this paper proposes the optimal trait used in the production of reinforced concrete poles on a firm concrete artifacts, seeking the life of it. For both studies were performed in order to improve the composition of households, adding pozzolanic material, adding fiber and use of superplasticizers additives. For analysis of traces in real scale 12 posts, T type double with 9 feet long, employing five traits were shaped with distinct characteristics. The posts were evaluated following the methodology and requirements of NBR 8451-1 (ABNT, 2011), the mechanical response of concrete and chloride ion penetration ASTM C1202 (2012). By analyzing the results, the dash indicated for production of reinforced concrete poles, where it was possible to improve the trace currently produced by the company, reducing the cement content of 429 kg / m<sup>3</sup> to 351 kg / m<sup>3</sup> and reducing the rate appears penetration of chloride ions and increasing the service life of reinforced concrete post 10 to 60 years. In view of this, it was possible to extend the life of the element, even with the reduction in cement consumption and the cost for the production of concrete mix.

**Key-words:** pole poles of reinforced concrete service life; reinforced concrete structures; concrete mix design.

# SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>10</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1 CONTEXTO.....	18
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA .....	19
1.3 QUESTÃO DE PESQUISA.....	20
1.4 OBJETIVOS .....	20
1.5 LIMITAÇÕES .....	21
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>23</b>
2.1 PAPEL DOS POSTES NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA .....	23
2.1.1 Postes de madeira.....	25
2.1.2 Postes poliméricos .....	26
2.1.3 Postes de concreto armado.....	27
2.2 POSTES DE CONCRETO ARMADO.....	27
2.2.1 Necessidades e oportunidades de aperfeiçoamento dos traços de postes de concreto armado..	28
2.2.2 Influência da forma de produção .....	28
2.2.3 Influência da geometria.....	29
2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE DURABILIDADE DE POSTES DE CONCRETO ARMADO	29
2.3.1 Durabilidade de estruturas de concreto armado .....	30
2.3.2 Previsão de vida útil de estruturas de concreto armado .....	32
2.3.3 Requisitos de durabilidade para postes de concreto armado .....	33
2.4 ALTERNATIVAS DE APERFEIÇOAMENTO DE TRAÇOS PARA POSTES DE CONCRETO ARMADO .....	36
2.4.1 Dosagem de Concreto .....	36
2.4.2 Métodos de Dosagem.....	39
2.4.3 Aprimoramento da composição de traços de concreto.....	43
2.4.4 Adição de mineral suplementar.....	47
2.4.5 Adição de Fibras .....	49
2.5 CONCLUSÕES .....	52

<b>3</b>	<b>MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	53
3.2	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	57
3.2.1	Cimento.....	57
3.2.2	Cinza de casca de arroz (CCA).....	58
3.2.3	Agregados miúdos .....	59
3.2.4	Agregados graúdos.....	60
3.2.5	Aditivos superplastificantes .....	62
3.2.6	Fibra.....	62
3.3	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DOS CONCRETOS .....	63
3.3.1	Trabalhabilidade .....	63
3.3.2	Resistência à compressão.....	64
3.3.3	Resistência à tração.....	64
3.4	ENSAIOS NO ELEMENTO EM ESCALA REAL.....	65
3.4.1	Inspeção geral .....	65
3.4.2	Flexão, elasticidade e ruptura.....	67
3.4.3	Extração de testemunhos.....	74
3.4.4	Resistência à compressão.....	75
3.4.5	Absorção .....	76
3.4.6	Penetração de íons cloreto.....	76
3.4.7	Estimativa da profundidade carbonatada e considerações sobre a vida útil de projeto.....	78
<b>4</b>	<b>ESTUDOS PRELIMINARES.....</b>	<b>80</b>
4.1	INFLUÊNCIA DA UMIDADE DOS AGREGADOS.....	80
4.2	CONDIÇÕES DE CURA .....	82
4.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ÁGUA DE AMASSAMENTO.....	85
<b>5</b>	<b>ESTUDOS DE DOSAGEM.....</b>	<b>87</b>
5.1	COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS .....	87
5.1.1	Agregados graúdos.....	87
5.1.2	Agregados miúdos .....	90
5.2	DIAGRAMA DE DOSAGEM.....	95

5.3	DIAGRAMA DE DOSAGEM COM ADIÇÃO DE CCA.....	98
5.4	AValiação DOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES .....	101
5.5	ADICÃO DE FIBRAS.....	106
5.6	DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS PARA PRODUÇÃO EM ESCALA REAL	109
<b>6</b>	<b>ENSAIOS EM ESCALA REAL .....</b>	<b>113</b>
6.1	INSPEÇÃO GERAL.....	113
6.2	ENSAIO DE FLEXÃO.....	114
6.3	AValiação DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS .....	118
6.4	AValiação DA RELAÇÃO A/C FRENTE AOS REQUISITOS DE DURABILIDADE	121
6.5	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	122
6.6	DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	123
6.7	ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE CARBONATADA E CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIDA ÚTIL DE PROJETO.....	125
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>129</b>
7.1	CONCLUSÕES FINAIS .....	129
7.1.1	Estudos preliminares .....	129
7.1.2	Estudos de dosagem.....	129
7.1.3	Ensaio em escala real .....	130
7.2	DEFINIÇÃO DO TRAÇO RECOMENDADO PARA A PRODUÇÃO DE POSTES DE CONCRETO ARMADO.....	132
7.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	132
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>133</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>139</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura básica do sistema de potência.....	24
Figura 2: Sistema de distribuição de energia.....	24
Figura 3: Sistema de distribuição de energia aéreo.....	25
Figura 4: Diagrama de dosagem.....	42
Figura 5: Influência da relação a/c e idade de cura sobre a resistência do concreto. ....	45
Figura 6: (a) Micrografia de partículas de cimento floculadas em água e (b) com presença de aditivo superplastificante .....	47
Figura 7: Difratomogramas de raios X de CAA predominantemente amorfas (a) e predominantemente cristalinas (b).....	48
Figura 8: Amostras de diferentes CCA com e sem tratamento térmico .....	49
Figura 9: Processo de fissuração no concreto.....	50
Figura 10: Comportamento de carga-deflexão de concreto convencional e reforçado do com fibras. ....	52
Figura 11: Deslocamentos e tensões durante o içamento do poste.....	54
Figura 12: Fluxograma do programa experimental. ....	55
Figura 13: Análise granulométrica do cimento utilizado .....	58
Figura 14: Análise granulométrica da cinza de casca de arroz utilizada.....	59
Figura 15: Distribuição granulométrica dos agregados miúdos .....	60
Figura 16: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos .....	61
Figura 17: Execução do ensaio de abatimento de tronco de cone.....	63
Figura 18: Execução do ensaio de resistência à compressão.....	64

Figura 19: Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	65
Figura 20: Representação das dimensões da seção transversal de base (a) e topo (b). ...	66
Figura 21: Disposição da bancada para os ensaios de flexão, elasticidade de ruptura...	67
Figura 22: Posicionamento do poste na bancada de ensaio (a) e posicionamento do carrinho de apoio (b).....	68
Figura 23: Verificação da condição e engastamento. ....	69
Figura 24: Sistema de aplicação de carga.....	70
Figura 25: (a) Posicionamento das células de cargas (b) sistema de leitura de dados. ...	70
Figura 26: Braço rígido para aplicação das cargas (a), esboço das cargas F e Fa (b). ...	71
Figura 27: Diagrama do momento fletor para carga nominal (a) e diagrama resultante para a carga F (b). ....	71
Figura 28: (a) Determinação da posição da fissura (b) e tamanho da abertura da fissura. ....	72
Figura 29: Esboço da aplicação da carga nominal (a) e posicionamento da baliza(b)...	72
Figura 30: Determinação da flecha nominal.....	73
Figura 31: Ruptura do poste. ....	73
Figura 32: (a) Posicionamento do equipamento e extração dos corpos de prova b) e corpos de prova extraídos. ....	74
Figura 33: Preparação das bases dos corpos de prova (a) e determinação da resistência à compressão (b).....	75
Figura 34: Execução do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica.....	76
Figura 35: Preparação dos corpos de prova para ensaio de penetração de íons cloreto.	77
Figura 36: Célula utilizada na migração de íons (a) e arranjo experimental (b) .....	77

Figura 37: Execução do ensaio de penetração de íons cloreto. ....	78
Figura 38: Determinação da profundidade de carbonatação. ....	79
Figura 39: Influência da umidade dos agregados na relação a/c e na resistência à compressão. ....	82
Figura 40: (a) Fontes geradoras de vapor (b) e posicionamento dos termopares. ....	83
Figura 41: Posicionamento dos corpos de prova e o do sistema de circulação de vapor. ....	83
Figura 42: Evolução da resistência à compressão para as diferentes condições de cura.	84
Figura 43: Influência da água de amassamento na resistência à compressão do concreto. ....	86
Figura 44: Passos para a determinação da massa unitária compacta. ....	88
Figura 45: Relação entre a massa unitária compacta e a porcentagem de Brita 0 da mistura. ....	89
Figura 46: Relação entre o volume de vazios e a porcentagem de Brita 0 da mistura ...	90
Figura 47: Relação entre espalhamento e a porcentagem de areia artificial. ....	92
Figura 48: Relação entre espalhamento e a resistência à compressão aos 7 dias. ....	93
Figura 49: Resistência à compressão para diferentes teores de substituição da areia natural por areia artificial. ....	95
Figura 50: Resistência à compressão em função da relação a/c. ....	97
Figura 51: Relação da resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c. ....	97
Figura 52: Diagrama de dosagem em função da tração por compressão diametral. ....	98
Figura 53: Resistência à compressão em função da relação a/c com adição de CCA. ....	99



Figura 54: Relação da resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c com adição de CCA.....	100
Figura 55: Diagrama de dosagem em função da tração por compressão diametral com adição de CCA.....	101
Figura 56: Resistência à compressão para os três aditivos analisados. ....	103
Figura 57: Resistência à compressão aos 28 dias para os aditivos analisados. ....	103
Figura 58: Resistência à tração por compressão diametral para os três aditivos analisados. ....	105
Figura 59: Resistência à tração por compressão diametral para os três aditivos analisados a 6 horas. ....	105
Figura 60: Traço com 1% de fibra com brita 1.....	107
Figura 61: Traço com 1% de fibra e somente com brita 0. ....	108
Figura 62: Resistência à compressão dos traços utilizados na produção dos postes de concreto armado. ....	111
Figura 63: Estimativa de custo do material para a produção dos traços, expressa em unidades monetárias (R\$/m <sup>3</sup> ).....	112
Figura 64: Flecha nominal para cada um dos postes analisados. ....	114
Figura 65: Flecha residual para cada um dos postes analisados.....	115
Figura 66: Número de abertura de fissuras para cada um dos postes analisados. ....	116
Figura 67: Porcentagem da abertura de fissuras em função do tamanho da abertura. .	117
Figura 68: Carga de ruptura para cada um dos postes moldados. ....	117
Figura 69: Resistência à compressão média para corpos de prova extraídos e moldados. ....	120
Figura 70: Resistência à compressão para os corpos de prova extraídos e moldados..	120

Figura 71: Relação água/aglomerante para cada poste moldado.....	121
Figura 72: Absorção de água para cada poste moldado. ....	122
Figura 73: Penetração de íons cloreto para cada um dos postes moldados. ....	124
Figura 74: Estimativa da vida útil para os traços dos postes. ....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	34
Tabela 2: Requisitos para concreto, em condições especiais de exposição.....	34
Tabela 3: Requisitos para concretos expostos a soluções contendo sulfatos .....	34
Tabela 4: Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto.....	35
Tabela 5: Teores de absorção de água para postes de concreto armado.....	35
Tabela 6: Exemplos de resistências obtidas com o uso de aditivo superplastificante....	46
Tabela 7: Caracterização química do cimento.....	57
Tabela 8: Caracterização física do cimento .....	57
Tabela 9: Características físico-químicas da CCA utilizada .....	58
Tabela 10: Características físicas e granulométricas dos agregados miúdos .....	60
Tabela 11: Características físicas e granulométricas dos agregados graúdos .....	61
Tabela 12: Características dos aditivos utilizados.....	62
Tabela 13: Características técnicas da fibra utilizada.....	62
Tabela 14: Dimensões do poste utilizado suas respectivas tolerâncias. ....	66
Tabela 15: Propriedades e características do traço utilizado nos estudos preliminares.	80
Tabela 16: Composição e propriedades dos traços com a correta e incorreta aferição da umidade dos agregados.....	81
Tabela 17: Resistência à compressão em relação ao teor de umidade dos agregados....	81
Tabela 18: Resistência à compressão em diferentes idades para cura ambiente e à vapor. .....	84
Tabela 19: Análise de variância entre os tipos de água utilizadas.....	86

Tabela 20: Proporções entre brita 1 e brita 0 utilizadas no empacotamento dos agregados graúdos .....	88
Tabela 21: Proporções entre areia média e areia artificial, utilizadas para a composição dos agregados miúdos.....	91
Tabela 22: Resultados das combinações entre areia natural e artificial. ....	91
Tabela 23: Análise de variância para a substituição da areia natural pela areia artificial. ....	93
Tabela 24: Resistência à compressão para diferentes teores de areia artificial. ....	94
Tabela 25: Análise de variância para a substituição da areia natural pela areia artificial em concreto.....	94
Tabela 26: Composição dos traços utilizados na confecção do diagrama e dosagem....	96
Tabela 27: Composição dos traços utilizados na confecção do diagrama e dosagem com adição de CCA.....	99
Tabela 28: Composição dos traços utilizados na avaliação dos aditivos superplastificantes. ....	101
Tabela 29: Resistência à compressão para os três aditivos analisados, com seus respectivos teores.....	102
Tabela 30: Análise de variância da resistência à compressão para os aditivos analisados, em diferentes idades. ....	102
Tabela 31: Resistência à tração por compressão diametral para os três aditivos analisados, com seus respectivos teores. ....	104
Tabela 32: Análise de variância da resistência à compressão por compressão diametral para os aditivos analisados, em diferentes idades.....	104
Tabela 33: Composição unitária e características dos traços utilizados no estudo das fibras. ....	107

Tabela 34: Descrição dos traços utilizados na produção dos postes de concreto armado. .....	109
Tabela 35: Identificação de todos os postes moldados com seu respectivo traço utilizado. ....	110
Tabela 36: Tempos de concretagem para cada um dos traços utilizados na produção dos postes. ....	111
Tabela 37: Resistência à compressão dos corpos de prova extraídos. ....	119
Tabela 38: Análise de variância da resistência à compressão para os corpos de prova moldados e extraídos. ....	119
Tabela 39: Profundidade de carbonatação. ....	125
Tabela 40: Valores do coeficiente de migração. ....	126
Tabela 41: Vida útil dos postes de concreto armado. ....	127



# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo expor o escopo desta dissertação, apresentando, primeiramente, o contexto no qual se insere esta pesquisa, bem como ilustrar os problemas acerca do tema, que possibilitou a formulação da questão de pesquisa. Além disso, são apresentados os objetivos, a limitação e estruturação do presente trabalho.

## 1.1 CONTEXTO

No cenário atual, a energia elétrica é indispensável para a sociedade moderna e seu uso deve-se principalmente ao baixo custo, facilidade de produção e transporte. Neste aspecto, a eletricidade foi responsável por revolucionar o modo de vida do ser humano em todos os aspectos, melhorando significativamente sua qualidade de vida.

O aumento da demanda por energia elétrica nas últimas décadas, ligado ao crescimento das unidades consumidoras, tonaram a operação e o controle dos sistemas elétricos uma tarefa complexa. Esta incumbência cabe ao Sistema Elétrico de Potência - SEP, o qual se divide basicamente em três macro setores: geração, transmissão e distribuição (GARCIA; DUZZI JR, 2012; TOSTES, 2012).

O SEP baseia-se em grandes usinas de geração energética, conduzindo a energia através das linhas de transmissão que, posteriormente, é disseminada para o sistema de distribuição de energia (LEÃO, 2009). Dentro do sistema de distribuição, de competência das concessionárias de energia elétrica, a energia é efetivamente entregue aos consumidores, conectando-os à rede elétrica pelas redes de distribuição. Estas são principalmente formadas por redes aéreas sustentadas por postes, no Brasil (ABRADEE, 2014; GARCIA; DUZZI JR, 2012).

Os postes são produzidos com diversos materiais e formatos, sendo que entre os materiais utilizados na produção de postes, destacam-se a madeira, os polímeros e o concreto armado.

Devido à constante otimização tecnológica, o baixo custo e a facilidade de produção, o concreto armado tornou-se o material mais utilizado na produção de postes para as linhas de

distribuição de energia elétrica, sendo empregado principalmente na substituição aos postes de madeira.

Inicialmente acreditava-se que os postes de concreto armado teriam durabilidade ilimitada, não requerendo manutenção (GIACON JÚNIOR, 2009). Entretanto, essas características não são encontradas em nenhum material construtivo, sendo que todos sofrem desgaste e perdem resistência ao longo do tempo. Sendo assim, a durabilidade dos postes de concreto armado depende diretamente dos materiais, das características de projeto e dos cuidados envolvidos na sua produção.

Tendo em vista a importância dos postes de concreto armado no sistema de distribuição de energia, faz-se necessário que estes assegurem o fornecimento adequado de eletricidade à sociedade e atendam a exigência quanto à vida útil, evitando problemas no fornecimento de energia, bem como danos materiais e humanos em virtude de um eventual colapso desses elementos.

Considerando-se os custos gerados pela manutenção e substituição dos postes de concreto armado nas linhas de distribuição, devido à baixa durabilidade relacionada ao concreto utilizado na moldagem desses elementos, desenvolveu-se um estudo em conjunto com uma concessionária responsável pela distribuição de energia elétrica no estado do Rio Grande do Sul.

O presente estudo foi desenvolvido em uma empresa de artefatos de concreto, sendo esta a fornecedora dos postes para a concessionária de energia. O objetivo primeiro foi aperfeiçoar o traço de concreto atualmente utilizado pela empresa produtora dos postes, visando melhorar, principalmente, os aspectos relacionados à durabilidade dos mesmos. Em vista disso, analisou-se além das propriedades dos traços, o elemento em escala real, seguindo as respectivas exigências normativas para cada parâmetro analisado.

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Para garantir o adequado fornecimento de energia elétrica à sociedade brasileira é necessário assegurar as linhas de transmissão e distribuição, nas quais os postes exercem papel fundamental. Entende-se que o aumento da vida útil e da confiabilidade é possível a partir da introdução de novas tecnologias e estratégias de produção de postes de concreto, que podem



colaborar para a redução da manutenção, para o aumento da vida útil e para a satisfação dos usuários. Tal ocorrência reduz os investimentos em substituições ou reparos em postes de concreto por parte das concessionárias, o que influencia diretamente o custo da energia elétrica. Neste sentido, a utilização de materiais alternativos possibilita a produção de postes mais resistentes a impactos, mais sustentáveis ambientalmente e menos sujeitos à deterioração.

### 1.3 QUESTÃO DE PESQUISA

A partir dos aspectos anteriormente expostos, é proposta a seguinte questão de pesquisa:

É possível aprimorar o traço de concreto para utilização em postes, sem aumentar substancialmente os custos, visando o aumento da durabilidade e os requisitos de desempenho mecânico deste elemento?

### 1.4 OBJETIVOS

A dissertação tem como objetivo principal aprimorar o traço de concreto atualmente utilizado para produção de postes em uma empresa de artefatos de concreto do Rio Grande do Sul, visando o aumento da vida útil.

Como objetivos específicos têm-se:

- a) Definir a proporção dos agregados graúdos brita 1 e brita 0 e miúdos areia natural e areia artificial, para composição do traço de concreto;
- b) Compor diagramas de dosagem para traços com adição mineral suplementar de Cinza de Casca de Arroz e sem adição;
- c) Analisar a adição de fibra de polipropileno no concreto em termos de benefícios quanto à durabilidade e desempenho mecânico do material;
- d) Verificar a eficiência dos traços analisados em ensaios específicos de laboratório realizados em corpos de prova de concreto e em escala real.

## 1.5 LIMITAÇÕES

Este trabalho abrange o aperfeiçoamento do traço de concreto com os agregados atualmente utilizados pela empresa produtora, portanto não foi realizado um estudo com agregados de outra origem. Referente ao tipo de cimento, será utilizado cimento Portland tipo CPV e alta resistência inicial, sendo atualmente utilizado pela empresa na produção dos postes de concreto armado.

Quanto à adição mineral suplementar, foi analisado apenas traços com adição de Cinza de Casca de Arroz (CCA), não avaliando a influência de outras adições. A definição da CCA deu-se através de estudos prévios a este trabalho, juntamente pelo fato da CCA ser obtida no próprio estado, reduzindo assim custos com transporte e maior disponibilidade na região de estudo.

Será estudada apenas a adição de fibra de polipropileno estrutural, não utilizando outro tipo de material constituinte. Optou-se pela utilização desta, por não apresentar-se como fonte de propagação de corrosão quando exposta à superfície do elemento.

Serão analisados em escala real somente postes do tipo duplo T com 9,00 metros de comprimento e carga nominal de 300 daN (deca Newtons). Foi determinado esse tipo de poste por representar a maior parcela da produção da empresa. No ensaio de flexão o poste será avaliado perante os requisitos normativos somente no sentido de maior inércia (Face A), devido a limitações de produção destes elementos.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa organiza-se em sete capítulos, sendo que:

Inicialmente, no primeiro capítulo, foi apresentada a contextualização do tema, o problema e questão de pesquisa, os objetivos e limitações.

No segundo capítulo, é apresentado o referencial teórico necessário para a realização do estudo. Assim, o capítulo subdivide-se em: 1) Papel dos postes no sistema de distribuição de energia; 2) Postes de concreto armado; 3) Considerações sobre durabilidade de postes de concreto armado e 4) Alternativas de aperfeiçoamento de traços para postes de concreto armado. Com o desdobramento de todos os assuntos abordados é possível entender a função

dos postes no sistema elétrico, os requisitos de durabilidade e os possíveis pontos para o aperfeiçoamento para os traços empregados na produção desses.

O terceiro capítulo apresenta o método adotado para a realização do estudo. Assim, o mesmo está subdividido em: 1) Concepção do programa experimental e suas etapas; 2) Materiais utilizados no estudo e sua caracterização; 3) Métodos de ensaios adotados para definição dos parâmetros fundamentais do concreto e 4) Método de ensaio realizado nos postes em escala real.

O quarto capítulo apresenta e interpreta os resultados dos estudos preliminares, onde se realizaram estudos frente os seguintes parâmetros: 1) Condições de cura; 2) Influência da umidade dos agregados e 3) Influência da água de amassamento. O quinto capítulo apresenta e interpreta os resultados dos estudos de dosagem, realizados com o intuito de aperfeiçoar o traço de concreto atualmente utilizado na produção dos postes de concreto armado. Os estudos foram divididos em seis partes: 1) Composição dos agregados; 2) Confecção do diagrama de dosagem; 3) Confecção do diagrama de dosagem com adição de CCA; 4) Avaliação dos aditivos superplastificantes; 5) Adição de fibras; e por fim 6) Definição dos traços a serem empregados na produção dos postes de concreto armado em escala real.

O sexto capítulo apresenta e interpreta os resultados dos ensaios realizados nos postes em escala real, sendo esses avaliados quanto: 1) Inspeção geral; 2) Ensaio de flexão; 3) Resistência à compressão de testemunhos extraídos; 4) Relação água/cimento frente aos requisitos de durabilidade; 5) Absorção de água; 6) Penetração de íons cloreto e 7) estimativa da profundidade carbonatada e vida útil de projeto dos postes de concreto armado.

Por fim, o capítulo sete apresenta as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento deste trabalho, apontando os resultados obtidos em relação ao objetivo traçado, bem como a definição do traço aprimorado para a produção de postes de concreto armado. Este capítulo expõe, ainda, as sugestões para futuros trabalhos visando dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com a constante otimização tecnológica do concreto armado, a produção de postes de concreto para linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica vem crescendo substancialmente, principalmente no que diz respeito à substituição dos postes de madeiras por postes de concreto.

Todavia, um dos principais pontos para que seja garantida a viabilidade da substituição dos postes de madeira por postes de concreto é garantia do prolongamento da vida útil destes elementos e, conseqüentemente, a manutenção dos mesmos. Neste sentido, alguns pontos devem ser mais bem analisados durante o projeto e produção, com o intuito de assegurar e prolongar a vida útil.

Os itens a seguir visam apresentar pontos relevantes para que seja garantida ou aumentada a vida útil dos postes de concreto armado, juntamente com as oportunidades para aperfeiçoamentos dos traços de concreto.

### 2.1 PAPEL DOS POSTES NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

O sistema de distribuição de energia elétrica é um segmento do sistema elétrico de potência (SEP), o qual pode ser dividido basicamente em três macros setores: geração, transmissão e distribuição (GARCIA; DUZZI JR, 2012; TOSTES, 2012). Estes sistemas devem ter em vista certos padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos (LEÃO, 2009).

O SEP vigente baseia-se em grandes usinas de geração energética, conduzindo a energia através das linhas de transmissão, e posteriormente a disseminando para o sistema de distribuição de energia, conforme apresentado na Figura 1 (LEÃO, 2009).

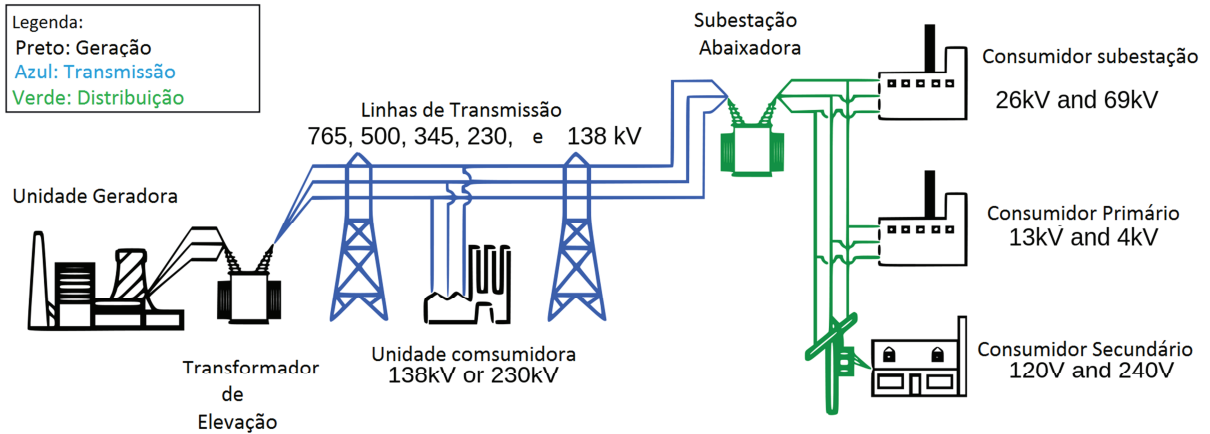


Figura 1: Estrutura básica do sistema de potência.

(Fonte: adaptado de UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2004)

O sistema de distribuição, conforme Tostes (2012), compreende a distribuição de energia desde a subestação abaixadora até os pontos de consumo, conectando-se fisicamente ao sistema de transmissão. Essencialmente, o sistema de distribuição divide-se em duas partes: a rede primária e a rede secundária, as quais podem ser observadas na Figura 2 (ABRADEE, 2014).

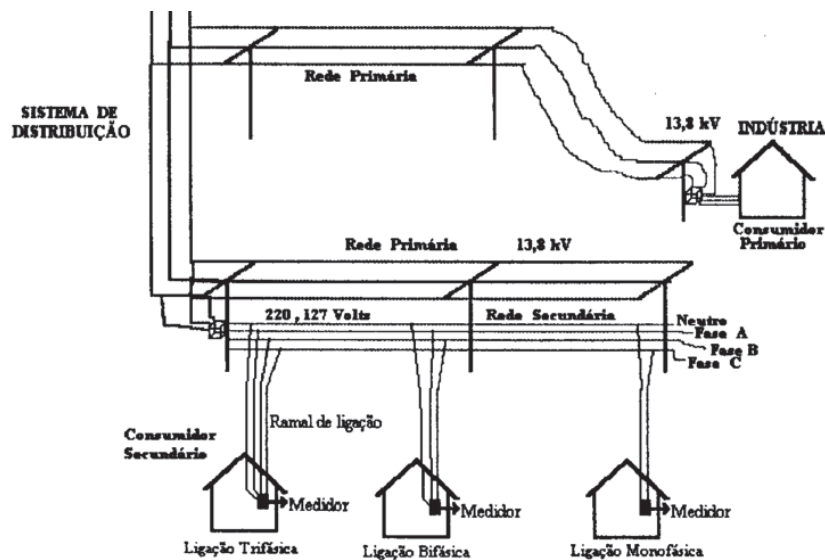


Figura 2: Sistema de distribuição de energia.

(Fonte: adaptado de TOSTES, 2012)

A rede primária compreende a ligação entre a subestação de distribuição e os alimentadores primários, também denominada de rede de média tensão, que varia entre 2,3 e 44 kV. Já a rede secundária é formada pelos transformadores, pelos alimentadores secundários e pelos

ramais de serviço ou de ligação. Essa pode ser designada como rede de baixa tensão, que varia entre 110 e 440 V (ABRADEE, 2014; TOSTES, 2012).

Deste modo, a energia distribuída é efetivamente entregue aos consumidores, que estão conectados à rede elétrica pelas redes de distribuição. Essas podem ser aéreas, sustentadas por postes, ou subterrâneas por meio de dutos (ABRADEE, 2014; GARCIA; DUZZI JR, 2012a).

No sistema aéreo de distribuição, as redes primárias são frequentemente compostas por três fios condutores, sustentados por cruzetas na parte superior do poste, conforme a Figura 3 (ABRADEE, 2014). As redes secundárias localizam-se no poste que sustenta a rede primária, entretanto, a uma altura inferior a da rede de média tensão como apresentado na Figura 3.

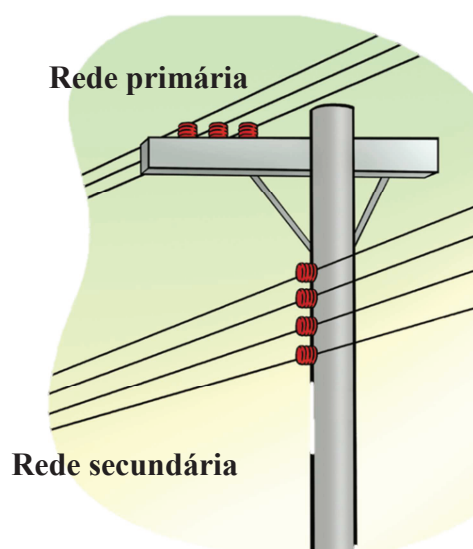


Figura 3: Sistema de distribuição de energia aéreo.

(Fonte: ABRADEE, 2014)

O sistema de distribuição de energia aéreo, como já citado, é sustentado por elementos denominados postes, que são produzidos de diversos materiais e formatos. Com relação aos materiais utilizados na produção dos postes, destacam-se a madeira, o polimérico e o concreto armado. Esses encontram-se descritos nos itens a seguir.

### 2.1.1 Postes de madeira

Segundo Arruda (2006), os postes de madeira são utilizados há mais de um século na América do Norte, para suportar linhas elétricas e telefônicas. Inicialmente, os postes eram feitos de madeiras oriundas de espécies nativas, mais duráveis e não recebiam nenhum tipo de

tratamento. O sistema se expandiu rapidamente, devido à disseminação do telégrafo, do telefone e da energia elétrica. Os postes de madeira de reflorestamento começaram a se desenvolver, principalmente, com a utilização de postes de madeira de eucalipto (GERALDO, 2001).

As madeiras de reflorestamento possuíam boas propriedades mecânicas, mas geralmente limitavam-se no quesito de durabilidade natural, fazendo-se necessário um tratamento complementar. Na tentativa de aumentar a vida útil dos postes, em 1945, surgiu a primeira usina brasileira para tratamento desta madeira de reflorestamento, o que intensificou a utilização desses postes no final do século passado (GERALDO, 2001).

Quanto à estimativa da vida útil de postes de eucaliptos, Arruda (2006) ressalta que esses tem uma expectativa de vida média de 35 anos quando submetidos a um tratamento preservativo adequado, sendo essa comumente utilizada no projeto de postes.

Segundo Geraldo (2001), desde então, a crescente utilização dos postes de madeira tratada tem-se justificado pelo fato dela ser um material de alta durabilidade, de fácil transporte e instalação, de bom desempenho mecânico, de elevado potencial como isolante elétrico, entre outros aspectos positivos.

### 2.1.2 Postes poliméricos

Os postes poliméricos começaram a ser utilizados nos anos de 1960, no Havaí, como alternativa à degradação dos postes de madeira e corrosão dos postes metálicos pelo ambiente agressivo (SARMENTO; LACOURSIERE, 2006).

A utilização de postes poliméricos vem crescendo atualmente, tanto para linhas de transmissão, distribuição de energia e iluminação. Este crescimento está principalmente ligado à elevada relação de resistência e peso dos postes poliméricos, não condutividade elétrica do material, resultando em maior segurança e vida útil elevada (SARMENTO; LACOURSIERE, 2006).

Entretanto, um dos problemas relativos à utilização de postes poliméricos é que a intensiva exposição a raios ultravioletas (UV) pode causar a degradação precoce do elemento. A vida útil de postes poliméricos é tipicamente estimada em 65 anos, porém com a utilização de resinas resistente aos raios UV, está pode se aproximar aos 80 anos (SARMENTO; LACOURSIERE, 2006; TORRES, 2012).

Um dos problemas dos postes poliméricos está ligado ao custo, que é cerca de duas vezes o valor dos postes de concreto armado. Todavia, o elevado custo é compensado em longo prazo, conforme Torres (2012).

### 2.1.3 Postes de concreto armado

O uso mais intensificado dos postes de concreto armado deu-se, principalmente, pela deficiência da durabilidade dos postes de madeira, que apresentavam problemas de deterioração precoce. Houve, então, um acelerado desenvolvimento dos postes de concreto armado, que possuíam grande expectativa de durabilidade e de resistência (GIACON JÚNIOR, 2009).

De acordo com de Sá e Lenzi (2003), a produção de postes de concreto armado iniciou-se no final do século 19, na França. Em 1924, na Bélgica, já se produzia postes de concreto armado com 20 m de altura. No Brasil, a fabricação de postes de concreto armado iniciou-se em 1940, ano em que foi fundada a primeira fábrica de postes brasileira, a Cavan, em Osasco, na grande São Paulo (De SÁ; LENZI, 2003).

Para um melhor entendimento sobre os postes de concreto armado, demais características, como as formas de produção, os formatos e outras considerações sobre esses elementos estão descritas no item abaixo (item 2.2).

## 2.2 POSTES DE CONCRETO ARMADO

Os postes de concreto armado são definidos como elementos pré-fabricados de concreto, classificados em função do formato, do comprimento e da resistência (ABNT, NBR 8451-1, 2011). Deste modo, os postes de concreto armado são elementos estruturais empregados em linhas aéreas de transmissão ou de distribuição de energia elétrica, além disso, podem ser utilizados também como suporte para a iluminação de vias públicas.

Segundo Giacon Júnior (2009), acreditava-se, inicialmente, que os postes de concreto armado não precisavam de manutenção, que teriam uma durabilidade ilimitada. Porém, essas características não são encontradas em nenhum material construtivo, pois todos desgastam-se e perdem resistência ao longo do tempo. Além disso, a durabilidade dos postes de concreto armado é dependente dos materiais, das características, das propriedades, dos cuidados envolvidos na produção dos mesmos e também das condições ambientais.



Deste modo, as oportunidades para o aperfeiçoamento dos postes de concreto armado, visando à durabilidade, podem ser identificadas no decorrer do ciclo produtivo, identificando-se os passíveis pontos e necessidades de aperfeiçoamento.

### 2.2.1 Necessidades e oportunidades de aperfeiçoamento dos traços de postes de concreto armado

No processo produtivo dos postes de concreto armado, alguns pontos podem ser identificados como passíveis de aperfeiçoamento, tanto para a otimização dos traços, como para melhorias na durabilidade do elemento como um todo.

Com relação à otimização dos traços, no processo produtivo, os requisitos que podem ser melhorados tratam da trabalhabilidade e consistência do concreto, no estado fresco, que devem ser adequadas à linha produção.

A trabalhabilidade e a consistência do concreto estão ligadas diretamente com a quantidade de água do traço, ou a presença de aditivos químicos, dentre outros fatores. Entretanto, o uso de água em excesso pode elevar a relação a/c (água/cimento), diminuindo assim, a resistência mecânica do concreto e a durabilidade, apesar da mistura apresentar uma trabalhabilidade adequada. Para isso faz-se o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes, a fim de melhorar a trabalhabilidade sem prejudicar a resistência e a durabilidade do concreto (HELENE, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Outro ponto passível de aperfeiçoamento é utilização de métodos de dosagem, visando a melhor composição e proporção dos materiais no traço do concreto, contribuindo, para a redução do consumo de cimento e otimização do pacote granulométrico da mistura. Os métodos de dosagem e aprimoramentos da composição de traços de concreto estão descritos no item 2.4.

### 2.2.2 Influência da forma de produção

A produção de postes de concreto armado dá-se de duas formas distintas: convencional (processo vibrado) ou centrifugados. No processo convencional, a moldagem dos postes é executada por vibração, por meio de vibradores acoplados externamente à forma ou por vibradores de imersão (De SÁ; LENZI, 2003). Entretanto, caso se utilize Concreto Auto Adensável (CAA), o adensamento por vibração é dispensado.

No processo de centrifugação, o adensamento do concreto é executado pela rotação do molde do poste em torno do seu eixo longitudinal, gerando desta forma, uma força centrífuga adensando o concreto. O processo é realizado preenchendo-se o molde com concreto e posicionando-o em uma centrífuga de alta rotação, comprimindo a massa do concreto contra a parede do molde, adensando-o e também eliminando o excesso de água da mistura (De SÁ; LENZI, 2003).

Dependendo do processo de produção, há a necessidade de concretos com características específicas. Na centrifugação é necessário um concreto com baixa trabalhabilidade, para evitar a segregação da mistura quando submetido ao adensamento. Já no processo convencional existe a necessidade de um concreto com uma maior trabalhabilidade ou auto adensável. Deste modo, a fábrica e seus processos também ajudam a determinar as características do concreto a ser utilizado na moldagem dos postes de concreto armado, o qual deve ser adequado à forma de produção utilizada.

### 2.2.3 Influência da geometria

Referente à geometria dos postes de concreto armado, a (ABNT, NBR 8451-1, 2011) define três tipos: seção circular vazada, seção duplo T e seção retangular.

Postes de seção circular vazada têm conformação tronco-cônica e podem ser produzidos pelo processo de centrifugação ou convencional. No processo convencional, a seção vazada é realizada com a utilização de mandris metálicos que são retirados após ou durante o processo de cura. Pela centrifugação, o próprio processo produz a seção vazada (De SÁ; LENZI, 2003).

Postes de seção duplo T, possuem sua seção em “H” e conformação tronco-piramidal, usualmente são moldados pelo processo convencional. Os postes de seção retangular possuem também uma geometria tronco-piramidal, porém podem ou não possuir a seção vazada, sendo o processo produtivo semelhante aos postes de seção circular vazada.

## 2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE DURABILIDADE DE POSTES DE CONCRETO ARMADO

Em decorrência dos crescentes problemas de degradação precoce em estruturas de concreto, observa-se uma tendência mundial no sentido de privilegiar os aspectos de projeto voltados à

durabilidade e à extensão da vida útil das estruturas de concreto armado e protendido (CLIFTON, 1993).

### 2.3.1 Durabilidade de estruturas de concreto armado

No âmbito de privilegiar a vida útil e a durabilidade de estruturas de concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2007, p. 13) define que durabilidade “consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas [...]”. Assim, a referida recomendação normativa prescreve que as estruturas de concreto devem ser projetadas e executadas segundo condições ambientais previstas em projeto, conservando sua estabilidade e aptidão durante o período correspondente à sua vida útil.

A vida útil de uma estrutura representa o período efetivo de tempo, durante o qual uma estrutura, ou qualquer um de seus componentes, satisfaçam os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo (ISO 13823, 2008).

Logo, a vida útil deve ser tratada em pelo menos três aspectos, definidos pela FIB (2006) em:

- a) Métodos de introdução ou verificação da vida útil no projeto;
- b) Procedimentos de execução e controle de qualidade;
- c) Procedimentos de uso, operação e manutenção.

Frente à estimativa da vida útil, a evolução nos estudos de durabilidade das estruturas de concreto armado possibilitou estimar esse parâmetro, principalmente devido ao avanço no conhecimento sobre os mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos. Desta forma, foi possível associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos. Como resultado, a avaliação da vida útil passou a ser expressa em números de anos, e não apenas em critérios qualitativos de adequação da estrutura a um determinado grau de exposição (HELENE, 2004; MEDEIROS *et al.* 2011).

Segundo Helene (2004) a estimativa da vida útil de estruturas de concreto pode ser efetuada através de diferentes métodos: **experiências anteriores, ensaios acelerados, enfoque determinista, enfoque estocástico ou probabilista.**

Desde as primeiras normas sobre estruturas de concreto armado a questão da durabilidade tem sido introduzida de forma subjetiva, sugerindo avaliações de forma qualitativa. Basicamente são especificadas determinadas exigências construtivas, a fim de assegurar a durabilidade das

estruturas (HELENE, 2004). Essas características, conferem ao método baseado em **experiências anteriores**, sendo este adotado como principal ferramenta pela NBR 6118 (ABNT, 2007) para estimar a durabilidade e assegurar a vida útil. Assim, esta exige cobrimentos mínimos e qualidades mínimas para o concreto, além do consumo de cimento, relação a/c máxima, dentre outros (MEDEIROS *et al.* 2011).

A NBR 8451-1 (ABNT, 2011) baseia-se nestes requisitos para assegurar a durabilidade dos postes de concreto armado e protendido, não introduzindo outros métodos mais específicos para a previsão de vida útil no projeto destes elementos. A mesma apenas exige uma vida útil para o elemento de 35 anos, não admitindo falhas de fabricação nos primeiros 5 anos.

Os demais métodos baseiam-se em determinados parâmetros, a fim de estimar a vida útil das estruturas de concreto. O método com base em **ensaios acelerados** pode ser usado para estimar a vida útil, porém o mecanismo de degradação no ensaio acelerado difere das condições reais (MEDEIROS *et al.* 2011).

**Os métodos determinísticos**, por sua vez, são métodos que utilizam uma função de durabilidade de referência para a determinação da vida útil de um elemento. É posteriormente modificada através de fatores que traduzem as suas condições de serviço expectáveis (SOUSA, 2008).

Os métodos mais avançados são os baseados em **modelos probabilísticos** que têm geralmente como base o cálculo matricial ou probabilístico. Para Sousa (2008, p. 18) este método define “a probabilidade de ocorrência de uma mudança de estado de elemento, procurando assim, ultrapassar a incerteza relacionada com as suas formas de degradação e a própria irreversibilidade das respectivas condições de serviço”.

Através da utilização de métodos para estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado, pode-se fazer uso de projetos de estruturas visando à durabilidade e à vida útil, realizando-se com um nível aceitável de confiabilidade, sendo admissível o uso de uma abordagem subjetiva. As recomendações normativas fornecem apenas definições qualitativas de exposição, não definindo a vida de projeto em relação à durabilidade. Em particular, as recomendações normativas não conseguem definir e quantificar os estados limites de durabilidade que devem ser ultrapassados para que a vida útil de projeto seja determinada (ROSTAM, 2005).

As abordagens anteriores não reconhecem que, em relação à durabilidade, não são as propriedades dos materiais ou componentes isoladamente que definem o desempenho, mas o estado da estrutura no seu meio ambiente como um todo, e a sua necessidade individual para intervenção. Esse desempenho pode ser definido por requisitos funcionais, tais como a adequação aos fins, que inclui questões como deformações, fissuras e *spalling*<sup>1</sup>, vibrações, e integridade estrutural (ROSTAM, 2005).

Quanto a projetos de durabilidade que levam em consideração os requisitos funcionais supracitados, os procedimentos para a elaboração de projetos de estruturas baseados na durabilidade são apresentados por Sarja (2000), na seguinte sequência:

1. Especificação da vida serviço e da vida útil do projeto;
2. Análise dos efeitos ambientais;
3. Identificação de fatores de durabilidade e mecanismos de degradação;
4. Seleção de um modelo de cálculo de durabilidade para cada mecanismo de degradação;
5. Cálculo de parâmetros de durabilidade, utilizando modelos de cálculo disponíveis;
6. Possível atualização dos cálculos do projeto estrutural;
7. Transferência da durabilidade e parâmetros para o projeto final.

Tendo em vista que a deterioração das estruturas de concreto armado é afetada diretamente pelo ambiente em que está localizada, medidas adequadas devem ser estudadas quando se almeja a durabilidade da estrutura. Assim, a utilização de materiais que proporcionam maior durabilidade deve ser considerada na estratégia global. Também deve-se considerar durante o projeto, a manutenção da estrutura, a qual deve ser prevista para inspeção, intervenção e possível substituição da estrutura (FOLIC, 2009).

### 2.3.2 Previsão de vida útil de estruturas de concreto armado

Como citado no item anterior (2.3.1), a previsão, ou estimativa, da vida útil de estruturas de concreto armado pode ser realizada por quatro métodos baseados em: experiência anteriores; ensaios acelerados; enfoque determinista e enfoque probabilista.

Devido ao avanço científico sobre os mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos nos meios porosos do concreto possibilitou uma evolução nos estudos sobre a durabilidade,

---

<sup>1</sup> Deslocamento do concreto devido a uma compressão acentuada resultante da pressão do vapor de água.

possibilitando associar o tempo aos modelos matemáticos, tornando possível a estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado (HELENE, 2004; MEDEIROS *et al.* 2011).

Um dos métodos mais difundidos, para estimativa da vida útil, trata-se no método com enfoque determinista que baseia-se nos mecanismos de transporte de gases, de fluidos e de íons através dos poros do concreto. O método determinístico possui dois modelos de previsão: até da despassivação a armadura (termodinâmica da corrosão) e após a despassivação da armadura (cinética da corrosão) (HELENE, 2004; MEDEIROS *et al.* 2011).

Os modelos de previsão até despassivar a armadura baseiam-se em quatro mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto (permeabilidade, absorção capilar, difusão de gases e migração de íons) e simplifadamente podem ser expressos pela Equação 1, aonde relaciona-se a extensão do percorrida pelo agente agressivo ( $e_c$ ) em função do tempo ( $t$ ) e o coeficiente de migração ( $k$ ) que depende do mecanismo de transporte (HELEN, 1997; HELENE, 2004; MEDEIROS *et al.* 2011).

Equação 1

$$e_c = k * \sqrt{t}$$

Dessa forma, sabendo-se o cobrimento do concreto e o coeficiente de migração, dependendo do tipo de mecanismo de transporte, pode-se estimar a vida útil das estruturas de concreto armado.

### 2.3.3 Requisitos de durabilidade para postes de concreto armado

Tendo em vista que postes de concreto armado representam uma estrutura de concreto, os conceitos, métodos e procedimentos podem ser aplicados diretamente a esses elementos, desta forma a NBR 8451-1 (ABTN, 2011, p.12) define o seguinte conceito de durabilidade para os postes de concreto armado:

A durabilidade do poste de concreto é a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração; isto é, o poste de concreto deve conservar sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente pelo período de vida útil estabelecido [...]

Visando atingir a durabilidade dos postes de concreto armado, alguns parâmetros e requisitos mínimos são fixados. Entre eles, cita-se a qualidade do concreto utilizado na fabricação de

postes de concreto. A NBR 8451-1 (ABTN, 2011) define que o mesmo deve atender o prescrito na NBR 12655 (ABNT, 2006) que estabelece a correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto (Tabela 1).

Tabela 1: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de Concreto NBR 8353	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento por metro cúbico de concreto ( $\text{kg/m}^3$ )	CA e CP	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$

CA: Concreto Armado; CP: Concreto Protendido.

(Fonte: adaptado NBR 6118, ABNT, 2007)

Frente às condições especiais de exposição, os postes de concreto armado devem atender aos requisitos de durabilidade apresentados na Tabela 2, conforme a NBR 12655 (ABNT, 2006) para a máxima relação a/c e a mínima resistência característica.

Tabela 2: Requisitos para concreto, em condições especiais de exposição.

Condições de exposição	Máxima relação a/c, em massa para concreto com agregado normal	Valor mínimo de $f_{ck}$ (para concreto com agregado normal ou leve)
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água	0,50	35 MPa
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40 MPa
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,40	45 MPa

(Fonte: adaptado (NBR 12655, ABNT, 2006)

Postes de concreto expostos a solos ou soluções contendo sulfatos devem ser produzidos com cimento resistente a sulfatos e atender o estabelecido na Tabela 3, no que se refere à relação a/c e à resistência característica à compressão do concreto (NBR 12655 ABNT, 2006).

Tabela 3: Requisitos para concretos expostos a soluções contendo sulfatos

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel (SO <sub>4</sub> ) presente na água (ppm)	Máxima relação a/c, em massa, para concreto com agregado normal <sup>(1)</sup>	Mínimo f <sub>ck</sub> (para concreto com agregado normal ou leve)
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada <sup>(2)</sup>	0,10 a 0,20	150 a 1.500	0,50	35 MPa
Severa <sup>(3)</sup>	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40 MPa

<sup>(1)</sup> Baixa relação a/c ou elevada resistência podem ser necessárias para obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo;

<sup>(2)</sup> Água do mar;

<sup>(3)</sup> Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

(Fonte: adaptado NBR 12655, ABNT, 2006)

Visando a proteção das armaduras dos postes de concreto, a NBR 8451-1 (ABNT, 2011) estabelece os valores máximos da concentração de íons cloreto no concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os componentes do concreto no aporte de cloretos, os valores não podem exceder os limites apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Tipo da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl) no concreto (% sobre a massa do cimento)
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido de umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40
Outros tipos de construção com concreto armado	0,30

(Fonte: adaptado (NBR 8451-1, ABNT, 2011))

Também, tendo como foco a proteção das armaduras, a NBR 8451-1 (ABNT, 2011) limita o índice de absorção de água do concreto de acordo com as classes de agressividade ambiental, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Teores de absorção de água para postes de concreto armado.

Classe de agressividade ambiental (CCA) <sup>(1)</sup>	Resultados dos corpos de prova que compõem a amostra <sup>(2)</sup>	
	Média (%)	Individual para cada corpo de prova (%)
II	≤ 5,5	≤ 7,0
III	≤ 5,0	≤ 6,5
IV	≤ 4,0	≤ 5,5

<sup>(1)</sup> A classe de agressividade ambiental I NBR 6118 (ABNT, 2007) não se aplica a postes de concreto;

<sup>(2)</sup> Para postes de concreto protendido, o índice de absorção deve ser reduzido em 0,5% sobre os valores acima.

(Fonte: adaptado (NBR 8451-1, ABNT, 2011))

Outro requisito de durabilidade, estabelecido pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) é quanto ao cobrimento das armaduras, a qual estabelece o cobrimento mínimo das armaduras



longitudinais e transversais de 15 mm. Todavia, para postes de concreto destinados ao uso em classes de agressividade ambiental III e IV, o cobrimento da armadura deve ser no mínimo 25 mm.

Quanto às extremidades das armaduras longitudinais devem estar localizadas a 20 mm da base e do topo do poste, admitindo-se uma tolerância de + 10 mm e -5 mm (NBR 8451-1, ABTN, 2011).

## 2.4 ALTERNATIVAS DE APERFEIÇOAMENTO DE TRAÇOS PARA POSTES DE CONCRETO ARMADO

A NBR 8451-1 (ABTN, 2011) estabelece alguns requisitos mínimos para a produção de postes de concreto armado destinados a linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Estes requisitos variam principalmente de acordo com a classe de agressividade ambiental em que o elemento estará exposto.

Assim, cabe ao profissional habilitado a interpretação destes requisitos e a elaboração de materiais que sejam capazes de atingi-los. Ao mesmo tempo, o produto final deve possuir qualidade e ser competitivo economicamente. A partir destes pontos, surgem algumas lacunas para possíveis aperfeiçoamentos na produção de postes de concreto armado, com vista a atingir os requisitos mínimos exigíveis pelas regulamentações normativas e tornar o produto mais viável economicamente, mas sem prejuízos na qualidade do mesmo.

Dentro destas lacunas pode-se destacar: (1) dosagem do concreto, com a escolha adequada dos materiais componentes e suas combinações levando em consideração os requisitos exigíveis do material, bem como o método adequado para a proporção destes materiais; (2) aprimoramento da composição dos traços de concreto; (3) adição de materiais cimentícios suplementares; (4) adição de fibras na composição do concreto.

### 2.4.1 Dosagem de Concreto

A dosagem de concreto compreende os procedimentos e estudos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constituintes do concreto, também conhecido por traço de concreto (HELENE, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Todavia, a dosagem deve atingir as características e requisitos especificados, que podem incluir as propriedades do concreto no estado fresco, propriedades mecânicas no estado endurecido, além de requisitos de durabilidade (KOSMATKA *et al.* 2003). Igualmente, a dosagem deve ser realizada visando obter a mistura ideal e mais econômica, com os materiais disponíveis em uma determinada região (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Em resumo a dosagem de concreto visa selecionar as proporções ideais de cimento, água e agregados para produzir um concreto que satisfaça os requisitos de resistência, trabalhabilidade, durabilidade e economia (DAY, 1999; KONG; TARTUCE, 1989; EVANS, 1987).

#### 2.4.1.1 Requisitos para dosagem de concretos

Alguns requisitos devem ser estipulados em um estudo de dosagem, os mais usuais a serem atendidos são descritos a seguir:

- a) A **resistência mecânica** do concreto, sendo o parâmetro frequentemente mais especificado. Tradicionalmente a resistência à compressão tem sido utilizada como parâmetro principal de dosagem, principalmente pela facilidade na determinação desta e por ser uma propriedade sensível às alterações de composição da mistura, além de inferir em outras propriedades do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; TARTUCE, 1989; TUTIKIAN; HELENE, 2011).
- b) De forma geral, os concretos requerem uma determinada **trabalhabilidade**, devendo ser adequada a cada situação específica. A trabalhabilidade condiciona-se pelos projetos arquitetônicos e estruturais, equipamentos para lançamento, dentre outras condições (HELENE, 2005; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Conforme Neville e Brooks (2013), esses dois conjuntos de exigências, resistência mecânica e trabalhabilidade, tornam possível a determinação da composição da mistura. Todavia, a **durabilidade** apresenta-se como um requisito na dosagem de concretos, sendo associada aos mecanismos de transporte ou penetração de agentes agressivos em materiais porosos. Salientando, que os concretos devem ser duráveis frente às solicitações às quais será exposto durante a vida útil da estrutura (HELENE; TERZIAN, 1992; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

#### 2.4.1.2 Leis de comportamento do concreto

A partir do século XVIII, diversos estudos foram realizados, quanto ao proporcionamento dos materiais e sua influência no comportamento dos concretos (HELENE; TERZIAN, 1992; HELENE, 2005). Com base nesses estudos, foram determinados alguns fatores que regem o comportamento no estado fresco e endurecido dos concretos, que acabam sendo necessários para uma melhor utilização e interpretação dos métodos de dosagem para concretos.

Uma das maiores contribuições para o estudo de dosagem dos concretos foi publicada por Abrams (1918), que estudou um elevado número de possibilidades para traços de concreto e analisou mais de 50.000 corpos de prova, formulando a lei que ficou conhecida como **Lei de Abrams**. A referida lei expõe que a resistência aos esforços mecânicos e demais propriedades mecânicas no estado endurecido de materiais cimentícios variam inversamente à relação água/cimento (ABRAMS, 1918).

A Equação 2 expressa a formulação da Lei de Abrams, na qual a resistência do concreto em uma determinada idade ( $f_{cj}$ ) varia inversamente proporcional à relação água/cimento ( $a/c$ ), se relacionando com as constantes  $K_1$  e  $K_2$ , as quais dependem da natureza dos materiais, da idade do concreto e das condições de cura (ABRAMS, 1918).

Equação 2

$$f_{cj} = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

Na qual:

$f_{cj}$  = resistência à compressão a j dias, em MPa

$K_1$  e  $K_2$  = constantes específicas para cada conjunto dos mesmos materiais

$a/c$  = relação água/cimento

No trabalho publicado por Lyse (1932) em contribuição ao estudo de dosagem de concretos, o pesquisador demonstrou que a água, por unidade e volume de concreto, é o principal determinante da consistência do concreto no estado fresco. Isto é válido considerando que certos limites sejam respeitados e utilizando os mesmos materiais, para qualquer que seja a proporção dos materiais da mistura (LYSE, 1932; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

A relação descrita acima ficou conhecida como **Lei de Lyse**, a qual está apresentada na Equação 3. Além disso, Lyse (1932) sugeriu empregar a Lei de Abrams com a relação a/c em massa e não em volume, como originalmente proposto por Abrams (1918).

Equação 3

$$m = K_2 + K_4 * a/c$$

Na qual:

$m$  = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg

$K_1$  e  $K_2$  = constantes específicas para cada conjunto dos mesmos materiais

$a/c$  = relação água/cimento

Ainda, os pesquisadores Prizskulnik e Kirilos em 1974, estabeleceram que o consumo de cimento é inversamente proporcional à massa de agregados secos do traço ( $m$ ), o qual deve ser ajustado conforme a Equação 4. Essa relação é denominada Lei de Prizskulnik e Kirilos, mas também conhecida como Lei de Molinari (HELENE; TERZIAN, 1992; TUTIKIAN; HELENE, 2011; WEIDMANN, 2008).

Equação 4

$$C = \frac{1000}{K_5 + K_6 * m}$$

Na qual:

$C$  = consumo de cimento por  $m^3$  de concreto, em kg/ $m^3$

$m$  = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg

$K_5$  e  $K_6$  = constantes específicas para cada conjunto dos mesmos materiais

#### 2.4.2 Métodos de Dosagem

Com o objetivo de obter uma mistura satisfatória, devem ser feitas verificações das proporções estimadas por meio de misturas experimentais e, se necessário, a realizar de ajustes apropriados nestas proporções até que uma mistura satisfatória seja obtida. Para atingir este objetivo, faz-se uso de métodos de dosagem (HELENE; TERZIAN, 1992; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo Kong e Evans (1987), os métodos de dosagem são úteis como guias na seleção inicial destas proporções, mas deve ser enfatizado que as proporções finais a serem adotadas devem ser estabelecidas por ensaios e ajustes no local em condições reais.

#### 2.4.2.1 Método ACI

O método do *American Concrete Institute* (ACI), denominado ACI 211.1-91, conforme Day (1999) é um método amplamente utilizado em todo o mundo e com características relevantes. A principal destas é a utilização da densidade aparente do agregado graúdo como ponto inicial, a qual permite, em uma série, um efeito combinado de nivelamento do agregado graúdo no teor de agregado miúdo desejável (KOSMATKA *et al.* 2003).

O método ACI é desenvolvido basicamente em cima de dois princípios: método do peso e do volume absoluto. O primeiro é considerado menos preciso, todavia não requer informações sobre a massa específica dos materiais utilizados na produção do concreto. Já o método do volume absoluto é, por sua vez, considerado mais preciso; porém, requer mais dados iniciais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Tutikian e Helene (2011), o método considera tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais. O mesmo abrange uma classe de resistência à compressão do concreto entre 15 e 40 MPa, aos 28 dias e relações a/c de 0,39 a 0,79.

O método envolve concretos com consistência plástica (50 mm) à fluida (150 mm) e fornece traços com baixos teores de areia, tentando obter misturas mais econômicas. Este apresenta uma sequência de etapas bem definidas, incorporando um conjunto de tabelas, que facilitam a determinação dos parâmetros essenciais para obtenção do traço elementar (BOGGIO, 2000; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Tutikian e Helene (2011) ressaltam que a desvantagem do método é que os valores a partir de qual é realizada a dosagem são todos tabelados, não abrangendo todos os tipos de materiais existentes. No caso da resistência obtida não ser igual à esperada, faz-se necessário uma nova dosagem, com o intuito de corrigir a relação a/c, a trabalhabilidade e novo teor de argamassa (NEVILLE; BROOKS, 2013).

#### 2.4.2.2 Método de De Larrard

O método de De Larrard (1999) expõem uma abordagem diferenciada dos outros métodos para a dosagem de concretos, baseando-se em um modelo de empacotamento de partículas

para otimização de misturas granulares visando à máxima compacidade possível, denominado Modelo de Empacotamento Compressível (CMP) (FORMAGINI, 2005; TUTIKIAN, 2007).

Pelo fato de fundamentar-se no empacotamento de partículas, em princípio, trata-se de um método para dosagem de qualquer tipo de concreto, desde concretos convencionais, de alta resistência, com pós reativos, jateados, auto adensáveis, compactado com rolo e concretos com diferentes densidades (FORMAGINI, 2005).

Tutikian e Helene (2011) salientam que sua aplicação não é fácil, principalmente por depender de programas computacionais associados a ensaios de viscosidade. Basicamente, o método consiste na determinação do pacote granular através da forma de delinear a combinação dos agregados, minimizando a porosidade e diminuindo o consumo da pasta na mistura (DE LARRARD, 1999).

#### 2.4.2.3 Método de Vitervo O'Reilly

Conforme Tutikian e Helene (2011, p. 443) “trata-se de um método para composição, em princípio, de qualquer tipo de concreto, principalmente concretos correntes e concretos de alta resistência. O método tem forte base experimental e está focado na economia de cimento”.

Deste modo depende-se de um extenso programa experimental, em que através de passos a serem seguidos em laboratório obtêm-se uma mistura mais compacta. De certo modo, a determinação do pacote granular objetiva a combinação dos agregados, a fim de minimizar a porosidade, conseqüentemente diminuindo o consumo de cimento (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011, p. 443) o método “pode ser dividido em duas partes: a primeira que determina, experimentalmente, a proporção entre os agregados, e a segunda que calcula, por meio de tabelas e aproximações, os outros constituintes do concreto”.

#### 2.4.2.4 Método IPT/EPUSP

Trata-se de um método teórico-experimental, que se desenvolve em parte experimentalmente através de uma análise analítica, baseando-se em leis de comportamento dos concretos (HELENE; TERZIAN, 1992; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O estudo experimental proposto pelo método é fundamental, pois ao se fixar o mesmo abatimento para diferentes teores de argamassa seca ( $\alpha$ ), pretende-se determinar a mínima

quantidade de água necessária para obter a trabalhabilidade especificada. Deste modo, é otimizada experimentalmente a proporção entre os agregados miúdos e graúdos, onde está incluída a interferência do cimento, agregados, adições e demais materiais utilizados (HELENE, 2005; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O procedimento para utilização do método foi apresentado por Helene e Terzian (1992). A partir dos resultados obtidos e processados constrói-se o “diagrama de dosagem” (Figura 4), introduzido por Prizskulnik e Kirilos, em 1994.

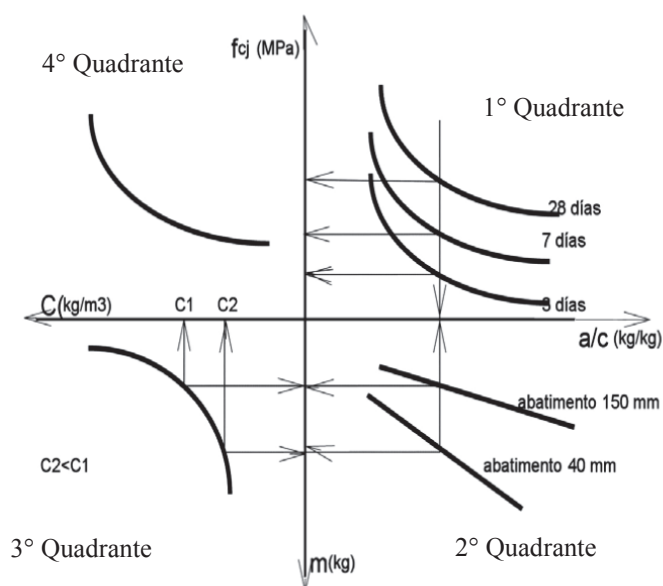


Figura 4: Diagrama de dosagem.

(Fonte: adaptado Tutikian e Helene, 2011)

O modelo apresentado na Figura 4, demonstra no primeiro quadrante o ajustes dos resultados obtidos pela lei de Abrams ou Modelo de Power, onde a resistência de um concreto a uma determinada idade é inversamente proporcional à relação  $a/c$  (HELENE; TERZIAN, 1992; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O segundo quadrante representa os resultados ajustados à lei de Lyse, que por sua vez quando fixados o cimento e agregados, a consistência do concreto fresco depende preponderantemente da quantidade de água por  $m^3$  de concreto (HELENE, 2005; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Já no terceiro quadrante, os resultados devem ser ajustados segundo a lei de Molinari, visto que o consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto varia na proporção inversa da relação em massa seca de agregados/cimento (HELENE, 2005; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O quarto quadrante, segundo Tutikian e Helene (2011), correlaciona a resistência à compressão com o consumo de cimento, expressando o rendimento do traço (MPa/kg de cimento).

### 2.4.3 Aprimoramento da composição de traços de concreto

Uma estratégia para o aperfeiçoamento de traços de concreto é a diminuição do volume da pasta de cimento, que por sua vez contribui para a redução do custo final do mesmo. Sendo assim, para diminuir o volume da pasta de cimento o espaço entre os agregados deve ser substancialmente reduzido. Deste modo, o volume de pasta pode ser reduzido através da melhor proporção dos agregados, e um dos meios para se obter esta proporção é através do procedimento de empacotamento dos materiais constituintes da mistura (CHANG, 2004).

Este procedimento também é definido por Tutikian e Dal Molin (2008), como composição do esqueleto granular, o qual visa determinar a melhor proporção entre dois materiais de ordem crescente de partículas. Além deste procedimento, a utilização de areia artificial (também conhecida como areia de britagem ou pó de pedra) aprimora, juntamente com o uso de aditivos redutores de água, os traços de concreto.

#### 2.4.3.1 Empacotamento dos agregados graúdos

O fator de forma dos agregados graúdos é decisivo e mais preponderante que a granulometria. Desta forma, não é possível determinar a relação ótima dos agregados graúdos e miúdos pelos métodos baseados na granulometria ideal (O'REILY, 1998, p. 23), como recomendado pelo método ACI.

Deste modo, o método mais preciso é o experimental, que se baseia na determinação da porcentagem de vazios dos diferentes tipos de agregados. Basicamente, trata-se do empacotamento dos materiais, que tem por objetivo encontrar uma melhor proporção entre frações granulométricas, obtendo assim a uma mistura mais compacta com uma massa maior, ocupando um mesmo volume, conseqüentemente reduzindo o volume de vazios da mistura (O'REILY, 1998; REGINATO *et al.* 2010).



Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), determinada a primeira composição entre os dois materiais de maior diâmetro, realiza-se o mesmo procedimento com esta mistura e o próximo componente até chegar ao cimento, que por sua vez, é o único elemento que não é empacotado.

A melhor composição dos agregados é verificada quando a mistura apresenta menor porcentagem de vazios da mistura dos agregados, indicando a composição para qual, teoricamente, o consumo de cimento será mínimo (O'REILY, 1998).

Para a determinação da melhor proporção dos agregados, primeiramente deve-se definir o método normatizado para a determinação da massa unitária compacta para a mistura dos agregados, ressaltando que se deve trabalhar com os materiais secos e bem misturados. Neste ensaio, deve ser utilizado um recipiente de diâmetro pelo menos cinco vezes maior que o diâmetro médio das partículas, conforme De Larrard (1999), para evitar o efeito container (O'REILY, 1998; TUTIKIAN *et al.* 2011).

Por consequência, controlando a proporção da mistura dos agregados reduz-se o volume de espaços vazios, conseguindo assim uma melhor resistência e trabalhabilidade. Assim, a graduação dos materiais sólidos irá conformar uma melhor proporção da mistura do concreto devido à influência que o esqueleto granular exerce nas propriedades macro mecânicas do concreto. Além disso, com a mesma relação a/c, menor quantidade de cimento é necessária quando se tem um esqueleto granular mais denso, o que implica em uma quantidade menor de água necessária (CHANG, 2004).

#### 2.4.3.2 Utilização de areia artificial em concretos

A areia natural vem sendo utilizada como agregado miúdo em concretos há séculos, no entanto, não é um recurso natural renovável, deste modo vem-se buscando alternativas para a substituição da areia natural por outros materiais. Entre os possíveis materiais para a substituição, a areia artificial, também conhecida como areia de britagem ou pó de pedra tem recebido grande atenção nos dias atuais como substituta para a areia natural (JI *et al.*, 2013).

Quanto aos estudos realizados em concreto com utilização de areia artificial, segundo Weidmann (2008), a maioria deles contempla substituição parcial da areia natural avaliando a demanda de água ou aditivo para uma mesma trabalhabilidade, resistência à compressão e comparações de custos.

Visando a redução de custos, Nugent (1979, apud Weidmann 2008) e Cabrera e Irassar (1991, apud Weidmann 2008) avaliaram a possibilidade de composições de areia natural e areia artificial na confecção de concretos. Os autores obtiveram como resultados, que as composições de areias naturais e artificiais apresentaram resistências melhores que a utilização de 100% da areia natural, ao mesmo tempo em que reduziram os custos para a produção dos concretos.

Bastos (2002) analisou teores de substituição entre 15 e 75% de areia natural por areia artificial na produção de concretos convencionais. O mesmo constatou que quanto maior o teor de areia artificial utilizado, menor foi a demanda de água e maior foi a resistência do concreto, observando o melhor desempenho para 70% de substituição.

#### 2.4.3.3 Uso de aditivos redutores de água

Conforme já abordado anteriormente (item 2.4.1.2), a resistência à compressão do concreto é inversamente proporcional à relação a/c (Abrams,1918). Assim, quanto menor a relação a/c maior será a resistência do concreto (Figura 5). Isto ocorre como consequência natural ao enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade com o aumento da relação a/c (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

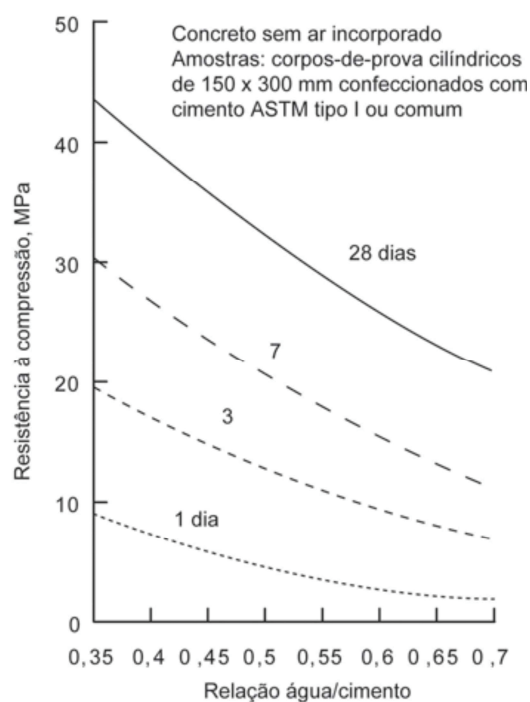


Figura 5: Influência da relação a/c e idade de cura sobre a resistência do concreto.

(Fonte: Mehta e Monteiro, p. 54, 2008)

Todavia, relações a/c baixas, prejudicam a trabalhabilidade do concreto, conseqüentemente geram dificuldades para bombeamento e lançamento do mesmo. Desta forma, o uso de aditivos permite a redução do consumo de água melhorando a trabalhabilidade do concreto.

Os aditivos para concreto exercem várias funções e são classificados de acordo com cada uma delas. A NBR 11768 (ABNT, 2011) define aditivo plastificante/reductor de água, como o aditivo que permite, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, reduzir a quantidade de água. A mesma utiliza esta definição para os aditivos superplastificantes, apenas ressaltando a diferença na intensidade dos efeitos. Segundo Hartmann *et al.* (2011), os aditivos redutores de água permitem uma redução na quantidade de água em pelo menos 5%, já os aditivos superplastificantes podem reduzir em até 40%.

Mehta e Monteiro (2008) realizaram um estudo com o uso de aditivo superplastificante. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Exemplos de resistências obtidas com o uso de aditivo superplastificante

Ensaio	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a/c	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)			
				1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Concreto de referência <sup>(1)</sup>	360	0,60	225	10	21	32	45
Concreto com 2% superplastificante <sup>(2)</sup>	360	0,45	225	20	35	43	55
Concreto com mesma relação a/c <sup>(3)</sup>	360	0,45	30	16	28	37	52

<sup>(1)</sup> Concreto sem aditivo;

<sup>(2)</sup> Concreto com a mesma consistência do anterior, mas contendo menos água;

<sup>(3)</sup> Concreto com a mesma relação a/c, mas sem aditivo superplastificante e com abatimento menor que o anterior

(Fonte: adaptado Mehta e Monteiro, 2008)

Constata-se que as misturas de concreto contendo superplastificante apresentam resistência à compressão maior que a do concreto referência e com a mesma relação a/c. Isto se deve a maior velocidade de hidratação do cimento em um sistema bem disperso. Este efeito é mais evidenciado nas primeiras idades do concreto: a um, três e sete dias.

A partir disso, confere a melhor dispersão das partículas de cimento em uma mistura com o uso de aditivos superplastificantes, além da redução do consumo de água. Tal afirmação pode ser observada na Figura 6, na qual se observa a micrografia de (a) partículas de cimento floculadas em uma suspensão de cimento Portland-água e (b) mesmo sistema disperso com aditivo superplastificante.

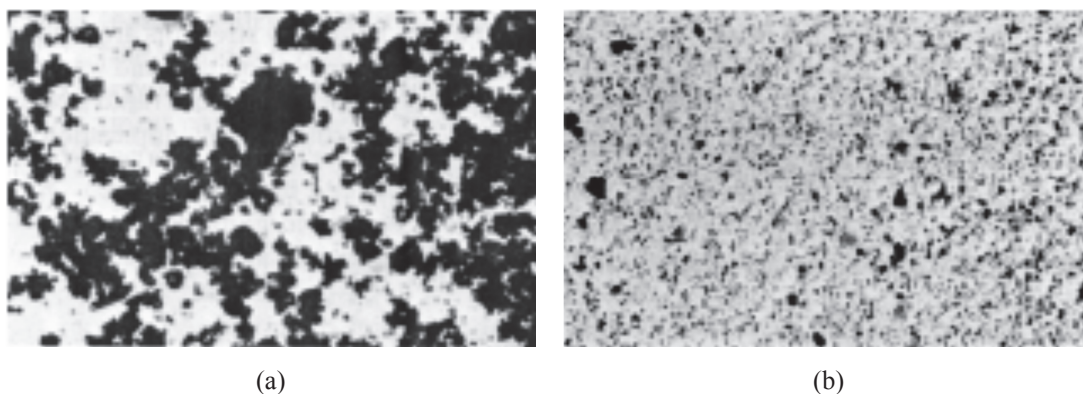


Figura 6: (a) Micrografia de partículas de cimento floculadas em água e (b) com presença de aditivo superplastificante

(Fonte: Mehta e Monteiro, p. 298, 2008)

#### 2.4.4 Adição de mineral suplementar

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos. Atualmente, grande parte das adições minerais utilizadas é proveniente de resíduos de outras indústrias, como as siderúrgicas e termelétricas, que seriam normalmente descartados em grande quantidade em locais impróprios (DAL MOLIN, 2011; NEVILLE; BROOKS, 2013).

As adições minerais trazem vários benefícios ao concreto, tais como: melhor resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação; aumento da resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros; fortalecimento da zona de transição e maior durabilidade ao ataque de sulfatos e a expansão pela reação álcali-agregado (DAL MOLIN, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As adições minerais são classificadas em três grandes grupos, de acordo com sua ação físico-química:

- a) material pozolânico;
- b) material cimentante;
- c) filler.

Os materiais pololânicos comumente utilizados na produção de concreto, tem-se a sílica ativa, a cinza volante, o metacaulin e a Cinza de Casca de Arroz (CCA). A CCA é proveniente da combustão da casca de arroz utilizada na geração de calor pelas indústrias beneficiadoras nos processos de secagem e parbolização dos grãos (DAL MOLIN, 2011).

A região sul do Brasil possui destaque por ser responsável por mais de 70% da produção nacional de arroz. Deste modo, trata-se de um material disponível localmente, atraindo maior atenção para aplicações, possibilitando a viabilidade do uso deste material pozolânico na região sul do Brasil. Assim, para este estudo, foi adotado a utilização da CCA como material pozolânico, devido maior disponibilidade no estado do Rio Grande do Sul, frente a outros materiais.

A CCA é considerada uma adição mineral, sendo classificada como material pozolânico e definida pela NBR 12653 (ABNT, 2014, p. 2) como um “material silicioso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes”. Do mesmo modo, a referida norma classifica os materiais pozolânicos como naturais ou artificiais, sendo que ambos podem passar por um processamento adicional para se adequar como um material pozolânico.

A eficiência da CCA como material pozolânico está diretamente associada ao seu processo de obtenção. Cinzas provenientes de uma combustão não controlada podem conter grande proporção de minerais de sílica não reativos (Figura 7(a)), conseqüentemente baixo valor de atividade pozolânica. Entretanto, cinzas com queima controlada, na faixa de 500 a 700 °C, possibilitam a obtenção de cinzas amorfas (Figura 7 (b)) com alta atividade pozolânica (DAL MOLIN, 2011).

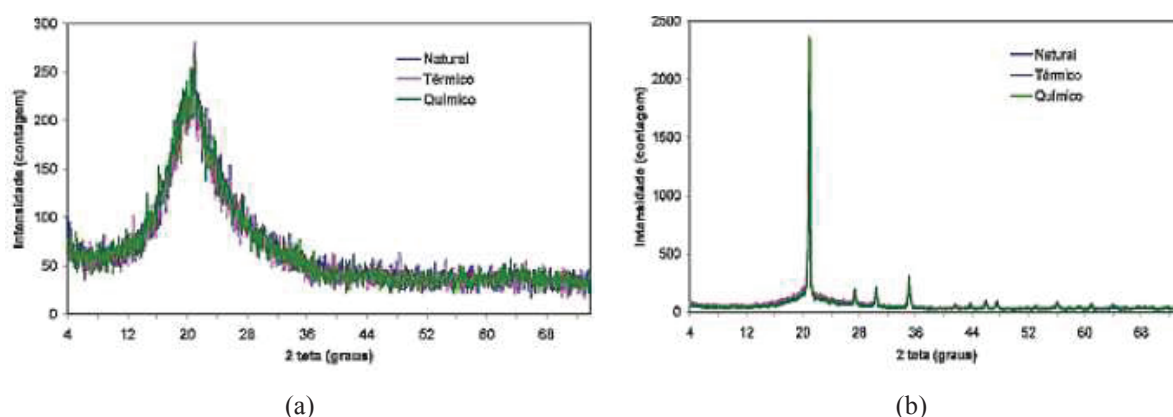


Figura 7: Difratomogramas de raios X de CAA predominantemente amorfas (a) e predominantemente cristalinas (b)

(Fonte: Dal Molin, p.279, 2011)

Análises químicas mostram que além do elevado teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) de 90 a 95%, a CCA apresenta teores de álcalis ( $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ) de 1 a 2% e o teor de carbono variando de 3 a 18% (MALHOTRA, 1993). Em função do alto teor de carbono, Dal Molin (2011) expõe que a CCA pode apresentar colorações que variam entre preto, cinza e branco-rosado. Essas mudanças na coloração devem-se, principalmente, ao processo de combustão da celulose e às transformações estruturais que ocorrem no material frente à variação da temperatura de queima. Na Figura 8 é possível verificar estas diferentes tonalidades que a CCA pode apresentar.

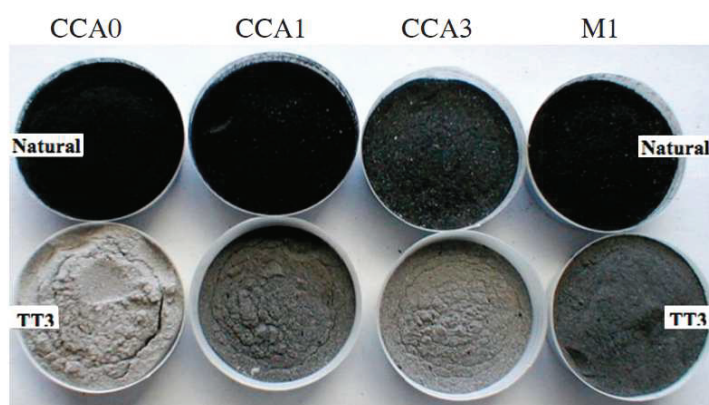


Figura 8: Amostras de diferentes CCA com e sem tratamento térmico

(Fonte: Pouey, p. 132, 2006)

Além do efeito pozolânico já mencionado, a CCA ocasiona o efeito de microfiller. Esse efeito acontece devido ao tamanho das partículas da CCA, que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, por consequência, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como ponto de nucleação, dificultando a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio (SILVEIRA; DAL MOLIN, 1995).

#### 2.4.5 Adição de Fibras

O concreto é o material estrutural mais utilizado no mundo, porém possui uma série de limitações, como o comportamento frágil e baixa capacidade de deformação apresentada antes da ruptura. A fim de compensar estas características, faz-se o uso de fibras no concreto (FIGUEIREDO, 2011; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os concretos com fibras podem ser definidos como materiais compósitos, ou seja, materiais formados por duas ou mais fases distintas. O concreto é um material compósito formado por

duas fases principais: a matriz e os agregados. Contudo, consideram-se como fases principais no concreto reforçado com fibras a própria matriz do concreto e as fibras (FIGUEIREDO *et al.* 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Figueiredo (2011, p. 9), as fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a dimensão da seção transversal. Atualmente, as fibras destinadas ao reforço do concreto são chamadas, de maneira genérica, de macro-fibras, podendo ser de aço ou poliméricas.

As fibras atuam de formas diferenciadas em compósitos cimentícios. Quando o material é submetido a esforços de tração, surgem microfissuras distribuídas ao longo do seu volume (estágio 1). Posteriormente, com o aumento concentração das microfissuras, as mesmas começam a interligar-se formando uma ou mais macro-fissuras (estágio 2). Já a propagação das macro-fissuras (estágio 3) ao longo da direção dos esforços principais de tração, causam o rompimento do material cimentício (ROSSI *et al.* 1987).

A Figura 9 ilustra as etapas acima mencionadas, tendo como referência o comportamento de uma amostra de concreto sob tensão uniaxial.

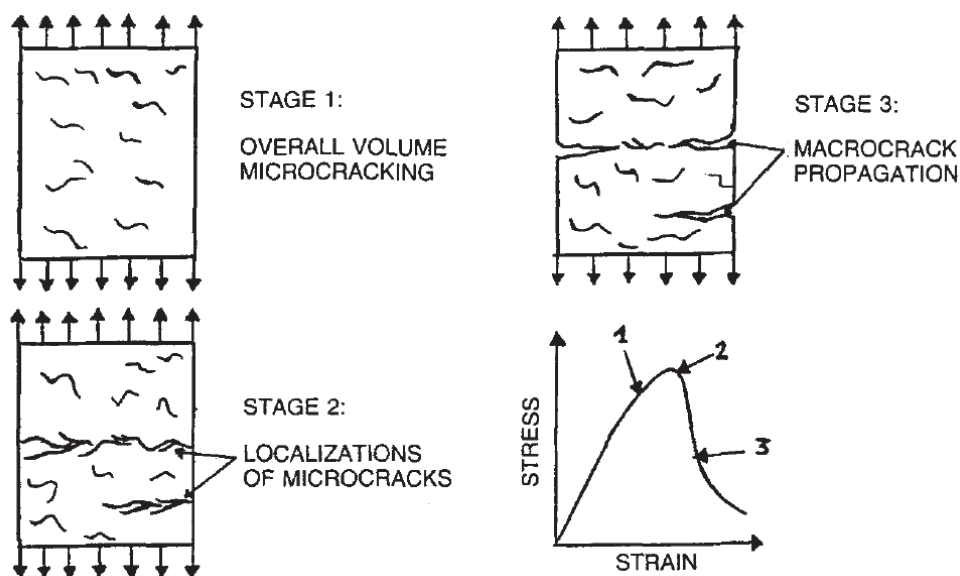


Figura 9: Processo de fissuração no concreto.

(Fonte: Rossi *et al.* p, 436, 1987)

Conforme Rossi, *et al* (1987) as fibras de aço em concretos desempenham um papel durante diferentes estágios: durante o primeiro estágio, na formação das microfissuras, as fibras de

aço costumam as microfissuras e limitam a sua propagação, sendo assim o segundo estágio é impedido ou retardado. Na possibilidade de ocorrer o surgimento das macro-fissuras, as fibras de aço também podem costurá-las. Sua ação, neste caso, promove maior capacidade de carga e aumento considerável de ductilidade.

Brandão (2005), referindo-se as dimensões ótimas das fibras metálicas, indica que para ocorrer os efeitos sobre os processos de micro fissuração e macro fissuração, as dimensões das fibras devem ser diferentes. No caso de fibras que agem sobre as microfissuras, seus diâmetros devem ser pequenos e devem estar presentes em grande número. Já no caso das macrofissuras, as fibras devem ser compridas o suficiente para ancorarem adequada na matriz.

As fibras podem ser produzidas de diversas formas, tamanhos e materiais, dependendo da aplicação desejada. Geralmente são fabricadas com aço, polímeros, vidro ou materiais naturais (KOSMATKA *et al.* 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2008). O material constituinte da fibra definirá o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, sendo estas as propriedades que mais influenciam a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (FIGUEIREDO *et al.* 2011).

Fibras que possuem módulo de elasticidade inferior ao concreto, como as poliméricas, são classificadas como fibras de baixo módulo, já fibras que possuem módulo maior que o concreto, são denominadas fibras de alto módulo, como é o caso das fibras de aço. Segundo Figueiredo (2011), as fibras de baixo módulo são convencionalmente consideradas como de baixa capacidade de reforço pós-fissuração, por este fator os teores deste tipo de fibra devem ser muito mais elevados para possibilitar o reforço da matriz. Entretanto, as fibras de alto módulo proporcionam um elevado nível de reforço da matriz quando ocorre o rompimento da mesma.

Neville e Brooks (2013) evidenciam que o coeficiente de Poisson das fibras deve ser similar ao da matriz para evitar tensões laterais induzidas, visto que qualquer tensão lateral elevada pode afetar a aderência da interface entre as fibras e a matriz, impossibilitando a transferência da tensão axial para as fibras.

O efeito das fibras pode ser observado claramente na Figura 10, na qual pode se verificar que as fibras atuam aumentando a resistência à tração do concreto pelo retardo da propagação de fissuras e pelo aumento da tenacidade. Isto acontece através da transmissão de tensões de uma



seção fissurada, possibilitando uma maior deformação após a tensão de pico do que em concretos sem adição de fibras (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2013).

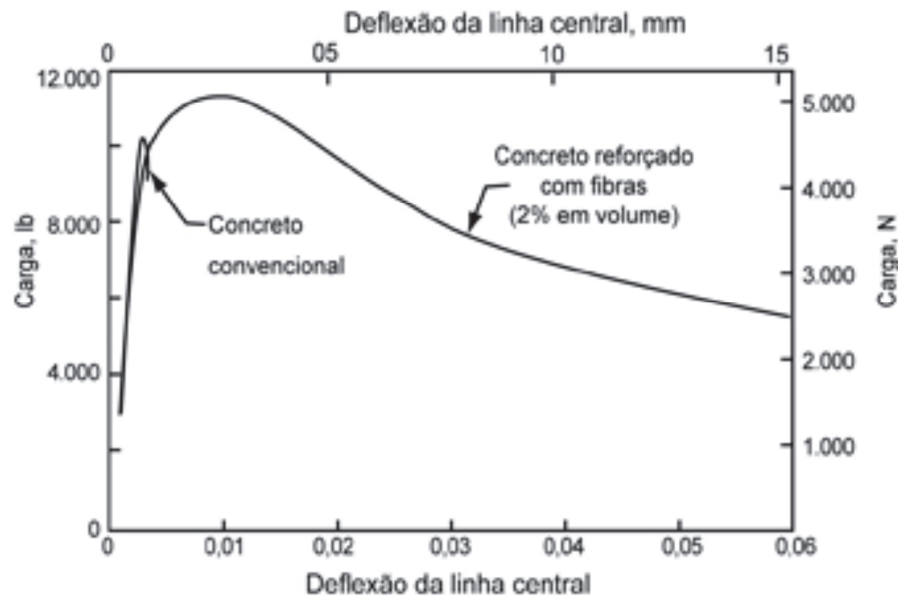


Figura 10: Comportamento de carga-deflexão de concreto convencional e reforçado do com fibras.

Fonte: (Mehta e Monteiro, 2008)

## 2.5 CONCLUSÕES

Esse capítulo teve como base o referencial teórico para a realização do presente estudo. Assim, abordou-se o papel dos postes no sistema de distribuição de energia, apresentando os tipos de postes comumente utilizados com enfoque nos postes de concreto armado. Juntamente apresentou-se algumas considerações sobre a durabilidade dos postes de concreto armado, ligando os requisitos exigidos para a produção destes elementos frente à durabilidade. Por fim, identificou-se as alternativas passíveis para o aperfeiçoamento dos traços de concreto para a produção de postes.

Com base nas considerações abordadas neste capítulo, no capítulo 3 são apresentados os métodos adotados para a realização do estudo, expondo a concepção do programa experimental e suas etapas. Também são descritos os materiais utilizados, os métodos de ensaio adotados para a definição dos parâmetros fundamentais do concreto, e o método de ensaio realizado no elemento em escala real.

### 3 MÉTODOS

Com o intuito de otimizar os traços de concreto empregados na produção de postes de concreto armado, visando o aumento da vida útil destes elementos, definiu-se o programa experimental e o método a ser adotado.

A concepção do programa experimental deu-se através da verificação do processo produtivo dos postes de concreto armado e identificação dos requisitos necessários para a dosagem do concreto. Estes requisitos referem-se às propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Simultaneamente, realizou-se um levantamento dos requisitos exigíveis para o concreto frente às recomendações normativas, determinando as características e propriedades necessárias para o concreto na produção de postes de concreto armado.

Através da identificação dos requisitos para o concreto foi traçado o programa experimental, definindo-se os parâmetros para a otimização dos traços de concreto e a definição dos traços para execução em escala real, os quais são apresentados neste capítulo. Também, são apresentados os ensaios adotados para definição dos parâmetros fundamentais do concreto e os ensaios realizados nos postes em escala real.

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Previamente à concepção e definição do programa experimental, foram definidos os requisitos e parâmetros para dosagem do concreto, sendo os requisitos: a trabalhabilidade, a resistência à compressão, resistência à tração e indicadores de durabilidade. A definição dos requisitos deu-se através do reconhecimento das etapas de produção dos postes de concreto armado. Quanto aos parâmetros, tem-se: as condições de cura, a influência da umidade dos agregados e a água de amassamento.

No processo produtivo, identificou-se a trabalhabilidade do concreto como um dos requisitos para dosagem, sendo que a atualmente utilizada está na faixa de  $170 \pm 20$  mm. Assim, adotou-se para os estudos de dosagem, a trabalhabilidade fixada nesta mesma faixa de valores.

Conjuntamente foi identificada a resistência à compressão característica exigida pelo projeto estrutural ( $f_{ck}$ ), sendo esta de 25 MPa aos 28 dias. Todavia, verificou-se como ponto crítico do

processo produtivo o içamento para a retirada do poste da forma logo após o período de cura (6 horas após a moldagem do poste).

Paralelamente a este estudo como parte do projeto em cooperação com a concessionária distribuidora de energia, realizou-se uma análise através do método dos elementos finitos das tensões geradas pelo içamento do poste. Para tal utilizou-se o software Diana 9.4, considerando para a análise a não-linearidade física dos materiais, permitindo deste modo, levar em conta a eventual degradação (fissuração, plastificação, entre outros). Neste estudo, os parâmetros adotados foram: Resistência à compressão 25 MPa; Módulo de Elasticidade 30 GPa; coeficiente de Poisson 0,20; Peso específico do concreto armado 25 KN.

A Figura 11 demonstra a análise realizada para o içamento do poste, onde se evidencia a tensão máxima de tração de 1,50 MPa. Assim, definiu-se como parâmetro de dosagem a resistência à tração do concreto, fixando-a em 2,0 MPa após 6 horas da moldagem. Definiu-se esse valor com uma margem de segurança para a dosagem do concreto.

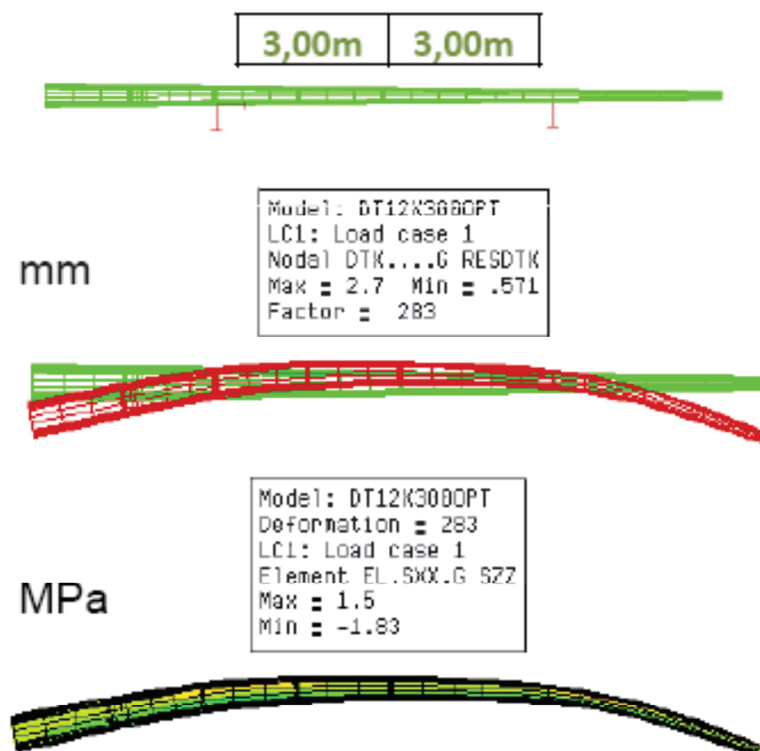


Figura 11: Deslocamentos e tensões durante o içamento do poste.

Fonte: (Désir *et al.* 2014)

Partindo da definição dos requisitos necessários para a dosagem do concreto, dividiu-se o programa experimental em três partes: Estudos preliminares, Estudos de dosagem e Ensaio em escala real. A sequência do programa experimental pode ser observada na Figura 12.

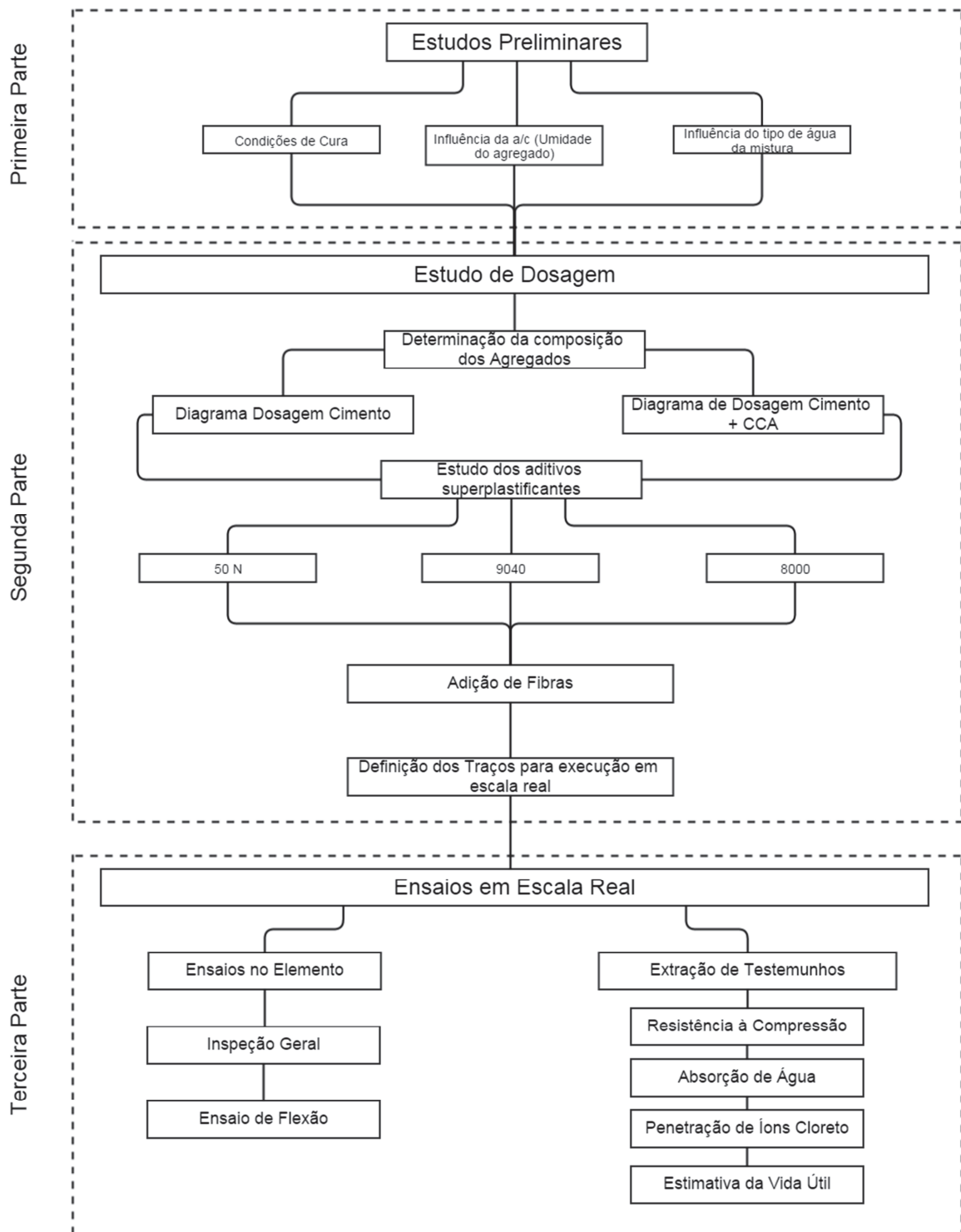


Figura 12: Fluxograma do programa experimental.

Nos estudos preliminares foram definidos parâmetros quanto às condições de cura, água de amassamento e influência da aferição errônea da umidade dos agregados. Os métodos e resultados dos estudos preliminares são apresentados no Capítulo 4. Estes parâmetros serviram de base para os estudos de dosagem (segunda parte).

Para os estudos de dosagem, apresentados no Capítulo 5, foi realizado o aperfeiçoamento do traço de concreto. Inicialmente, realizou-se uma pesquisa sobre a melhor composição dos agregados graúdos e miúdos para o traço de concreto. Posteriormente, realizou-se a confecção dos diagramas de dosagem, analisando traços com e sem adição de CCA. Após definiu-se a composição do traço unitário para atingir a resistência de tração exigida no içamento do poste, partindo assim para os estudos dos aditivos superplastificantes.

Ainda dentro dos estudos de dosagem, realizou-se uma análise para a determinação do melhor teor de fibras a ser empregado na produção de postes de concreto armado, juntamente com a composição do concreto que melhor se adequaria à presença da fibra na mistura. Em seguida, foram definidos os traços a serem utilizados na produção dos postes em escala real.

A terceira parte do programa experimental (Capítulo 6) refere-se à análise do poste em escala real, após a moldagem com os traços definidos nos estudos de dosagem. Os postes foram avaliados no ensaio de flexão de acordo com as regulamentações normativas, além da caracterização e avaliação do concreto quanto à resistência à compressão de testemunhos extraídos. Também foram avaliados os índices de absorção de água e a penetração de íons cloreto visando indicativos de durabilidade para os mesmos.

Como exemplificado nos parágrafos acima, cada uma das etapas do programa experimental é dependente da etapa anterior, como por exemplo, para os estudos de dosagem são necessários os resultados dos estudos preliminares e assim sucessivamente.

Deste modo, cada uma das etapas do programa experimental é apresentada em capítulos separados, abordando os parâmetros, métodos e os resultados para cada etapa. O estudo experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais – LEME da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## 3.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item são apresentados os materiais empregados para os estudos preliminares e de dosagem, sendo os mesmos utilizados na produção dos postes de concreto armado em escala real.

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela própria empresa responsável pela produção dos postes de concreto.

### 3.2.1 Cimento

O cimento utilizado para estudo e confecção dos postes foi o cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos, classificado como CPV-ARI-RS. Este tipo de cimento diferencia-se do cimento comum em função da dosagem diferenciada da mistura crua, que resulta num maior teor de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e por ser mais fino, o que é obtido aumentando o tempo de moagem. Sua composição é formada por 95 a 100% de clínquer e gesso e 0 a 5% de calcário e cinza volante (NBR 5733 ABNT, 1991; NBR 5737 ABNT, 1992).

Os ensaios químicos para o cimento utilizado, de acordo com informações do fabricante em relação ao lote utilizado podem ser visualizados na Tabela 7, enquanto que a caracterização física está apresentada na Tabela 8.

Tabela 7: Caracterização química do cimento

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,48	$\leq 1,0$
Perda ao Fogo – PF	ABNT NM 18/12	%	2,92	$\leq 4,5$
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 21/12	%	1,42	$\leq 6,5$
Trióxido de Enxofre - $SO_3$	ABNT NM 16/12	%	2,93	$\leq 4,5$
Anidrido Carbônico - $CO_2$	ABNT NM 20/12	%	2,27	$\leq 3,0$

Tabela 8: Caracterização física do cimento

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	$cm^2/g$	4.867	$\geq 3.000$
Massa Específica	ABNT NM 23/01	$g/cm^3$	3,10	não aplicável
Resíduo na peneira #200 ABNT NBR	ABNT NBR 11579/91	%	0,09	$\leq 6,0$
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	1,30	não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	30,70	não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	128,00	$\geq 60$
Fim de pega	ABNT NM 65/03	minutos	178,00	$\leq 600$
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/91	mm	0,00	$\leq 5,0$

A análise granulométrica do cimento foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os resultados podem ser visualizados na Figura 13. As partículas de cimento possuem diâmetro médio de 12,22  $\mu\text{m}$ .

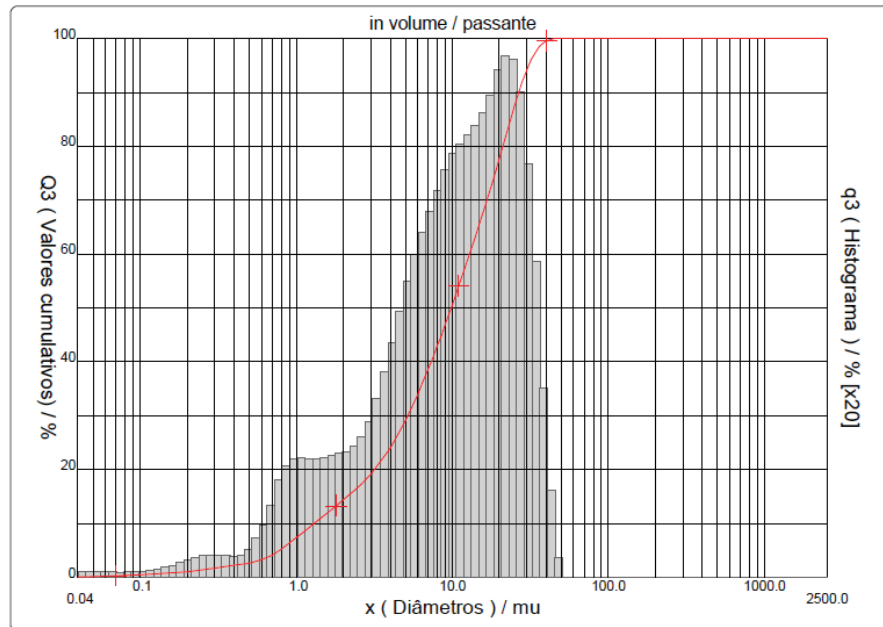


Figura 13: Análise granulométrica do cimento utilizado

### 3.2.2 Cinza de casca de arroz (CCA)

A CCA utilizada é proveniente da queima controlada da casca de arroz em sistema de combustão via leito fluidizado, produzida na cidade de Alegrete – RS. As propriedades físico-químicas da CCA de acordo com o fabricante são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Características físico-químicas da CCA utilizada

Propriedades físico-químicas	Unidade	Resultado
Perda ao fogo (%)	%	< 3,5
Umidade (%)	%	< 3
Teor de sílica amorfa (%)	%	> 95
Densidade aparente	kg/m <sup>3</sup>	> 550
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	g/cm <sup>3</sup>	2,16
Coloração	-	Cinza claro

A análise granulométrica da CCA foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As partículas da cinza possuem diâmetro médio de 7,91  $\mu\text{m}$ , conforme observado na Figura 14

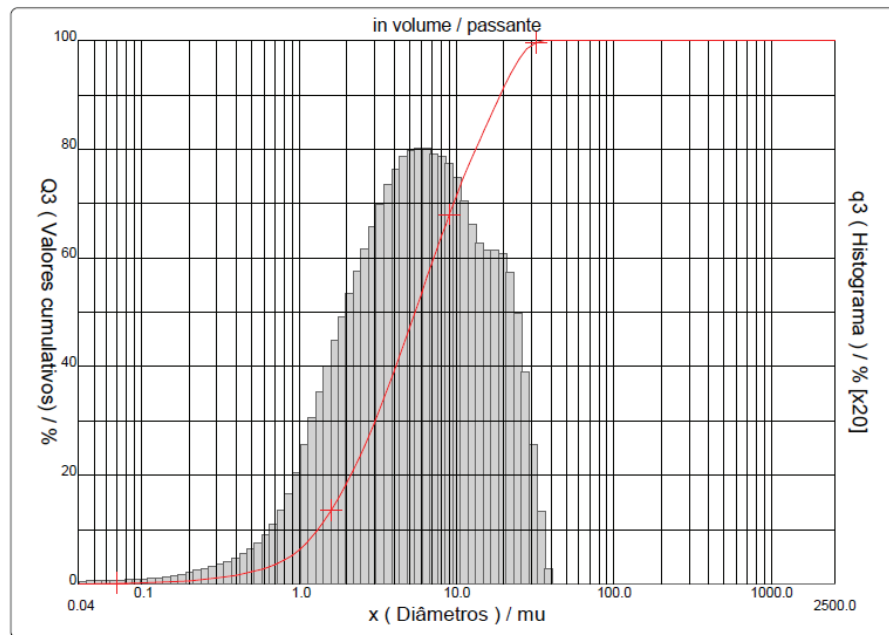


Figura 14: Análise granulométrica da cinza de casca de arroz utilizada

### 3.2.3 Agregados miúdos

Foram utilizados dois tipos de agregados miúdos na realização dos estudos. Um de origem natural, designado areia média e outro de origem artificial, proveniente do processo de britagem.

As características físicas e granulométricas dos agregados miúdos estão expostas na Tabela 10, com o respectivo método de ensaio normalizado. As composições granulométricas estão apresentadas graficamente na Figura 15, onde os valores obtidos são comparados com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).



Tabela 10: Características físicas e granulométricas dos agregados miúdos

Característica		Método de ensaio	Areia natural média	Areia Artificial
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,62	2,77
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,38	1,56
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,38	4,75
Módulo de Finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,95	2,79
Abertura da Peneira (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Porcentagem retida acumulada (%)	
Distribuição granulométrica	4,75		1,0	1,8
	2,38		3,7	25,0
	1,18		9,0	44,4
	0,60		21,8	59,2
	0,30		62,0	68,9
	0,15		97,3	79,8

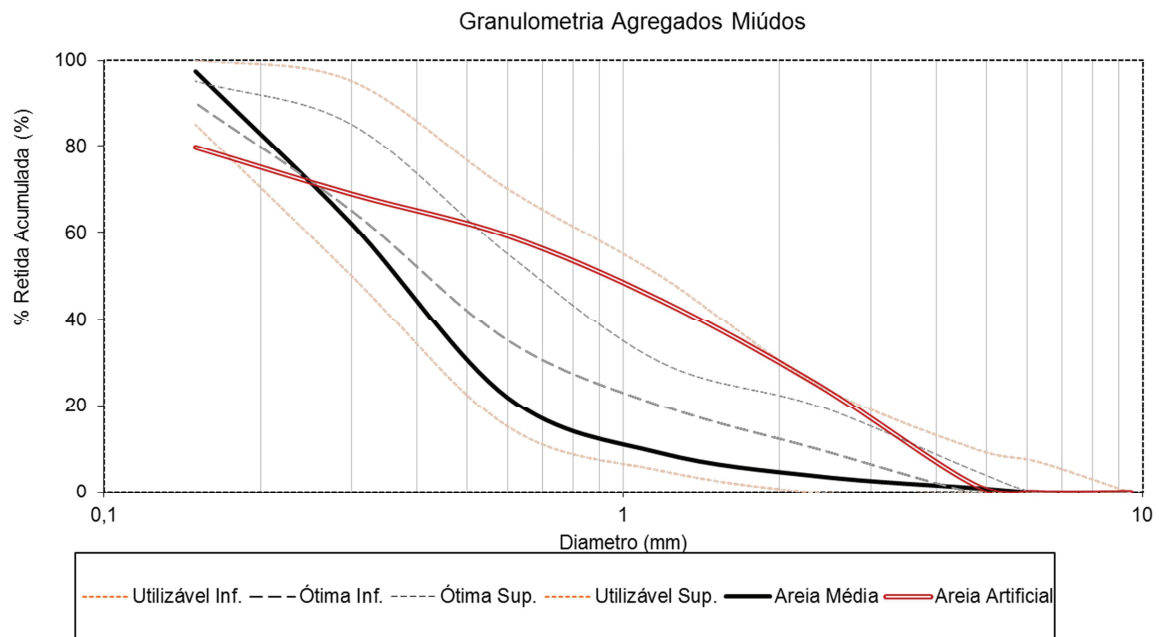


Figura 15: Distribuição granulométrica dos agregados miúdos

### 3.2.4 Agregados graúdos

Foram utilizados dois tipos de agregados graúdos na realização dos estudos, ambos britados de origem basáltica. Os agregados graúdos foram classificados conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009) em Brita tipo 0 e Brita tipo 1.

As características físicas e granulométricas dos agregados graúdos estão expostas na Tabela 11, com o respectivo método de ensaio normalizado. As composições granulométricas estão apresentadas graficamente na Figura 16, onde os valores obtidos são comparados com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 11: Características físicas e granulométricas dos agregados graúdos

Característica		Método de ensaio	Brita 0	Brita 1
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,87	2,91
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,60	1,56
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	12,5	25
Módulo de Finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	6,11	7,01
Absorção (%)		NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,6	2,0
Abertura da Peneira (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Porcentagem retida acumulada (%)	
Distribuição granulométrica	25		0,0	0,0
	19		0,0	5,8
	12,5		0,2	68,9
	9,5		16,7	95,3
	6,3		71,6	99,4
	4,75		94,6	99,6
	2,36		100,0	100

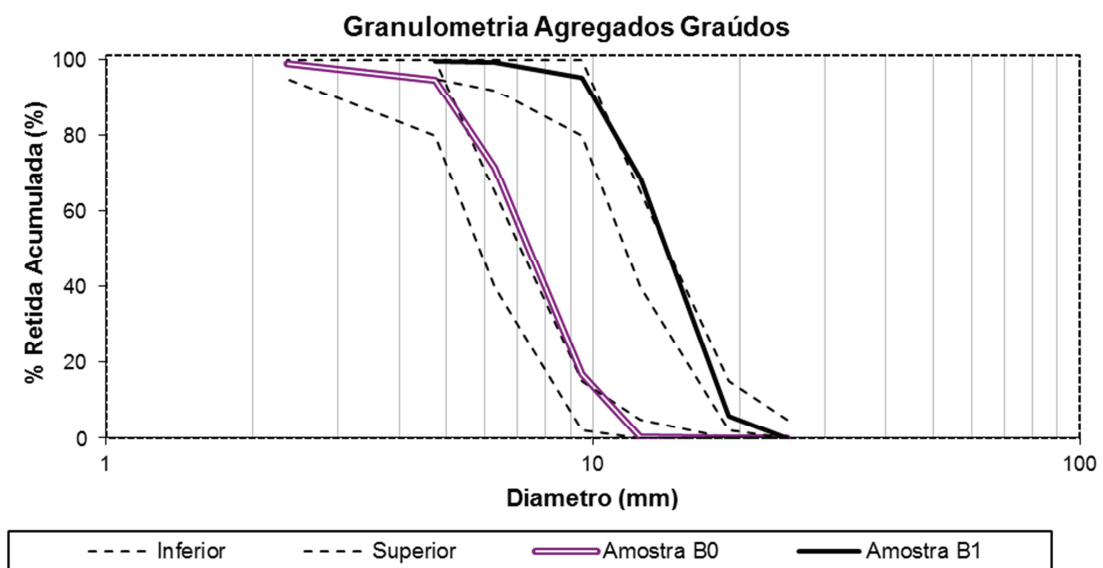


Figura 16: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos

### 3.2.5 Aditivos superplastificantes

Foram avaliados três aditivos superplastificantes, ambos de terceira geração à base de policarboxilatos. Os aditivos utilizados são apresentados na Tabela 12, juntamente com suas características físicas e químicas.

Tabela 12: Características dos aditivos utilizados

Característica	Aditivo		
	TecFlow 50N	TecFlow 8000	TecFlow 9040
Estado físico	Líquido	Líquido	Líquido
Cor	Castanho claro	Castanho claro	Castanho claro
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,11 ± 0,02	1,10 ± 0,02	1,07 ± 0,02
Voláteis (%)	57,5	51,0	*
pH (produto puro)	6,0 ± 1,0	5,5 ± 1,0	5,5 ± 1,0
Solubilidade em água	Altamente solúvel	Altamente solúvel	Altamente solúvel

\* Não informado pelo fabricante

Foram selecionados para análise os aditivos descritos na Tabela 12 por serem indicados pelos fabricantes para a produção de concretos com elevado abatimento e maior manutenção da trabalhabilidade. Essas características necessárias para a produção dos postes de concreto. Do mesmo modo, os aditivos analisados também são compatíveis com processo de cura térmica.

### 3.2.6 Fibra

Foi empregada para a produção dos postes de concreto armado fibra sintética estrutural, produzida a partir de copolímeros de polipropileno. As características técnicas da fibra utilizada são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13: Características técnicas da fibra utilizada

Material	Copolímero/Polipropileno
Formato	Monofilamento torcido
Massa específica	0,91 g/cm <sup>3</sup>
Comprimento	38 mm
Cor	Cinza
Resistência a alcalis	Alta
Absorção	Zero
Conformidade	ASTM C1116

### 3.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DOS CONCRETOS

Para avaliar o comportamento do concreto, a fim de determinar suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido, utilizaram-se os métodos e ensaios descritos na sequência. Os métodos também serviram para obtenção de parâmetros de cada etapa do programa experimental.

Salienta-se que o equipamento utilizado para a determinação das propriedades mecânicas atende todas as recomendações para os diferentes ensaios realizados, sendo esta uma prensa servo hidráulica, marca SHIMADZU, com capacidade de 2000 kN e controle computadorizado.

#### 3.3.1 Trabalhabilidade

Segundo NBR NM 67 (ABNT, 1996), a trabalhabilidade do concreto consiste na determinação da consistência do concreto no estado fresco através da medida do seu assentamento. Assim, adotou-se como parâmetro de controle a trabalhabilidade por abatimento do concreto para os estudos preliminares (Capítulo 4) e para os estudos de dosagem e moldagem dos postes (Capítulo 5).

Para a realização do ensaio de trabalhabilidade seguiu-se as recomendações da NBR NM 67 (ABNT, 1996), utilizando o ensaio de abatimento de tronco de cone, também conhecido como *slump test* (Figura 17). Utilizou-se este método também para a avaliação dos concretos com fibras, apesar deste não ser devidamente adequado para a determinação da trabalhabilidade deste tipo de concreto, esta limitação deu-se por ser o método atualmente disponível para controle da trabalhabilidade durante a produção dos postes na fábrica.



Figura 17: Execução do ensaio de abatimento de tronco de cone

### 3.3.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão trata-se da propriedade mecânica que serve como referência para avaliação do concreto, além de estar diretamente associada a outras propriedades do mesmo. Assim, adotou-se esta como variável de resposta para os estudos preliminares (Capítulo 4), e também adotou-se como parâmetro para confecção dos diagramas de dosagem, avaliação dos aditivos superplastificantes e na avaliação dos traços utilizados na produção dos postes em escala real (Capítulo 5).

Para a determinação da resistência à compressão, seguiu-se as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007) utilizando velocidade de aplicação de tensão de 0,45 MPa/s em corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (Figura 18). Quanto à moldagem e a preparação das bases dos corpos de prova, seguiram-se as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2008).



Figura 18: Execução do ensaio de resistência à compressão

### 3.3.3 Resistência à tração

Conforme apresentado no item 3.1, um dos requisitos observados na produção dos postes de concreto foi a resistência à tração, quando o mesmo era içado da forma. Deste modo, a resistência à tração do concreto foi adotada como um requisito de dosagem, itens 5.2 e 5.3, e para avaliação da eficiência dos aditivos superplastificantes, verificando a influência dos aditivos na resistência à tração do concreto (item 5.4).

Seguiu-se as orientações da NBR 7222 (ABNT, 2011) a fim de determinar-se a resistência à tração através do ensaio de tração por compressão diametral (Figura 19), utilizando corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Quanto à moldagem dos corpos de prova, seguiu-se as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2008).



Figura 19: Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

### 3.4 ENSAIOS NO ELEMENTO EM ESCALA REAL

A análise dos elementos em escala real seguiu os métodos de ensaios prescritos pela NBR 8451-3 (ABNT, 2011) quanto à inspeção geral, ensaio de flexão, elasticidade, ruptura e absorção de água. Juntamente, realizou-se a extração de testemunhos dos postes de concreto, com a finalidade de avaliar a resistência à compressão do concreto e a obtenção de parâmetros de durabilidade através da penetração de íons cloreto e absorção de água.

Para análise em escala real adotou-se o poste tipo Duplo T com 9 metros de comprimento e carga nominal de 300 daN, representando maior parcela de produção da empresa, o projeto estrutural do poste está demonstrado no Anexo 1.

Os procedimentos e metodologias utilizadas para análise dos elementos em escala real estão apresentados nos itens abaixo.

#### 3.4.1 Inspeção geral

Quanto à inspeção geral de postes de concreto armado, adotou-se a metodologia descrita na NBR 8451-3 (ABNT, 2011), a qual recomenda a aferição dos seguintes itens: acabamento,

dimensões, furações e traços de referência, retilineidade, desobstrução do furo de aterramento e identificação.

Frente ao acabamento, deve ser realizada uma inspeção visual contemplando as tolerâncias previstas na NBR 8451-1 (ABNT, 2011), na qual os postes devem apresentar superfícies externas suficientemente lisas, sem ninhos de concretagem, sem armadura aparente, com ausência de fendas ou fraturas, com a exceção de pequenas fissuras capilares, desde que não sejam orientadas segundo o comprimento do poste.

Conforme a NBR 8451-3 (ABNT, 2011), tendo em vista as dimensões, furações e os traços de referência, a inspeção deve ser realizada verificando os itens apresentados de acordo com os requisitos específicos para cada tipo de poste. Como neste trabalho foram utilizados postes tipo duplo T com 9 m de comprimento e carga nominal de 300 daN, a inspeção dimensional foi realizada baseando-se nos requisitos exigidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Dimensões do poste utilizado suas respectivas tolerâncias.

Identificação Poste	Comprimento Nominal	Face A (maior inércia)		Face B (menor inércia)	
		Topo	Base	Topo	Base
03 B 300 daN	9,00 ± 0,05 m	140 ± 5 mm	392 ± 5 mm	110 ± 5 mm	290 ± 5 mm

As representações das faces A e B estão esquematizadas na Figura 20, tanto para o topo quanto para a base do poste.

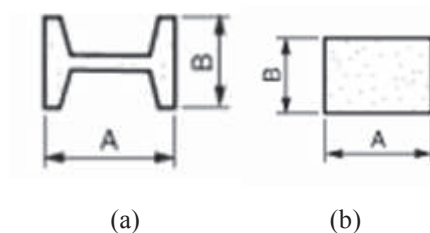


Figura 20: Representação das dimensões da seção transversal de base (a) e topo (b).

Na inspeção geral, também foi realizada a verificação da retilineidade de cada um dos postes analisados, juntamente com a aferição da identificação frente aos requisitos exigidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) e a metodologia apresentada pela NBR 8451-3 (ABNT, 2011). Os resultados da inspeção geral realizada nos postes de concreto armado estão apresentadas no item 6.1.

### 3.4.2 Flexão, elasticidade e ruptura

A NBR 8451-1 (ABNT, 2011) apresenta requisitos mecânicos para os postes de concreto armado, para que estes sejam aceitáveis e possam ser utilizados nas linhas de distribuição de energia. A avaliação dos requisitos deu-se através da execução do ensaio de flexão, elasticidade<sup>1</sup> e ruptura, sendo os resultados apresentados no item 6.2.

O esboço do sistema utilizado para os ensaios de flexão, elasticidade e de ruptura está apresentado na Figura 21, contemplando o sistema de engastamento do poste e os dispositivos de aplicação de carga.

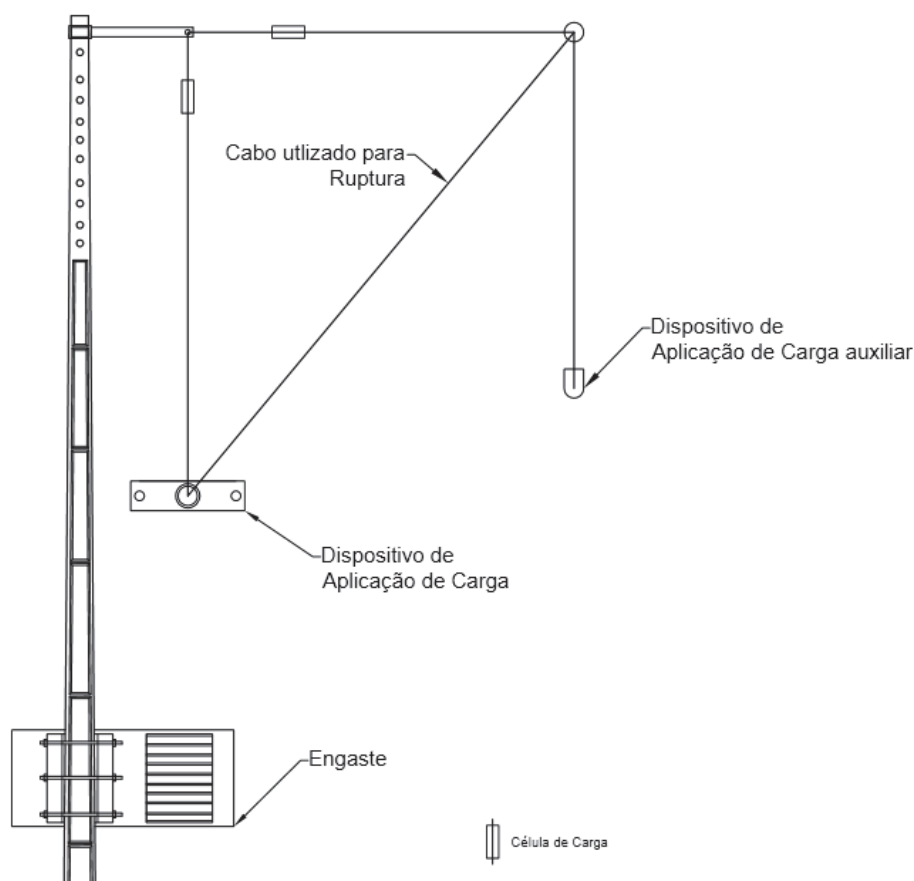


Figura 21: Disposição da bancada para os ensaios de flexão, elasticidade e ruptura.

Assim, seguiu-se a metodologia prescrita pela NBR 8451-3 (ABNT, 2011) para o ensaio de flexão, elasticidade e ruptura, com os seguintes objetivos:

- momento fletor (MA);
- elasticidade do poste com a carga nominal (Cn);

<sup>1</sup> O termo “elasticidade” refere-se a nomenclatura adotada pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), sendo que nas condições de ensaio o poste está no regime plástico.



- elasticidade com a carga no regime elástico ( $1,4 \cdot C_n$ );
- carga de ruptura do poste ( $C_r$ );
- carga vertical ( $C_v$ ).

### 3.4.2.1 Procedimento geral

Primeiramente foi definido o comprimento de engastamento dos postes, sendo determinado através da Equação 5. Para postes com comprimento nominal de 9 metros, obteve-se um comprimento de engastamento de 1,50 m.

Equação 5

$$e = \frac{L}{10} + 0,60$$

Na qual:

$e$  = Comprimento de engastamento, expresso em metros;

$L$  = Comprimento nominal do poste, expresso em metros.

Definido o comprimento de engastamento, posicionou-se o poste na bancada de ensaio a partir da base do poste, respeitando o comprimento de engastamento (Figura 22 a). Juntamente, posicionou-se o carrinho de apoio para sustentação do poste, sobre uma chapa metálica (Figura 22 b), a uma distância de  $70 \pm 10\%$  do comprimento do poste. Para o tipo de poste utilizado, a distância foi fixada em 6,30 m, respeitando o exigido pela NBR 8451-3 (ABNT, 2011).



Figura 22: Posicionamento do poste na bancada de ensaio (a) e posicionamento do carrinho de apoio (b).

A condição do engastamento foi verificada através do posicionamento de defletômetros na base do poste (Figura 23), onde este foi submetido à aplicação da carga nominal por 1 min. Neste procedimento não foi observado nenhum deslocamento excessivo no engaste do poste, atendendo deste modo às condições de engastamento exigidas pela NBR 8451-3 (ABNT, 2011).



Figura 23: Verificação da condição e engastamento.

#### 3.4.2.2 Sistema de aplicação de carga e aquisição de dados

O sistema de aplicação de carga utilizado é composto por um motor de acionamento elétrico com uma caixa redutora, flexionando o poste de concreto através de cabos de aço. Este sistema é capaz de aplicar a carga de modo contínuo e progressivo, sem impactos. Na Figura 24 é apresentado o sistema utilizado. O sistema de aplicação foi ancorado na laje de reação do LEME.

Para o ensaio de momento fletor, foi utilizado um sistema auxiliar manual para aplicação da carga  $F_A$ , composto por um sistema de polias, apresentado na Figura 24.

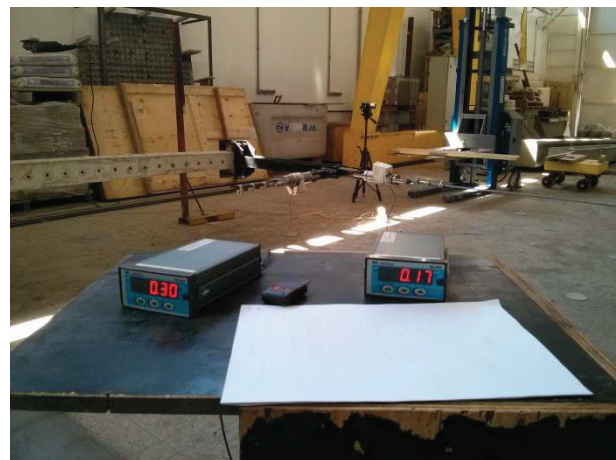


Figura 24: Sistema de aplicação de carga.

A aquisição dos dados, referentes às cargas aplicadas, foi realizada através de células de cargas (Figura 25 a), devidamente calibradas e ligadas a um dispositivo de leitura (Figura 25 b). As células de carga foram ligadas entre o dispositivo de ensaio e o sistema de aplicação de carga principal e auxiliar.



(a)



(b)

Figura 25: (a) Posicionamento das células de cargas (b) sistema de leitura de dados.

### 3.4.2.3 Ensaio para verificação do momento fletor ( $M_A$ )

Com o poste devidamente engastado, foi posicionado um braço rígido a 150 mm do topo do poste (Figura 26 a), onde foram aplicadas duas cargas simultaneamente. A carga  $F_A$  no plano de aplicação da carga nominal (perpendicular ao eixo do poste) e a carga  $F$ , paralela ao eixo do poste aplicada a uma distância de 1,00 m. O esboço da aplicação das cargas  $F_A$  e  $F$  é apresentado na Figura 26 (b).

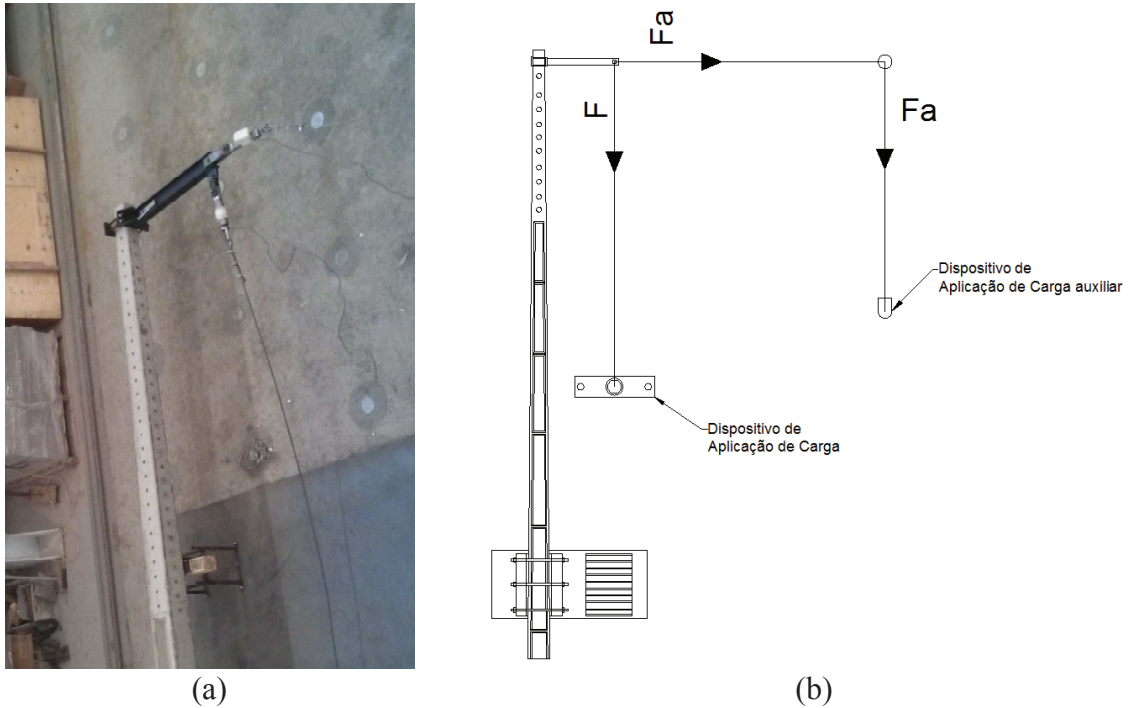


Figura 26: Braço rígido para aplicação das cargas (a), esboço das cargas  $F$  e  $F_a$  (b).

Os valores de  $F_A$  e  $F$  foram obtidos da NBR 8451-1 (ABNT, p.9. 2011), respectivamente de 875 daN e 394 daN. Ambas as cargas foram aplicadas lentamente e sem trancos, conforme as recomendações da NBR 8451-3 (ABNT, 2011). A Figura 27 apresenta o esboço do momento fletor para a aplicação da carga nominal (a) e para o momento resultante da aplicação das cargas  $F_A$ .

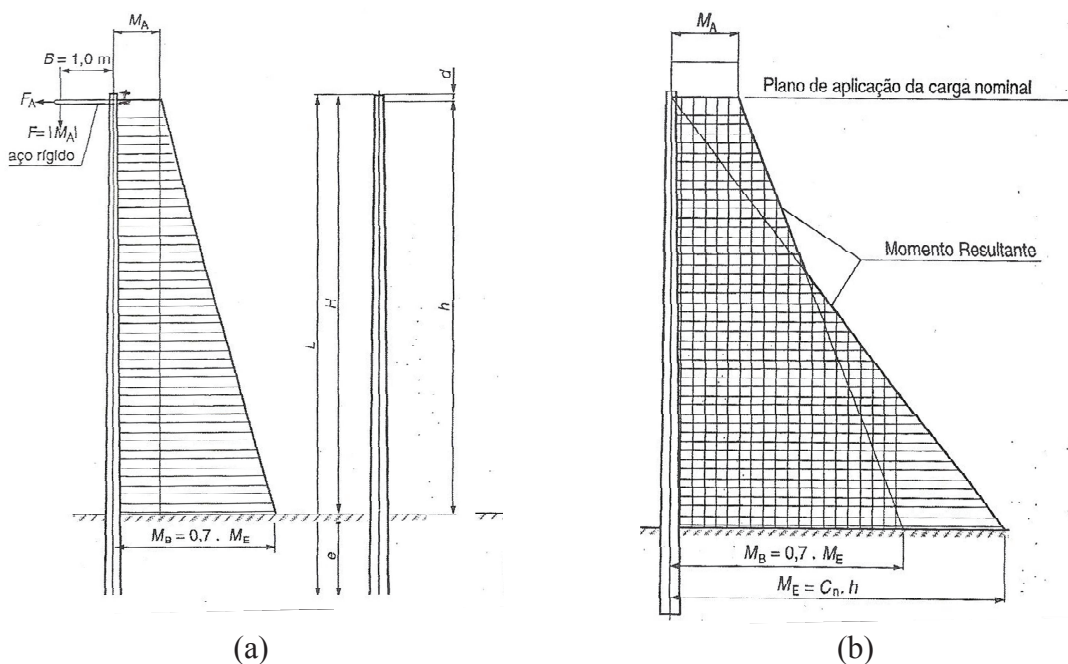


Figura 27: Diagrama do momento fletor para carga nominal (a) e diagrama resultante para a carga  $F$  (b).

(Fonte: Adaptado NBR 8451-3 (ABNT, 2011))

Posteriormente à aplicação das cargas, manteve-se por 3 min, e em seguida foi verificada a existência de fissuras, com o auxílio de um fissurômetro, determinando a posição e abertura das fissuras na parte tracionada do poste. O procedimento é demonstrado na Figura 28.



Figura 28: (a) Determinação da posição da fissura (b) e tamanho da abertura da fissura.

Em seguida, retiraram-se lentamente as cargas aplicadas, verificando a existência de fissuras permanentes na região tracionada do poste. Caso fossem verificadas fissuras após o alívio da carga, anotava-se a posição e a abertura das fissuras.

#### 3.4.2.4 Ensaio de elasticidade com carga nominal ( $C_n$ ) e carga no regime elástico

Com o objetivo das determinações das flechas nominal e residual, foi posicionada uma baliza na seção afastada 50 cm do topo do poste. Primeiramente, antes da aplicação da carga nominal, foi determinada a posição inicial (ponto zero) entre a baliza e meio da seção do poste. A Figura 29 apresenta o posicionamento da baliza e a determinação da posição inicial.

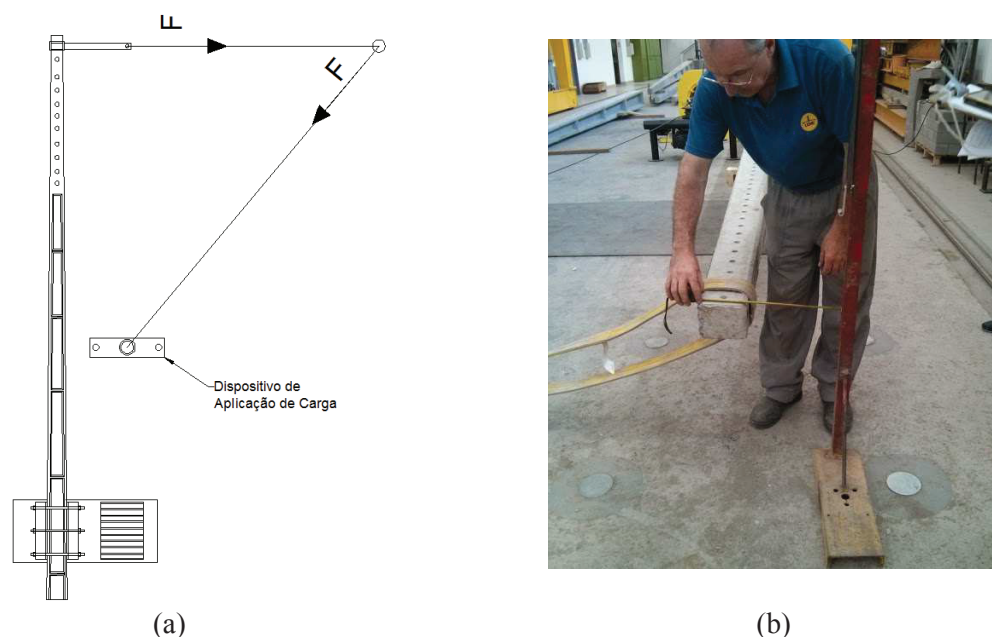


Figura 29: Esboço da aplicação da carga nominal (a) e posicionamento da baliza(b).

Em seguida, aplicou-se de modo contínuo a carga nominal ( $C_n=300$  daN), mantendo este valor por 3 min. Após este intervalo foi medida a flecha nominal (Figura 30) e verificada a existência de fissuras, anotando a posição e abertura das fissuras. Posteriormente elevou-se a carga até o regime elástico ( $1,4*C_n=420$  daN), mantendo nesse valor por 3 min.



Figura 30: Determinação da flecha nominal.

Passados os 3 min toda a carga aplicada foi retirada lentamente. Aguardou-se 3 minutos e determinou-se a flecha residual e verificou-se a existência de fissuras na parte tracionada do poste, anotando a abertura e a posição das fissuras.

#### 3.4.2.5 Ensaio de ruptura

Após a conclusão do ensaio de elasticidade, carregou-se novamente o poste de modo contínuo e crescente até a ruptura. O carregamento foi cessado somente quando houve a ruptura do elemento (Figura 31), determinando deste modo a carga máxima de ruptura.



Figura 31: Ruptura do poste.

A NBR 8451-1 (ABNT, 2011) recomenda como alternativa ao ensaio de ruptura a execução do ensaio de carga vertical, que como objetivo avaliar o comportamento do topo do poste. Entretanto como optou-se pelo ensaio de ruptura, o ensaio de carga vertical não foi executado.

### 3.4.3 Extração de testemunhos

A extração dos testemunhos dos postes de concreto foi realizada segundo as orientações da NBR 7680 (ABNT, 2007). Foram extraídos testemunhos com 95 mm e 30 mm de diâmetro. A extração foi realizada após o ensaio de ruptura dos postes e os corpos de prova foram extraídos em regiões sem a presença de fissuras, originadas da ruptura dos postes.

Os corpos de prova com 95 mm de diâmetro foram destinados ao ensaio de penetração de íons cloreto e absorção de água, enquanto que os corpos de prova com 30 mm de diâmetro foram destinados ao ensaio de resistência à compressão. O procedimento de extração está demonstrado na Figura 32



Figura 32: (a) Posicionamento do equipamento e extração dos corpos de prova b) e corpos de prova extraídos.

Quanto à avaliação da resistência à compressão de testemunhos extraídos de estruturas, a NBR 7680 (ABNT, 2007) recomenda o uso de corpos de prova de 100 mm de diâmetro, ou corpos de prova com diâmetro 3 vezes maior que a dimensão máxima do agregado. Entretanto, devido às limitações da espessura do poste, o qual apresenta alma de 50 mm, a avaliação da resistência à compressão foi adotada em corpos de prova de 30 mm de diâmetro com o intuito de manter a relação da altura e diâmetro próximo a 2.

Vieira Filho (2007) comprovou estatisticamente a um nível de significância de 1% que há a possibilidade da utilização dos testemunhos menores que o recomendando pela NBR 7680 (ABNT, 2007) de 75, 50 e 25 mm, na avaliação de estruturas acabadas. Neste estudo não foi constatada a influência do não enquadramento na condição do diâmetro do testemunho ser maior que 3 vezes o diâmetro do agregado, considerando-se a participação em massa da brita 25 mm no concreto em apenas 12%, número semelhante ao utilizado nos traços empregados na moldagem dos postes.

#### 3.4.4 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova extraídos dos postes (Figura 33 b) seguiu as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007), cujo procedimento de ensaio foi apresentado no item 3.3.2. Os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova extraídos dos postes estão apresentados no item 6.3.

A preparação das bases dos corpos de prova foi realizada utilizando capeamento com argamassa de cimento, método recomendado pela NBR 5738 (ABNT, 2008), tomando-se os devidos cuidados para garantir o paralelismo entre as faces (Figura 33 a). Juntamente, foram determinadas as dimensões, a fim de determinar os coeficientes de correção para cada um dos corpos de prova submetidos ao ensaio, conforme recomendações da NBR 7680 (ABNT, 2007).



(a)



(b)

Figura 33: Preparação das bases dos corpos de prova (a) e determinação da resistência à compressão (b).



### 3.4.5 Absorção

A determinação de absorção visa avaliar a relação da porosidade com a quantidade de água absorvida, para tal foi utilizado o método prescrito pela NBR 8451-4 (ABNT, 2011). O método consiste basicamente na imersão de corpos de prova, extraídos dos postes de concreto, em temperatura ambiente por um período não inferior a 24 horas. Decorrido este período foi determinada a massa saturada, até obter a constância de massa. Em seguida os corpos de prova são secos em estufa por um período de 24 horas. O procedimento para a determinação da absorção está demonstrado na Figura 33.



Figura 34: Execução do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica.

Para comparação com os requisitos exigidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) quanto aos limites de absorção de água, foi utilizado o método descrito acima, sendo os resultados obtidos apresentados no item 6.5.

### 3.4.6 Penetração de íons cloreto

Com o intuito de avaliar os indicativos de durabilidade dos postes de concreto armados moldados, adotou-se como a penetração de íons cloreto, apresentando os resultados no item 6.6. Para tal, seguiu-se as orientações da ASTM C1202 (2012)

Este método consiste em monitorar a quantidade de carga elétrica passante através de uma amostra de concreto com 50 mm de espessura e diâmetro de 100 mm durante um período de 6 horas. Uma diferença de potencial de 60 V DC é mantida entre as extremidades do corpo de prova, sendo que uma delas é mantida em contato com uma solução de cloreto de sódio e a

outra em uma solução de hidróxido de sódio. Deste modo relaciona-se a carga total passante, em coulombs, com a resistência à penetração de íons de cloreto das amostras.

Quanto à altura os corpos de prova, os mesmos ficaram compreendidos na faixa recomendada pela ASTM C1202 (2012) nos valores de  $50 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ . Estes foram saturados e preparados segundo as orientações da referida norma, acima citada. Tomou-se os devidos cuidados a fim de garantir a vedação dos corpos de prova, e tal procedimento está apresentado na Figura 35.



Figura 35: Preparação dos corpos de prova para ensaio de penetração de íons cloreto.

Os corpos de prova, após a preparação, foram colocados entre duas células acrílicas, cada célula com  $280 \text{ cm}^3$  de volume de solução, conforme ilustrado na Figura 36 (a). Uma célula foi preenchida com uma solução aquosa de NaOH 0,3M e a outra com solução aquosa com 3% de NaCl. Os dois pólos da célula foram conectados à fonte de tensão de 60 V, conforme ilustrado na Figura 36 (b). A diferença de potencial foi mantida por um período de 6 horas, sendo realizadas as leituras dentro deste período. A execução do ensaio pode ser observada na Figura 37.

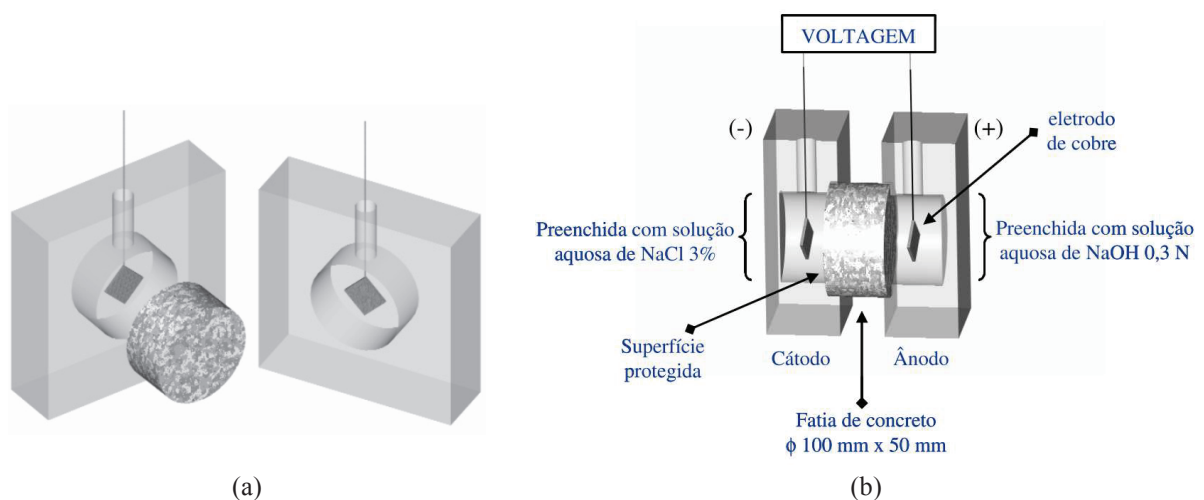


Figura 36: Célula utilizada na migração de íons (a) e arranjo experimental (b)  
Fonte: Adaptado (MEDEIROS, 2008)

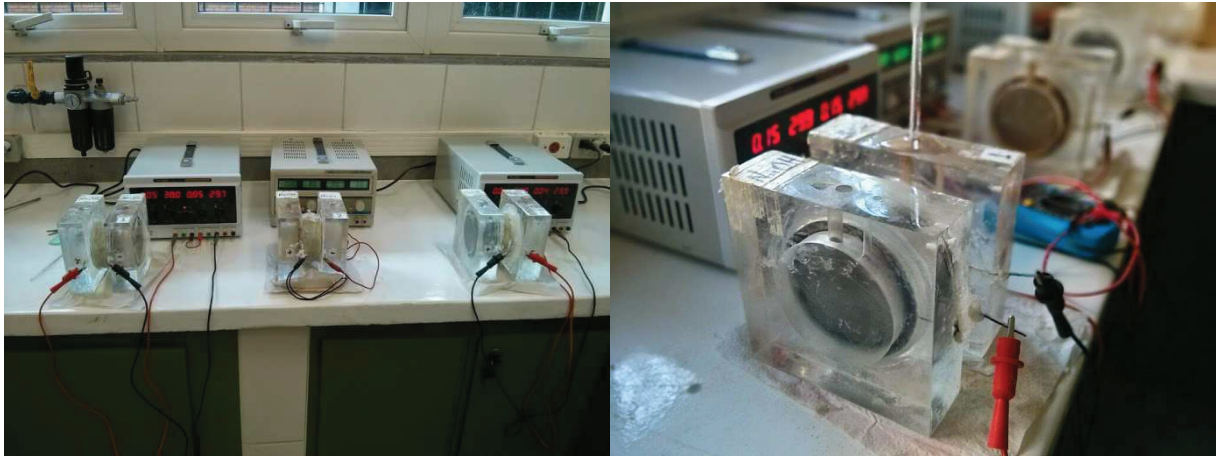


Figura 37: Execução do ensaio de penetração de íons cloreto.

Em seguida, com os valores obtidos, foi determinada a carga total passante através da Equação 6, representando uma média da condutibilidade elétrica do concreto durante o período do ensaio.

Equação 6

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360})$$

Na qual:

$Q$  = Carga passante, expressa em coulombs;

$I_0$  = Corrente no instante em que a tensão é aplicada, expressa em ampères;

$I_t$  = Corrente em  $t$  minutos após a tensão ser aplicada, expressa em ampères;

### 3.4.7 Estimativa da profundidade carbonatada e considerações sobre a vida útil de projeto

Com o intuito de estimar a vida útil dos postes de concreto armado, baseou-se no método com enfoque determinístico, considerando a não despassivação da armadura, para isso adotou-se como mecanismo de transporte a difusão do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Realizou-se avaliação da frente de carbonatação, difusão de  $\text{CO}_2$ , através do método colorimétrico. Para tal, utilizou-se a fenolftaleína com 1% de concentração como indicador de pH.

A determinação da profundidade de carbonatação está demonstrada na Figura 38, após a aplicação da fenolftaleína. A leitura foi realizada na idade de 215 dias após a moldagem do

poste. Os corpos de prova foram extraídos com idade de 15 dias e armazenados em ambiente de laboratório com temperatura controlada em  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , até a idade de leitura da frente de carbonatação.



Figura 38: Determinação da profundidade de carbonatação.

## 4 ESTUDOS PRELIMINARES

Antecedentemente aos estudos de dosagem e aperfeiçoamento dos traços para a produção de postes de concreto armado, realizaram-se estudos preliminares frente às condições de cura, a influência da umidade dos agregados e a influência da água de amassamento.

Em todos os estudos preliminares, tomou-se como base o traço referência utilizado para produção dos postes de concreto armado. As características do traço estão apresentadas na Tabela 15, mostrando o consumo por metro cúbico de cada material componente do traço, juntamente com o traço unitário e algumas propriedades do traço.

Tabela 15: Propriedades e características do traço utilizado nos estudos preliminares.

Material	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Traço unitário
Cimento CP-V	428	1,00
Areia Natural	895	2,09
Brita 0	694	1,62
Brita 1	219	0,51
Água	252	-
Características		Valor
Abatimento de tronco de cone (mm)		170 ± 20 mm
Relação a/c		0,59
Teor de argamassa		56 %

### 4.1 INFLUÊNCIA DA UMIDADE DOS AGREGADOS

Constatou-se no processo produtivo dos postes de concreto armado a incorreta aferição da umidade dos agregados, a qual pode influenciar diretamente nas propriedades do concreto devido à alteração da relação água/cimento (a/c). Verificou-se que o teor de umidade dos agregados não era aferido diariamente, conforme observado em visita à fábrica, sendo apenas estimado em 1%. Desta forma, haviam alterações na composição dos traços e, consequentemente, nas características do concreto.

A Tabela 16 apresenta a composição do traço com os materiais secos, corrigidos de acordo com os valores de umidade estipulado pela empresa (1%) e o valor da umidade dos agregados aferido corretamente (4%). Para comparação com os traços aprimorados foi utilizado o traço

com umidade dos agregados incorretos como referência, por este ser utilizado atualmente na produção dos postes de concreto armado.

Além da incorreta aferição da umidade dos agregados interferirem na relação a/c do concreto, esta também modifica a trabalhabilidade do concreto, reduzindo o abatimento de 170 para 100 mm (Tabela 16).

Tabela 16: Composição e propriedades dos traços com a correta e incorreta aferição da umidade dos agregados.

Material	Aferição incorreta (1%)		Aferição correta (4%)	
	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Traço unitário	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Traço unitário
Cimento CP-V	428	1	433	1
Areia Natural	895	2,09	869	2,03
Brita 0	694	1,62	694	1,62
Brita 1	219	0,51	219	0,51
Água	252	-	225	-
Propriedades	Valor			
Abatimento (mm)	170 mm		100 mm	
Relação a/c	0,59		0,52	
Teor de argamassa	59%		59%	

Com o objetivo de avaliar a influência da umidade dos agregados, realizou-se um estudo comparando os efeitos da correta e a errônea aferição. Foram executados os traços apresentados na Tabela 16 e analisados quanto à resistência à compressão para as idades de 14 e 28 dias. Os valores individuais para cada corpo de prova, juntamente com a média e desvio padrão para cada combinação estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Resistência à compressão em relação ao teor de umidade dos agregados.

Umidade	Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
4%	14	41,9	41,7	0,80
		42,4		
		40,9		
	14	43,7	44,0	0,50
		43,9		
		44,6		
1%	28	30,0	28,1	1,60
		27,1		
		27,3		
	28	34,0	33,0	0,93
		32,1		
		32,9		

Na Figura 39 podem-se observar os valores médios obtidos da resistência à compressão para os diferentes teores de umidade dos agregados, aonde se percebe que o aumento do teor umidade, sem a devida correção da composição do traço de concreto, leva à redução da resistência à compressão do concreto para ambas as idades. Esta redução da resistência deve-se principalmente em função do aumento da relação a/c do concreto, em razão do aumento da umidade dos agregados.

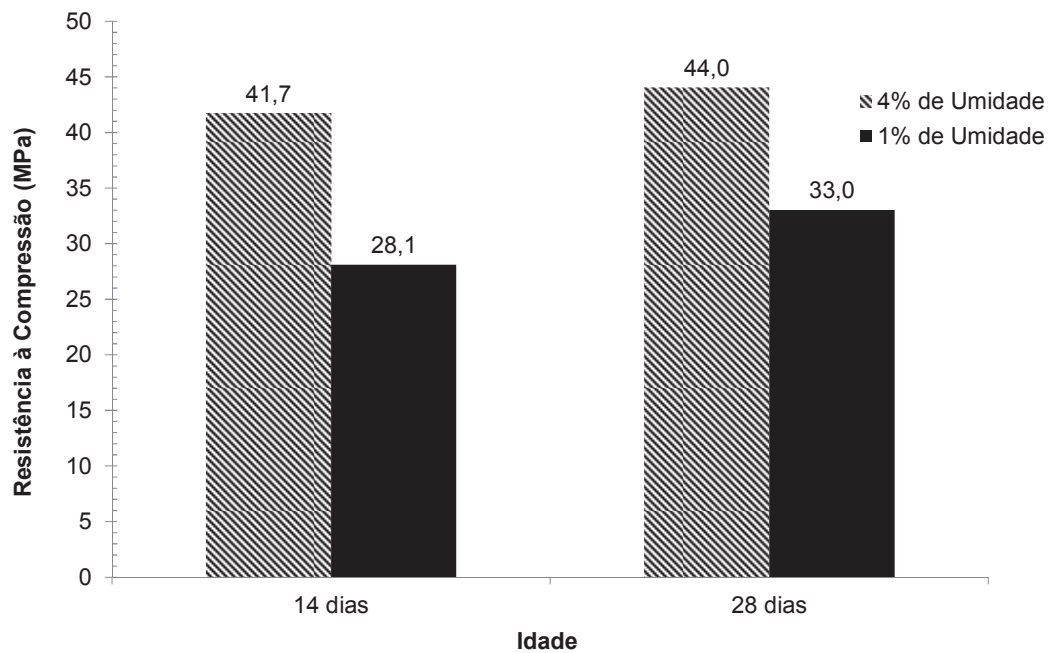


Figura 39: Influência da umidade dos agregados na relação a/c e na resistência à compressão.

## 4.2 CONDIÇÕES DE CURA

No processo produtivo dos postes de concreto armado, os mesmos são submetidos à cura térmica por um período de 6 horas após a moldagem. Este procedimento é realizado através da cura à vapor submetido à temperatura de 60°C. A fim de manter as mesmas condições de cura, reproduziu-se as mesmas da fábrica no laboratório.

Desde modo, desenvolveu-se uma câmara de cura utilizando um sistema de geração de vapor pela ebulição da água por resistências elétricas. O sistema de geração de vapor localizava-se na parte inferior da câmara, formado por três fontes geradoras equidistantes umas das outras (Figura 40 (a)). A temperatura foi monitorada durante todo o período de cura térmica com o

auxílio de termopares distribuídos ao longo da câmara em alturas diferenciadas, como apresentado na Figura 40 (a).

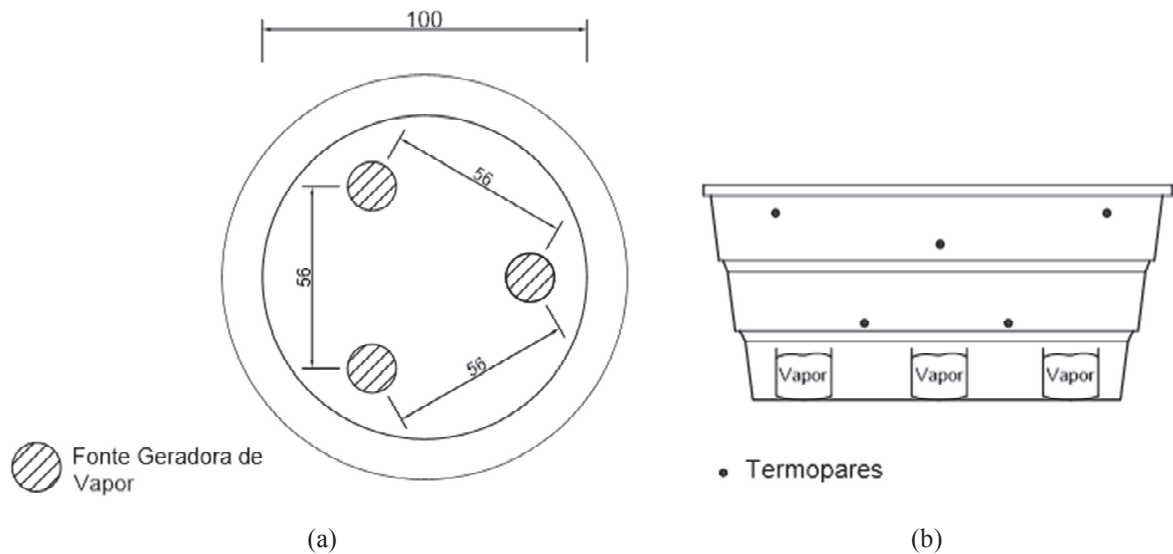


Figura 40: (a) Fontes geradoras de vapor (b) e posicionamento dos termopares.

Os corpos de prova foram colocados na câmara logo após a moldagem e distribuídos em três camadas. Juntamente, foi instalado um sistema formado por ventoinhas para a circulação do vapor internamente na câmara, garantindo assim, a uniformidade da temperatura. Na Figura 41 pode ser observado o posicionamento dos corpos de prova e do sistema de circulação de vapor.

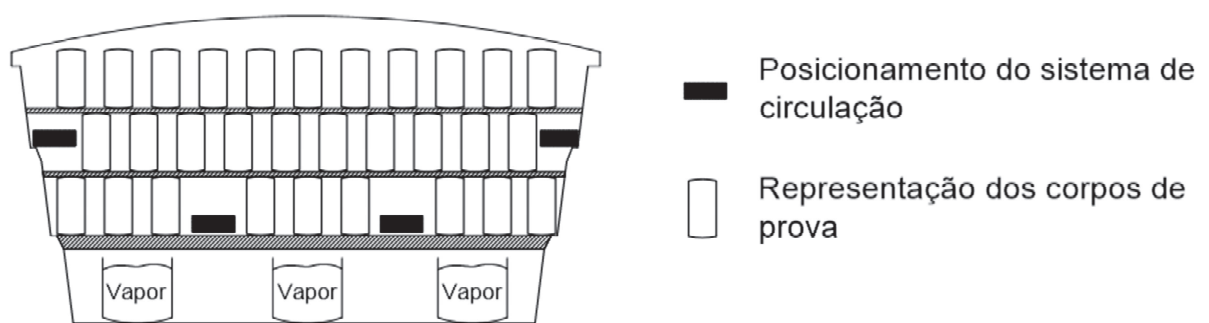


Figura 41: Posicionamento dos corpos de prova e o do sistema de circulação de vapor.

Com a finalidade de avaliar a condição de cura empregada na fábrica e em temperatura ambiente, foram moldados 24 corpos de prova de acordo com o traço descrito na Tabela 15. Os corpos de prova foram rompidos nas idades de 6 horas, 1, 7 e 28 dias, para cada uma das condições de cura. Os resultados obtidos individualmente para cada corpo de prova estão



apresentados na Tabela 18, relacionando a média obtida para cada combinação analisada de condição de cura e idade, juntamente com o desvio padrão.

Tabela 18: Resistência à compressão em diferentes idades para cura ambiente e à vapor.

Idade	Resistência à compressão (MPa)					
	Cura Ambiente (23 °C)			Cura a vapor (60°C)		
	Valor Individual	Média	Desvio padrão	Valor Individual	Média	Desvio padrão
6 horas	0,8	0,7	0,03	16,7	16,2	0,74
	0,8			15,3		
	0,7			16,6		
1 dia	15,0	15,2	0,21	20,6	22,6	1,81
	15,1			23,2		
	15,4			24,1		
7 dias	31,7	32,4	1,49	30,9	32,3	1,20
	31,4			33,0		
	34,1			33,0		
28 dias	40,6	39,8	0,85	35,1	35,8	0,74
	39,7			35,7		
	38,9			36,6		

Analisando os resultados apresentados na Tabela 18 constata-se, como esperado, a evolução da resistência à compressão do concreto em função da idade. Visando a evolução da resistência à compressão em função da idade, a Figura 42 apresenta esta relação em razão das diferentes condições de cura para a média de cada combinação.

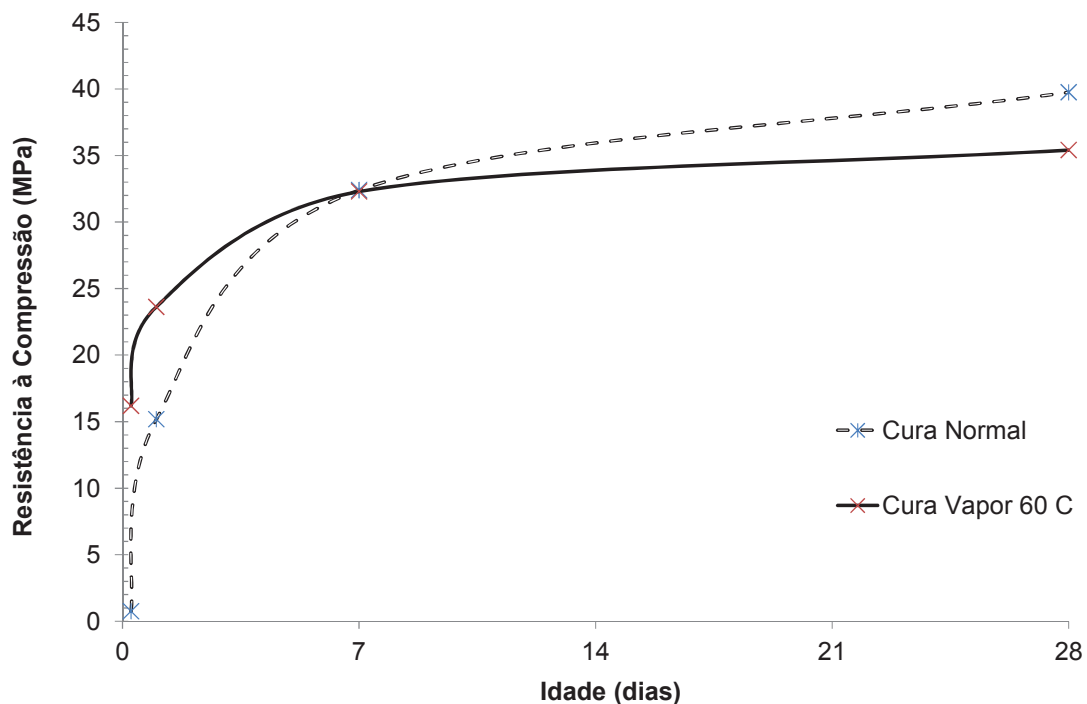


Figura 42: Evolução da resistência à compressão para as diferentes condições de cura.

Na Figura 42 e na Tabela 18, observam-se que nas primeiras idades (6 horas e 1 dia) a influência exercida pela aplicação da cura à vapor eleva a resistência à compressão do concreto de 0,7 MPa para 16,2 MPa nas primeiras 6 horas. Para a idade de 1 dia, a diferença entre as condições de cura reduz de 23,6 MPa para 15,2 MPa quando compara-se a cura à vapor com a cura em temperatura ambiente.

Observando o comportamento das condições de cura a 7 dias, verifica-se que ambas apresentam resistências próximas, de 32,3 MPa para cura a vapor e 32,4 MPa em temperatura ambiente. Entretanto, quando se analisa a resistência à compressão do concreto aos 28 dias observa-se que a cura a vapor reduz a resistência do concreto de 39,8 MPa para 35,4 MPa. Este fenômeno observado pode ser devido à formação precoce dos cristais de hidratação do cimento pela aceleração da cura do concreto, formando cristais mais longos e frágeis, reduzindo assim, a resistência à compressão do concreto para maiores idades.

### 4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ÁGUA DE AMASSAMENTO

De acordo com as recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2006), a água utilizada para o amassamento do concreto deve ser potável, em condições de consumo humano. Porém, para a dosagem do concreto, a empresa utiliza água de um sistema de captação próprio, sobre a qual não apresenta ensaios sobre as condições de potabilidade da água.

Considerando que os estudos para aperfeiçoamento dos traços foram realizados no LEME, realizou-se uma análise quanto ao tipo de água utilizada para o amassamento do concreto. Deste modo, foi utilizada a água proveniente da empresa e a água da rede de distribuição da concessionária de Porto Alegre.

Com a finalidade de avaliar a influência do tipo da água de amassamento para os estudos futuros, analisou-se o traço apresentado na Tabela 15 utilizando as duas águas descritas acima. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 43, correlacionando a resistência à compressão para as duas águas analisadas em diferentes idades.

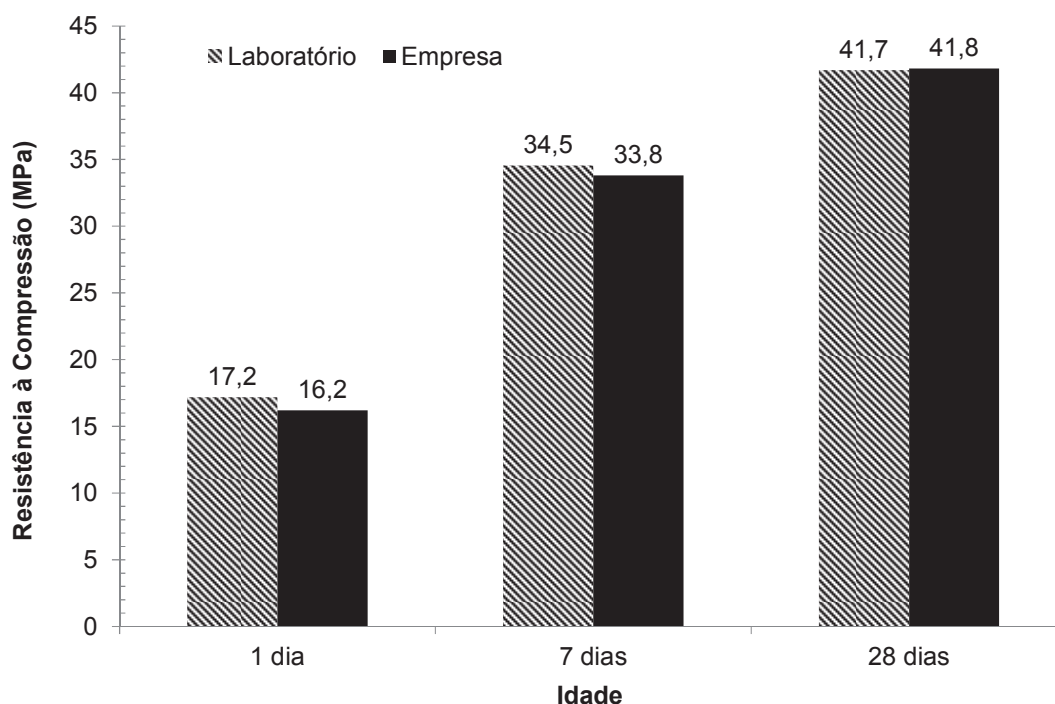


Figura 43: Influência da água de amassamento na resistência à compressão do concreto.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 43, constata-se que os resultados obtidos mantiveram-se próximos quanto à resistência à compressão, para ambas as idades. Os dados conjuntamente foram analisados pelo método estatístico de Análise de Variância (ANOVA).

A ANOVA tem a finalidade de identificar se a diferença das médias entre grupos de dados é significativamente maior que a o erro amostral, deste modo, o método estatístico avalia se há diferenças significativas entre as médias dos grupos, influenciando, ou não, a variável de resposta. Para a análise estatística utilizou-se o software Statistica 8.0.

A análise de variância, ANOVA, está apresentada na Tabela 19, na qual comprova-se que não há diferenças significativas entre os dois tipos de água analisadas. Portanto, pode ser utilizada qualquer uma das duas fontes de água. Para o presente estudo optou-se pela utilização da água proveniente da rede de distribuição.

Tabela 19: Análise de variância entre os tipos de água utilizadas.

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Idade	1989,19	2	994,60	1717,08	0,0	S
Tipo de água	1,50	1	1,50	2,59	13,4	NS
Idade*Tipo de água	0,86	2	0,43	0,74	49,6	NS
Erro	6,95	12	0,58			

\* Para um nível de confiança de 95%  
S – significativo NS – não significativo

## 5 ESTUDOS DE DOSAGEM

Os estudos de dosagem foram divididos em cinco partes. Inicialmente, determinou-se a composição ideal para os agregados graúdos e miúdos. Posteriormente, realizou-se a confecção do diagrama de dosagem, através do método do IPT/EPUSP para o concreto com e sem a adição de CAA. Em seguida, avaliou-se a eficiência dos aditivos superplastificantes e adição de fibras ao concreto. Por fim, definiu-se os traços a serem empregados na produção dos postes de concreto armado em escala real.

### 5.1 COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS

A determinação da composição ideal para os agregados foi dividida em duas análises: uma para o agregado graúdo e outra para o agregado miúdo. Na composição dos agregados graúdos, foi analisada a melhor proporção entre duas diferentes classes granulométricas de agregados, brita 1 e brita 0. Quanto à composição dos agregados miúdos, foi analisada a melhor combinação entre a areia artificial e a areia média.

#### 5.1.1 Agregados graúdos

Tendo em vista que a forma dos agregados graúdos é decisiva e mais preponderante que a granulometria (O'REILY, 1998), optou-se pela utilização do método de empacotamento de partículas para determinação da melhor proporção entre a brita 1 e a brita 0.

Deste modo, definiu-se a utilização do método normatizado pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) para a determinação da massa unitária compacta da mistura. Utilizou-se para a determinação um recipiente de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, estando dentro das recomendações de De Larrard (1999), para evitar o efeito container. O procedimento para a determinação da massa unitária compacta é demonstrado na Figura 44.



Figura 44: Passos para a determinação da massa unitária compacta

Inicialmente, foi determinada a massa unitária da mistura contendo somente brita 1. Em seguida, realizou-se novamente o procedimento substituindo a massa da brita 1 por 10% de brita 0. Para cada uma das combinações, foi determinada a massa específica da mistura, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009), a fim de obter o índice de vazios da mesma. As misturas analisadas estão apresentadas na Tabela 20, conjuntamente com as proporções de cada uma das frações granulométricas e os valores obtidos para a massa unitária compacta e o volume de vazios.

Tabela 20: Proporções entre brita 1 e brita 0 utilizadas no empacotamento dos agregados graúdos

Identificação	Proporção		Massa unitária compacta (kg/dm <sup>3</sup> )	Volume de vazios (%)
	Brita 1	Brita 0		
Mistura 1	100 %	0 %	1,687	39,77
Mistura 2	90 %	10 %	1,724	38,43
Mistura 3	80 %	20 %	1,739	37,90
Mistura 4	70 %	30 %	1,753	37,41
Mistura 5	60 %	40 %	1,752	37,44
Mistura 6	50 %	50 %	1,742	37,77

Após a determinação da massa unitária compacta e cada uma das combinações, traçou-se a relação entre a massa unitária compacta da mistura e porcentagem de Brita 0 para cada uma das combinações, essa relação está apresentada na Figura 45.

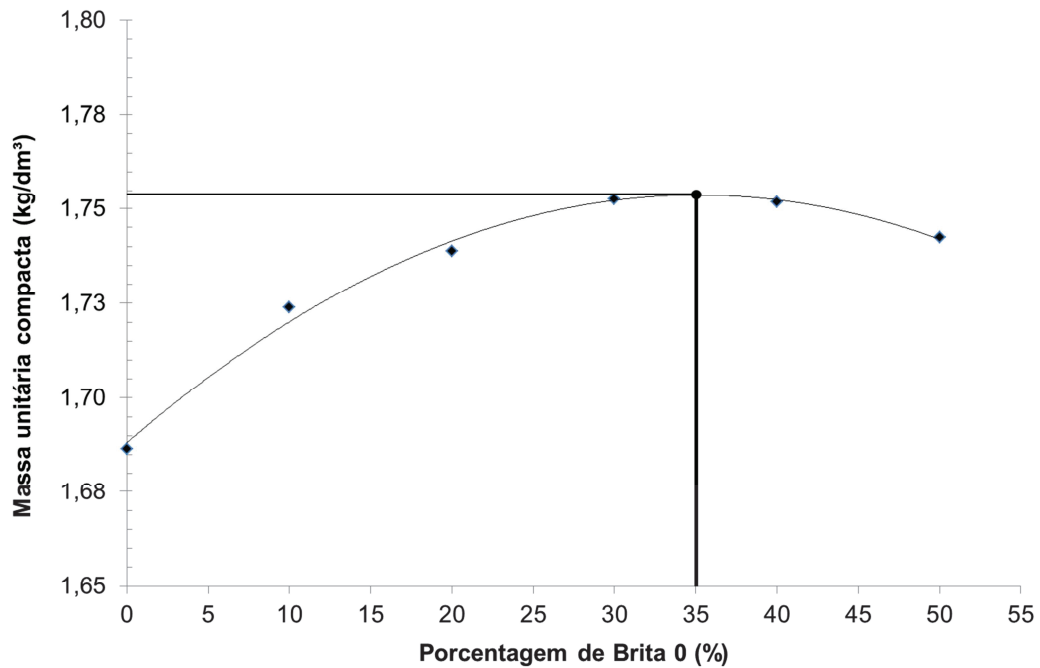


Figura 45: Relação entre a massa unitária compacta e a porcentagem de Brita 0 da mistura.

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 20 e a relação expressa graficamente na Figura 45 verifica-se, que com a substituição da Brita 1 por Brita 0, há uma tendência do aumento da massa unitária compacta até o teor de substituição de 35%. Após este, há uma tendência da redução da massa unitária compacta com o aumento do teor de Brita 0, evidenciando o valor máximo da massa unitária compacta para a substituição de 35% da Brita 1 por Brita 0.

Outro ponto que pode ser observado na Figura 46 é a tendência da redução do volume de vazios da mistura com o aumento do teor de Brita 0. Este fenômeno também ocorre até o teor de substituição de 35%. Após este teor, há uma tendência do aumento do volume de vazios com maiores teores de Brita 0.

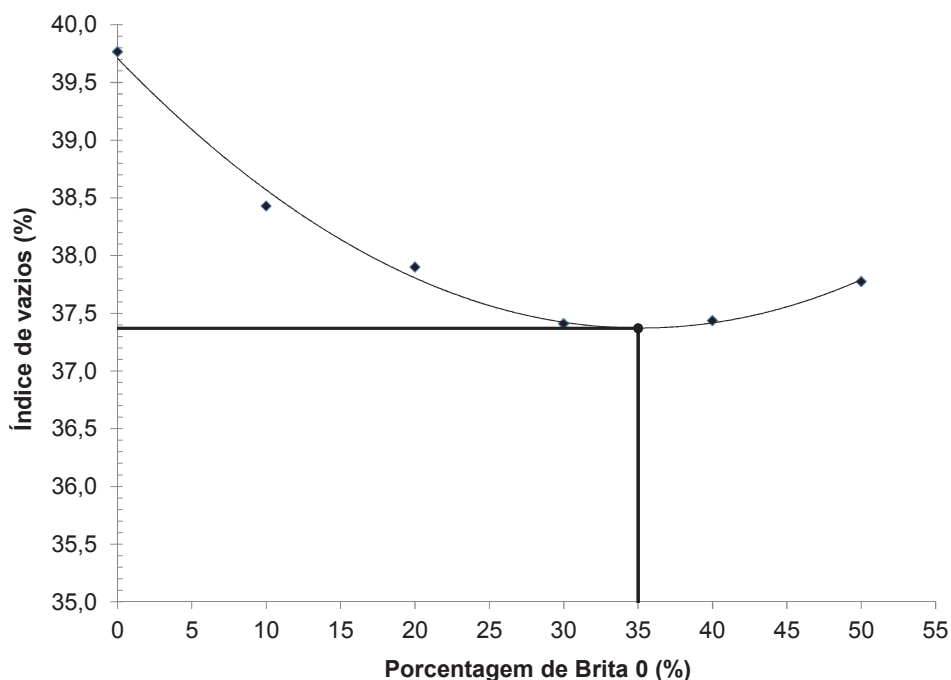


Figura 46: Relação entre o volume de vazios e a porcentagem de Brita 0 da mistura

O aumento da massa unitária compacta e a redução do volume de vazios para teores de Brita 0 até 35%, é evidenciado por estas duas grandezas serem inversamente proporcionais uma da outra. Tanto que, quando há a redução da massa unitária a partir de 35% de Brita 0, há um aumento do volume de vazios da mistura formada por Brita 1 e Brita 0.

De tal forma, pode-se concluir que a melhor proporção entre as duas frações granulométricas para os materiais utilizados no estudo é de 65% de Brita 1 e 35% de Brita 0, valores os quais foram adotados para a composição dos agregados graúdos no decorrer dos estudos.

### 5.1.2 Agregados miúdos

A determinação da composição dos agregados miúdos foi realizada através do estudo de argamassas, com diferentes proporções entre areia média e a areia artificial (Tabela 21). Foram analisadas argamassas na proporção 1:3 (cimento : agregado miúdo), em massa, variando a composição do agregado miúdo. Também foi realizado o mesmo estudo com a substituição do cimento por 10% em massa de CCA.

Tabela 21: Proporções entre areia média e areia artificial, utilizadas para a composição dos agregados miúdos.

Identificação	Proporção	
	Areia média	Areia artificial
Mistura 1	100 %	0 %
Mistura 2	90 %	10 %
Mistura 3	80 %	20 %
Mistura 4	70 %	30 %
Mistura 5	60 %	40 %
Mistura 6	50 %	50 %
Mistura 7	40 %	60%
Mistura 8	30 %	70 %

Tendo em vista a possível influência que a substituição de areia natural pela areia artificial poderia ocasionar na trabalhabilidade da mistura, manteve-se constante a relação a/c, fixada em 0,55, para todas as misturas analisadas.

Para a avaliação da trabalhabilidade utilizou-se o método da NBR 7215 (ABNT, 1996), através da mesa de espalhamento, também conhecido como *flow-table*. Adotou-se juntamente a determinação da resistência à compressão como parâmetro de avaliação. Para isso foram moldados corpos de prova 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura. Os procedimentos de moldagem seguiram as orientações da NBR 7215 (ABNT, 1996).

Os resultados para as combinações de areia natural com areia artificial estão apresentados na Tabela 22, expondo os resultados do espalhamento e a resistência à compressão aos 7 dias para os estudos realizados em duas argamassas: 100% de cimento e 90% de cimento com 10% de CCA com substituição em massa.

Tabela 22: Resultados das combinações entre areia natural e artificial.

Identificação	Proporção		Cimento			Cimento + CCA		
	Areia média	Areia artificial	Espalhamento (mm)	Resistência à compressão 7 dias (MPa)		Espalhamento (mm)	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	
				Média	Des. Pad		Média	Des. Pad
Mistura 1	100 %	0 %	225	22,0	0,53	218	21,9	1,30
Mistura 2	90 %	10 %	228	24,8	0,45	228	26,4	0,52
Mistura 3	80 %	20 %	246	28,4	0,92	243	30,2	0,87
Mistura 4	70 %	30 %	253	29,6	0,27	250	32,5	0,27
Mistura 5	60 %	40 %	250	33,3	1,12	249	31,8	0,72
Mistura 6	50 %	50 %	260	32,0	1,15	255	31,9	0,17
Mistura 7	40 %	60%	242	32,9	0,91	255	32,3	0,95
Mistura 8	30 %	70 %	240	32,3	0,63	250	32,4	0,62



A relação entre o espalhamento e a porcentagem de areia artificial está demonstrada na Figura 47, ilustrando-se os resultados para as argamassas com cimento e com adição de CCA. Pela análise da Figura 47, observa-se que com a substituição da areia natural pela areia artificial há uma tendência de aumento do espalhamento até 40% de substituição, tanto para argamassas com cimento e com CCA.

Todavia, a partir de 40% o comportamento passa a ser diferenciado, para ambas as argamassas analisadas. Argamassas apenas com cimento passam a apresentar perda no espalhamento com o aumento do teor de substituição, já argamassas com a adição de CCA passam a apresentar um patamar, tendendo a manter o espalhamento com o aumento do teor de substituição da areia natural pela areia artificial.

De tal modo, observa-se na Figura 47, uma região compreendida entre os teores de areia artificial de 30 a 50%, com os maiores valores de espalhamento, tanto para argamassas com cimento e com adição de CCA.

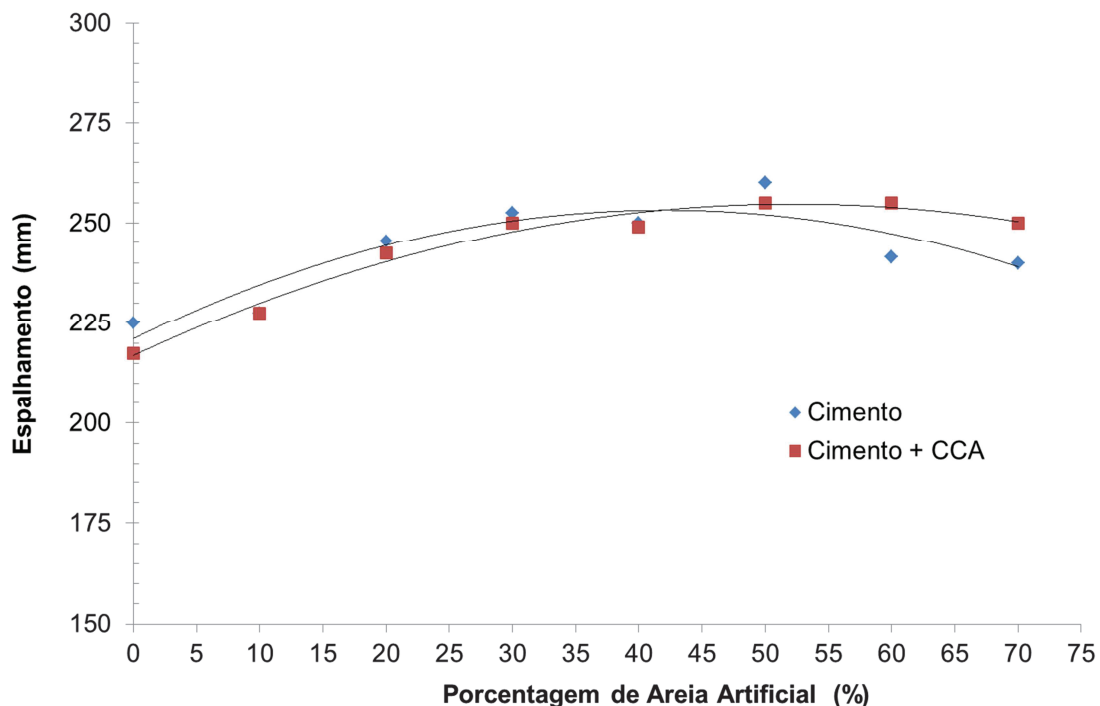


Figura 47: Relação entre espalhamento e a porcentagem de areia artificial.

Adotando-se a resistência à compressão como parâmetro principal para a determinação do teor de substituição da areia natural, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) em relação à resistência à compressão das argamassas aos 7 dias, apresentada na Tabela 23, onde consta-se que a substituição de areia natural por areia artificial exerce influência

significativa quanto a resistência à compressão. Entretanto não houve diferença significativa entre as argamassas com adição de CCA e sem adição.

Tabela 23: Análise de variância para a substituição da areia natural pela areia artificial.

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Teor de Areia Artificial	542,73	1	77,53	48,61	0,00	S
Tipo Aglomerante	5,32	7	5,32	3,33	7,78	NS
Teor*Aglomerante	14,70	1	2,10	1,32	27,65	NS
Erro	47,85	7	1,60			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

Na Figura 48 relaciona-se a resistência à compressão em função da porcentagem de substituição da areia natural pela areia artificial. Analisando-se a Figura 48, observa-se que, com o aumento do teor de areia artificial na mistura, há um aumento da resistência à compressão, tanto para argamassas com cimento e com adição de CCA. Esta tendência de elevação da resistência ocorre até o teor de 40%, após há um crescimento menos acentuado, com uma tendência de estabilização da resistência à compressão.

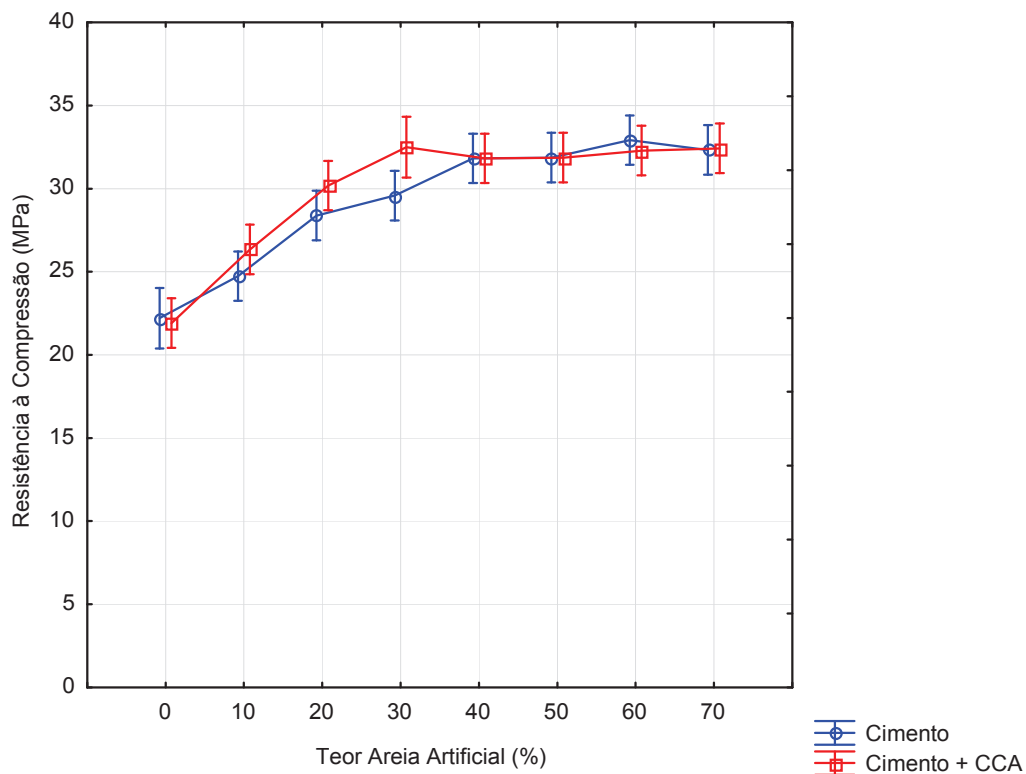


Figura 48: Relação entre espalhamento e a resistência à compressão aos 7 dias.

Através da análise do estudo realizado em argamassas, levando em consideração o espalhamento e a resistência à compressão como parâmetros, examinou-se uma faixa de melhor desempenho da substituição de areia natural pela areia artificial, compreendida entre 30 e 50% de substituição.

A partir deste ponto, enfocou-se um estudo da substituição da areia natural em concreto utilizando para tal propósito o traço empregado nos estudos preliminares, apresentado na Tabela 15. Foram analisados os teores de substituição de 30%, 40% e 50% da areia natural pela areia artificial, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 24, relacionando a resistência à compressão, para diferentes idades, com o teor de substituição.

Tabela 24: Resistência à compressão para diferentes teores de areia artificial.

Teor (%)	Resistência à Compressão (MPa)					
	1 dia		7 dias		28 dias	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
30	13,5	0,69	28,6	1,51	34,3	0,28
40	14,9	0,43	31,8	0,61	37,5	2,18
50	16,0	0,41	33,2	0,69	40,5	0,59

Perante os resultados obtidos, realizou-se uma análise de variância (ANOVA), relacionado o teor de substituição da areia natural pela areia artificial para diferentes idades, os resultados está apresentado na Tabela 25. Analisando-se os resultados, constatou-se que o teor de substituição exerce influência significativa na resistência à compressão do concreto, também como foi constatado na análise das argamassas.

Tabela 25: Análise de variância para a substituição da areia natural pela areia artificial em concreto.

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Teor de Areia Artificial	91,50	2,00	45,75	45,16	0,00	S
Idade	2463,02	2,00	1231,51	1215,77	0,00	S
Idade*Teor	11,46	4,00	2,86	2,83	5,56	NS
Erro	18,23	18,00	1,01			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 49, relacionando a resistência à compressão em função dos teores analisados, para diferentes idades.

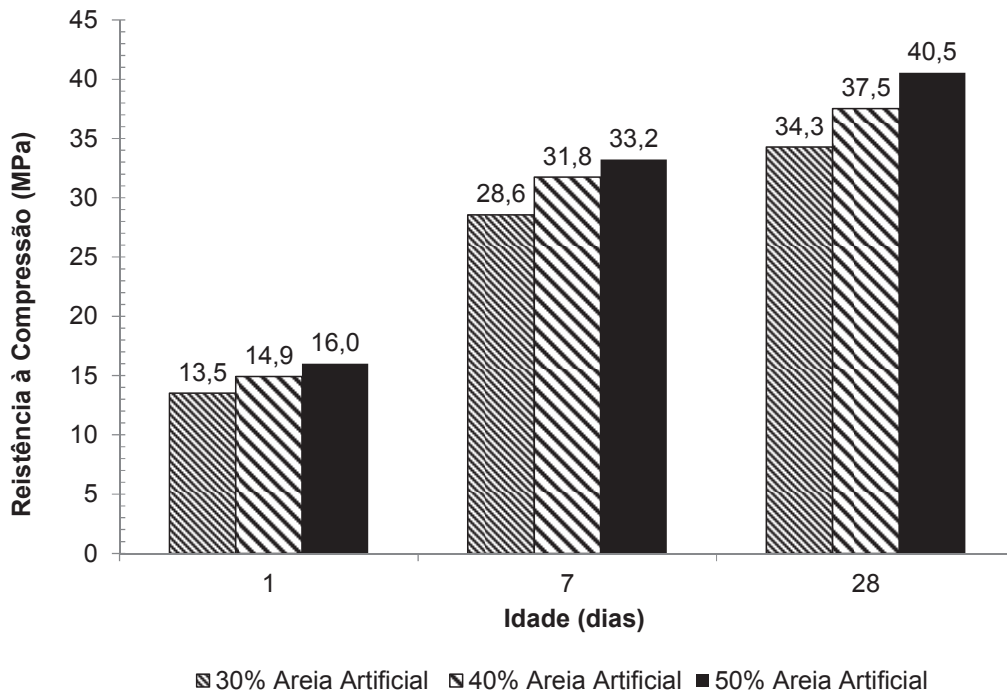


Figura 49: Resistência à compressão para diferentes teores de substituição da areia natural por areia artificial.

Observando-se a Figura 49, percebe-se que para qualquer idade analisada, quanto maior o teor de areia artificial, maior é a resistência à compressão do concreto. Além disso, a substituição da areia natural pela artificial não apresentou redução da trabalhabilidade do concreto, sendo que esta manteve-se na faixa de  $170 \pm 20$  mm para os três teores analisados.

Portanto, adotou-se a composição do agregado miúdo em 50% de areia natural e 50% de areia artificial para os estudos de dosagem.

## 5.2 DIAGRAMA DE DOSAGEM

Adotou-se o método do IPT/EPUSP para a dosagem do concreto através da confecção dos diagramas de dosagem. As orientações, parâmetros e leis de comportamento do concreto foram seguidas de acordo com o apresentado no item 2.4.1.2

Analisando os requisitos exigidos quanto à produção dos postes de concreto, expostos na descrição do programa experimental (3.1), adotou-se uma faixa de resistência à compressão do concreto de 25 a 40 MPa, com o objetivo de obter-se a resistência à tração necessária para o içamento do poste. Para atingir esta faixa foram adotadas as seguintes relações entre

cimento e materiais secos (m); 4,0 (rico); 5,5 (médio) e 7,0 (pobre). Como trabalhabilidade do concreto, fixou-se o abatimento em  $170 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ . A composição unitária e as propriedades dos traços utilizados para a composição do diagrama estão apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26: Composição dos traços utilizados na confecção do diagrama e dosagem.

Material	Traço unitário		
	Rico	Médio	Pobre
Cimento	1	1	1
Areia Natural	0,9	1,32	1,74
Areia Artificial	0,9	1,32	1,74
Brita 0	0,77	1,00	1,23
Brita 1	1,43	1,86	2,29
Propriedade	Valor		
a/c	0,52	0,75	0,80
M (Materiais secos)	4	5,5	7
a	1,8	2,64	3,48
p	2,2	2,86	3,52
Teor de argamassa ( $\alpha$ )	56%	56%	56%
abatimento (mm)	$170 \pm 20$	$170 \pm 20$	$170 \pm 20$

A dosagem foi realizada avaliando-se tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração por compressão diametral do concreto para as idades de 6 horas, representando o instante do içamento do poste da forma, a 1 dia representando o movimentação do poste para estocagem e a 28 dias representando a idade para o controle tecnológico do concreto. Foi adotado o procedimento de cura a vapor por um período de 6 horas, conforme descrito no item 4.2.

Os resultados da resistência à compressão em função da relação a/c estão apresentados na Figura 50, para as idades de 6 horas, 1 dia e 28 dias. Juntamente é apresentada a equação de Abrams para cada uma das idades e seus respectivos  $R^2$ .

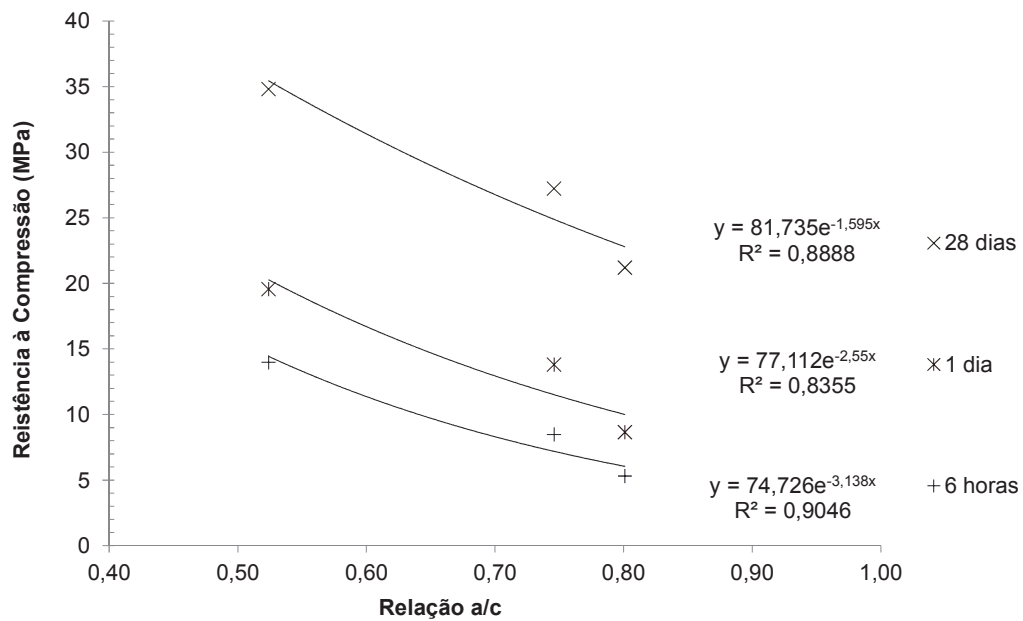


Figura 50: Resistência à compressão em função da relação a/c.

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c estão demonstrados na Figura 51, para as idades de 6 horas e 1 dia. Juntamente é apresentada a equação de Abrams para cada uma das idades e seus respectivos coeficientes de determinação<sup>1</sup>  $R^2$ .

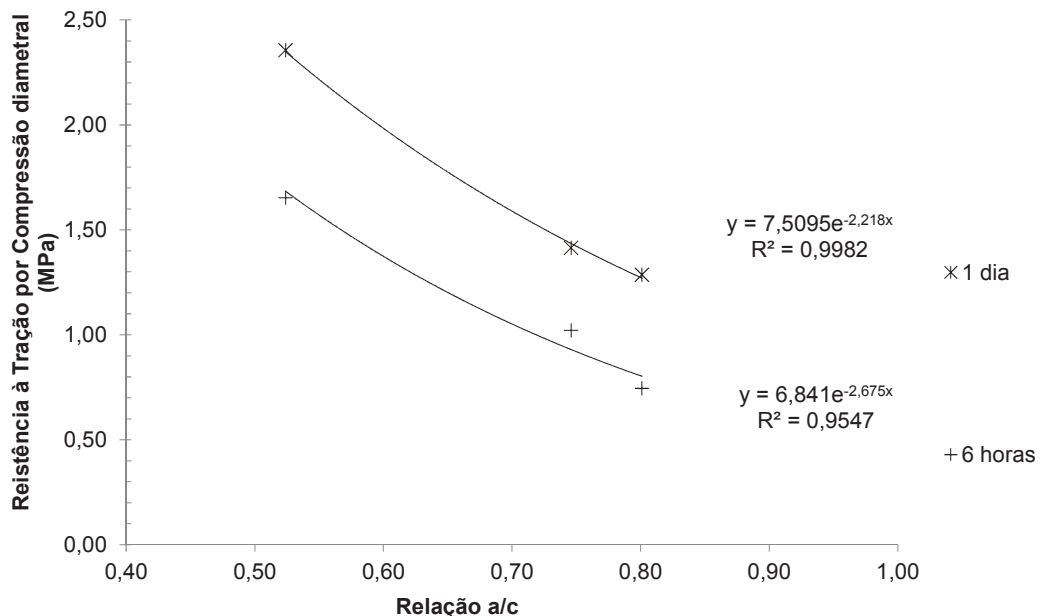


Figura 51: Relação da resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c.

<sup>1</sup> Coeficiente de determinação indica uma medida de ajustamento dos valores observados a um modelo de regressão estatístico, variando entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 mais o modelo de regressão consegue representar os dados.

Tendo em vista a resistência à tração do concreto como principal requisito para a dosagem dos postes de concreto armado, relativo ao ponto mais crítico do processo produtivo, a Figura 52 apresenta o diagrama de dosagem em função da resistência à compressão diametral. O diagrama foi elaborado de acordo com o método do IPT/EPUSP.

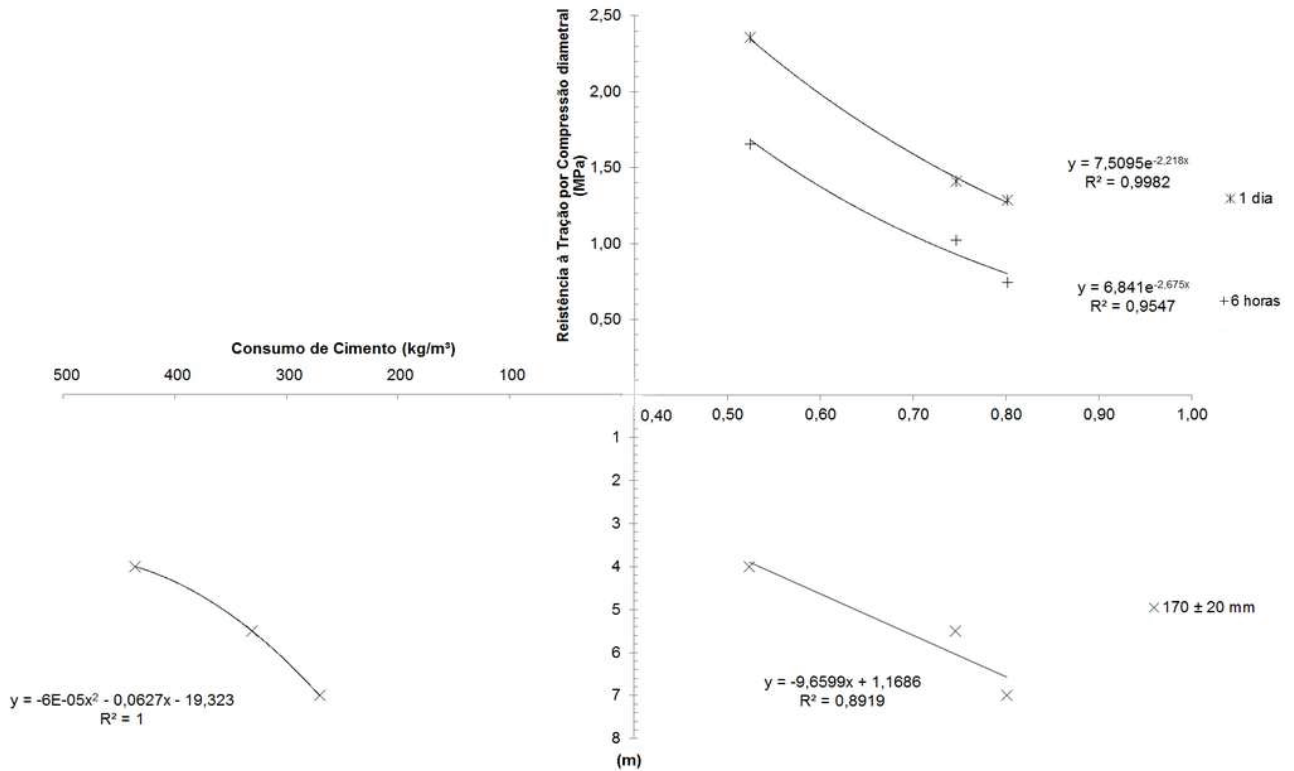


Figura 52: Diagrama de dosagem em função da tração por compressão diametral.

### 5.3 DIAGRAMA DE DOSAGEM COM ADIÇÃO DE CCA

Para a dosagem com a adição de CCA, adotou-se os mesmos parâmetros utilizados para a dosagem sem a adição de CCA, apresentados no item 5.2. Entretanto, foi realizada a substituição do cimento por 10% em massa de CCA (representando aproximadamente 15% em volume), mantendo os demais componentes idênticos. A composição unitária e as propriedades dos traços utilizados para a composição do diagrama de dosagem com a adição de CCA estão apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27: Composição dos traços utilizados na confecção do diagrama e dosagem com adição de CCA.

Material	Traço unitário		
	Rico	Médio	Pobre
Cimento	0,9	0,9	0,9
Cinza de Casca de Arroz	0,1	0,1	0,1
Areia Natural	0,9	1,32	1,74
Areia Artificial	0,9	1,32	1,74
Brita 0	0,77	1,00	1,23
Brita 1	1,43	1,86	2,29
Propriedade	Valor		
a/c	0,51	0,71	0,83
M (Materiais secos)	4	5,5	7
a	1,8	2,64	3,48
p	2,2	2,86	3,52
Teor de argamassa ( $\alpha$ )	56%	56%	56%
Abatimento (mm)	170 $\pm$ 20	170 $\pm$ 20	170 $\pm$ 20

A dosagem com adição de CCA, foi realizada avaliando-se tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração por compressão diametral do concreto para as idades de 6 horas, representando o instante do içamento do poste da forma, a 1 dia representando o movimentação do poste para estocagem. Foi adotado o procedimento de cura a vapor por um período de 6 horas, conforme descrito no item 4.2.

Os resultados da resistência à compressão em função da relação a/c estão demonstrados na Figura 53, para as idades de 6 horas, 1 dia e 28 dias. Juntamente é apresentada a equação de Abrams para cada uma das idades e seus respectivos  $R^2$ .

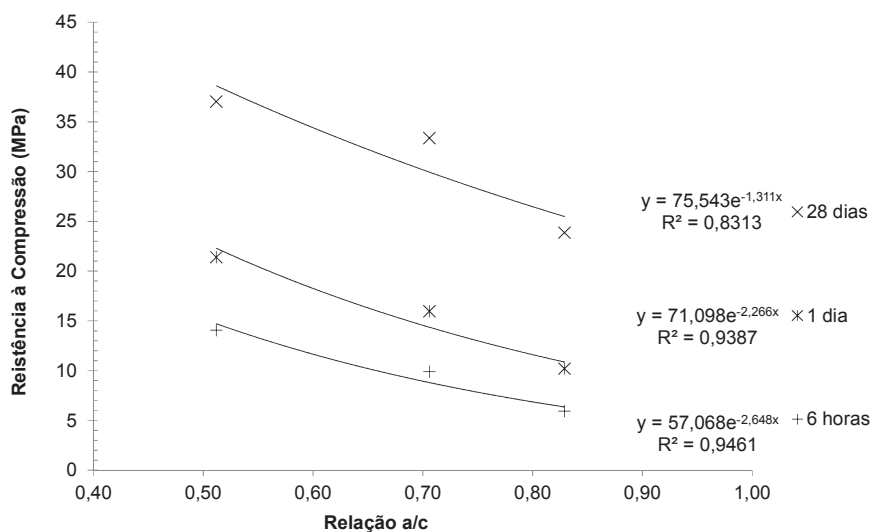


Figura 53: Resistência à compressão em função da relação a/c com adição de CCA.



Os resultados da resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c estão demonstrados na Figura 54, para as idades de 6 horas, 1 dia, não avaliando a idade de 28 dias por não haverem corpos de prova suficientes. Juntamente é apresentada a equação de Abrams para cada uma das idades e seus respectivos  $R^2$ .

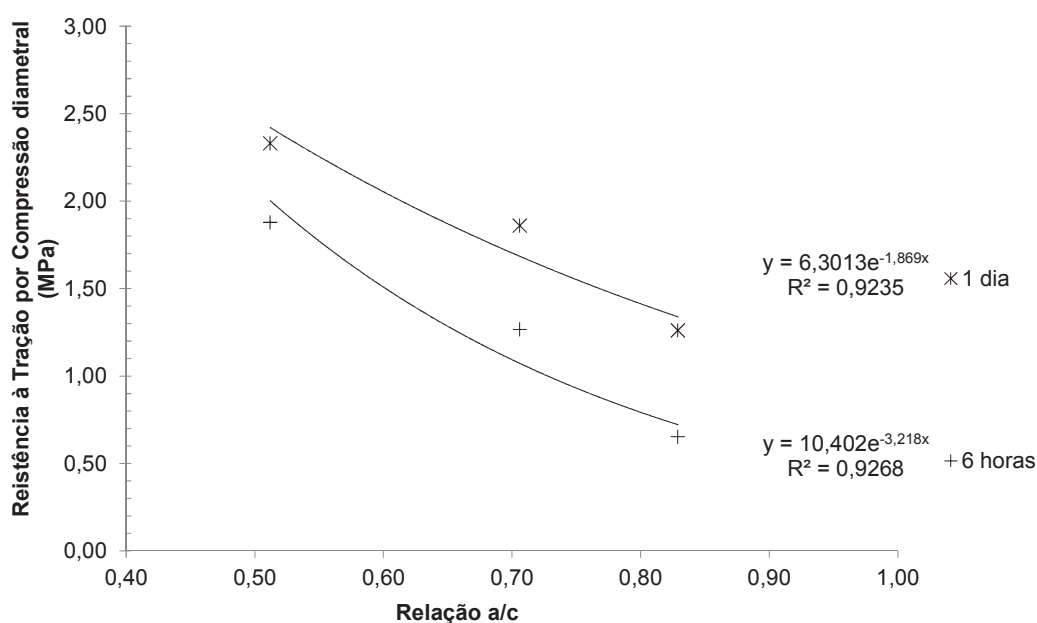


Figura 54: Relação da resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c com adição de CCA.

Tendo em vista a resistência à tração do concreto como principal requisito para a dosagem dos postes de concreto armado, relativo ao ponto mais crítico do processo produtivo, a Figura 55 apresenta o diagrama de dosagem em função da resistência à compressão diametral com adição de CCA. O diagrama foi elaborado de acordo com o método do IPT/EPUSP.

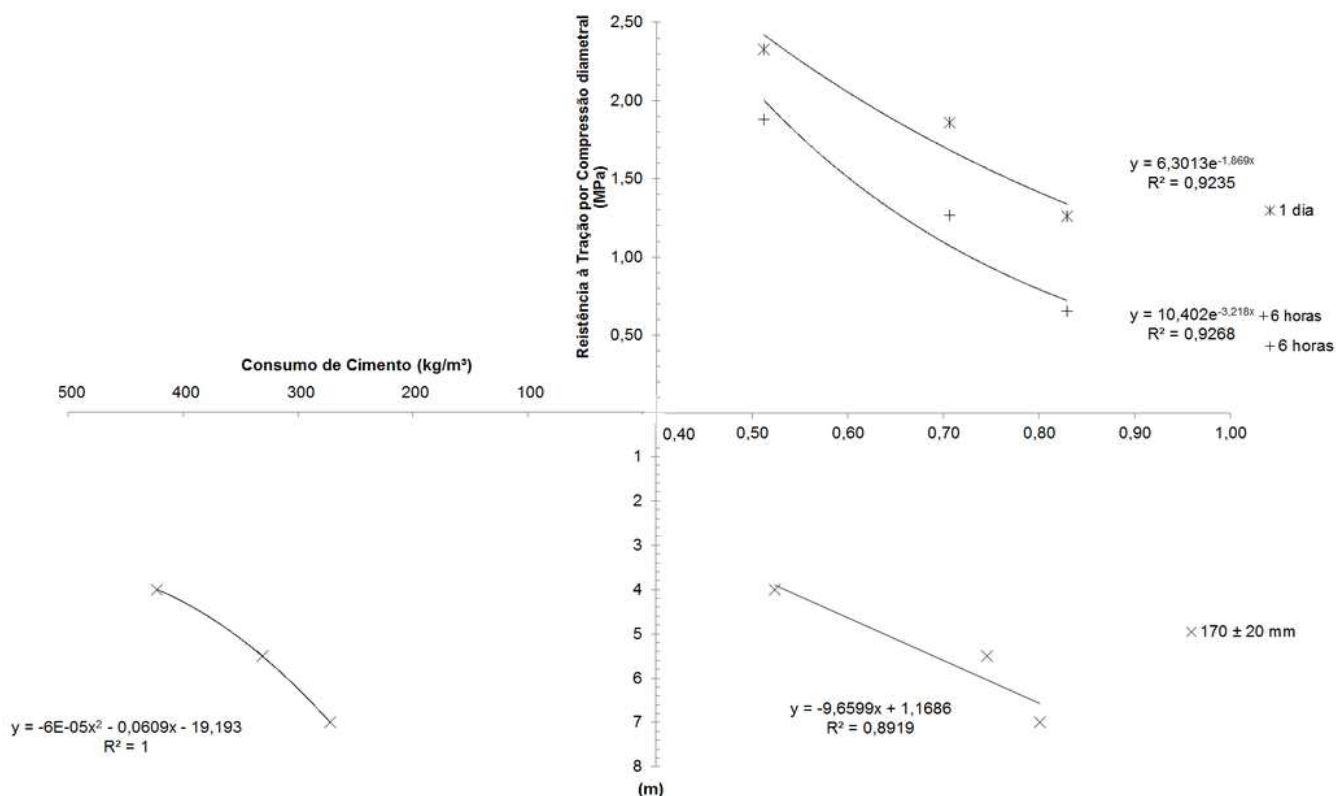


Figura 55: Diagrama de dosagem em função da tração por compressão diametral com adição de CCA.

## 5.4 AVALIAÇÃO DOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

De forma a avaliar e pré-definir os aditivos superplastificantes seriam utilizados para a produção dos postes em escala real, utilizou-se o traço médio (1:5,5), o qual foi empregado para confecção do diagrama de dosagem, apresentado na Tabela 28. Realizou-se cura térmica com vapor a 60°C, conforme descrito no item 4.2.

Tabela 28: Composição dos traços utilizados na avaliação dos aditivos superplastificantes.

Material	Consumo (kg/m³)	Traço unitário
Cimento CP-V	330	1,00
Areia Natural	435	1,32
Areia Artificial	435	1,32
Brita 0	330	1,00
Brita 1	613	1,86
Água	*	*
Propriedades		Valor
Abatimento de tronco de cone (mm)		170 ± 20 mm
Relação a/c		0,45
Teor de argamassa		56 %

Com o objetivo de avaliar a eficiência dos aditivos superplastificantes, analisou-se simultaneamente os três aditivos, previamente escolhidos, mantendo a relação a/c fixa em 0,45 e o abatimento de tronco de cone em  $170 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ , verificando deste modo o teor de aditivo necessário para atingir o abatimento predeterminado. Nesta etapa, como variável de resposta, adotou-se a resistência à compressão e à tração por compressão diametral, nas idades de 6 horas, 1 dia e 28 dias. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 29, juntamente com os teores utilizados para cada um dos aditivos.

Tabela 29: Resistência à compressão para os três aditivos analisados, com seus respectivos teores.

Idade	Resistência à compressão (MPa)					
	TecFlow 50 N (0,58%)		TecFlow 8000 (0,42%)		TecFlow 9040 (0,50%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
6 horas	14,93	0,85	14,6	0,60	22,9	0,59
1 dia	24,5	1,21	25,0	1,35	32,3	0,61
28 dias	42,3	1,10	42,9	1,15	55,0	0,71

A Tabela 30 apresenta a análise de variância realizada com os valores obtidos da resistência à compressão, verificando-se que o aditivo influencia significativamente na resistência à compressão do concreto, juntamente com a idade do concreto, da mesma forma a interação entre os dois fatores exerce influência.

Tabela 30: Análise de variância da resistência à compressão para os aditivos analisados, em diferentes idades.

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Aditivo	526,73	2	290,95	290,95	0,00	S
Idade	3990,68	2	2204,34	2204,34	0,00	S
Idade*Aditivo	29,34	4	8,10	8,10	0,06	S
Erro	16,29	18	0,00			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

A evolução da resistência pode ser observada na Figura 56, para os três aditivos estudados, na qual constata-se que o aditivo TecFlow 9040 apresentou desempenho superior aos demais aditivos, atingindo a resistência à compressão de 55 MPa aos 28 dias.

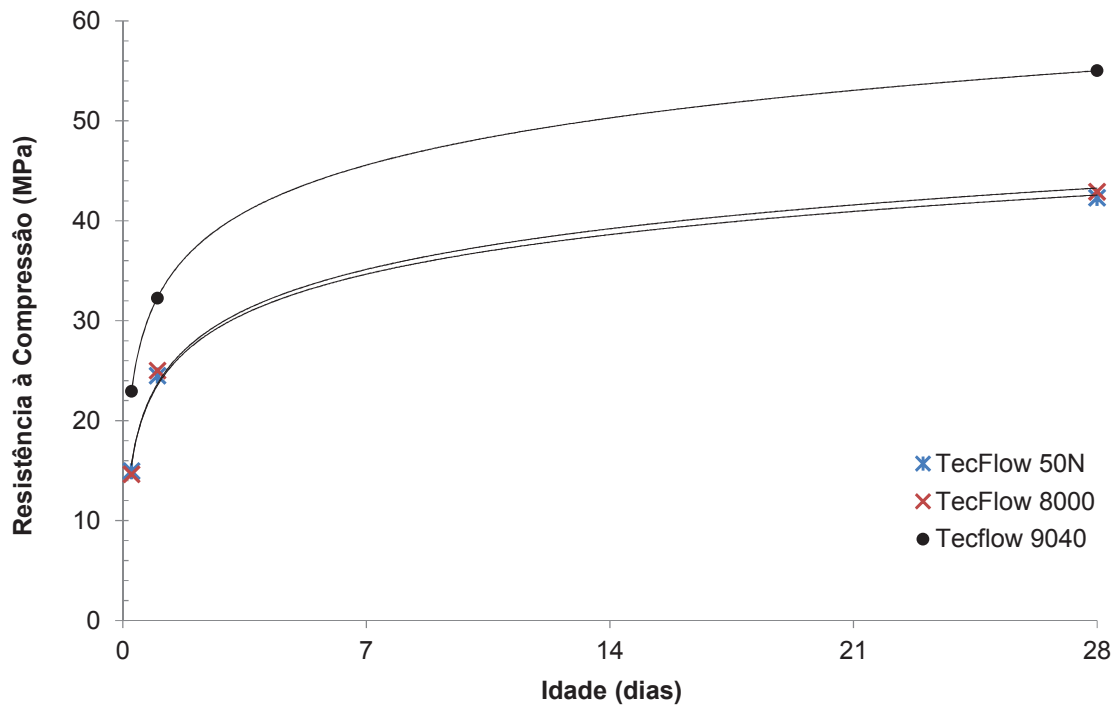


Figura 56: Resistência à compressão para os três aditivos analisados.

Todavia os aditivos TecFlow 8000 e 50N apresentaram desempenho similar para ambas as idades, não apresentando diferenças significativas entre eles. Isto pode ser observado na Figura 57, onde relaciona-se a resistência à compressão média aos 28 dias para cada um dos aditivos.

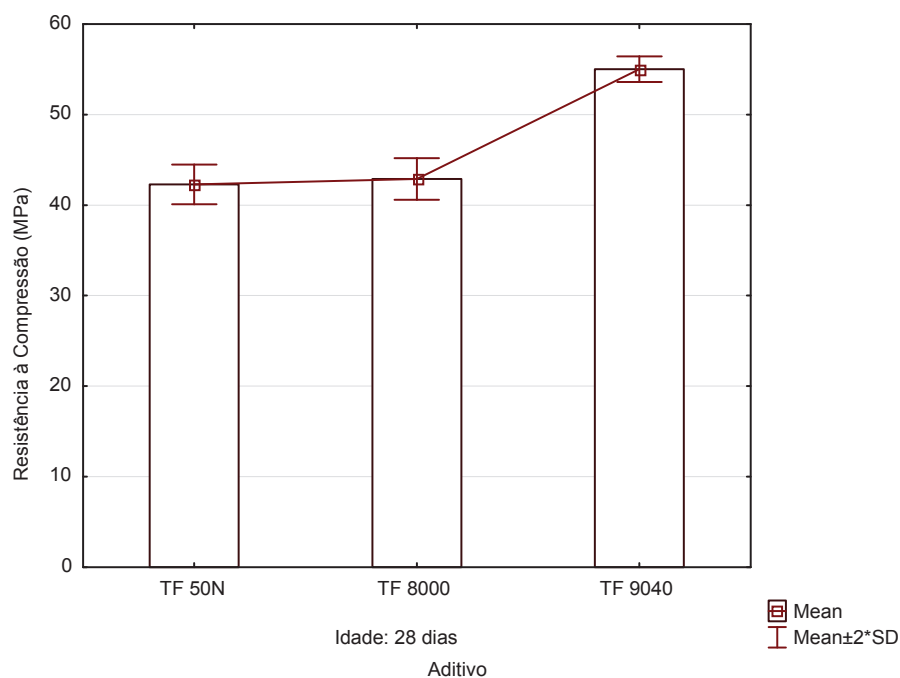


Figura 57: Resistência à compressão aos 28 dias para os aditivos analisados.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, os resultados estão apresentados na Tabela 31, para idades de 6 horas, 1 dia e 28 dias.

Tabela 31: Resistência à tração por compressão diametral para os três aditivos analisados, com seus respectivos teores.

Idade	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)					
	TecFlow 50 N (0,58%)		TecFlow 8000 (0,42%)		TecFlow 9040 (0,50%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
6 horas	2,0	0,15	2,2	0,12	2,4	0,17
1 dia	2,3	0,15	2,4	0,20	2,8	0,10
28 dias	3,8	0,26	4,2	0,21	4,8	0,20

Na Tabela 32 apresenta a análise de variância realizada com os valores obtidos da resistência à tração por compressão diametral, verificando-se que o aditivo influencia significativamente na resistência à compressão do concreto, juntamente com a idade do concreto, entretanto a relação entre o aditivo e a idade do concreto não influenciam significativamente na resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 32: Análise de variância da resistência à compressão por compressão diametral para os aditivos analisados, em diferentes idades.

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Aditivo	1,8467	2	0,923	28,330	0,00	S
Idade	22,8022	2	11,401	349,807	0,00	S
Idade*Aditivo	0,3311	4	0,083	2,540	7,57	NS
Erro	0,5867	18	0,033			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

Na Figura 58 observa-se a evolução da resistência à tração por compressão diametral para os aditivos analisados. Do mesmo modo, evidencia-se que o aditivo TecFlow 9040 também apresentou melhor desempenho na resistência à tração por compressão diametral (4,8 MPa aos 28 dias). Os aditivos TecFlow 8000 e 50N apresentaram desempenho inferior, entretanto ambos atingiram o requisito de 2,0 MPa à tração com 6 horas.

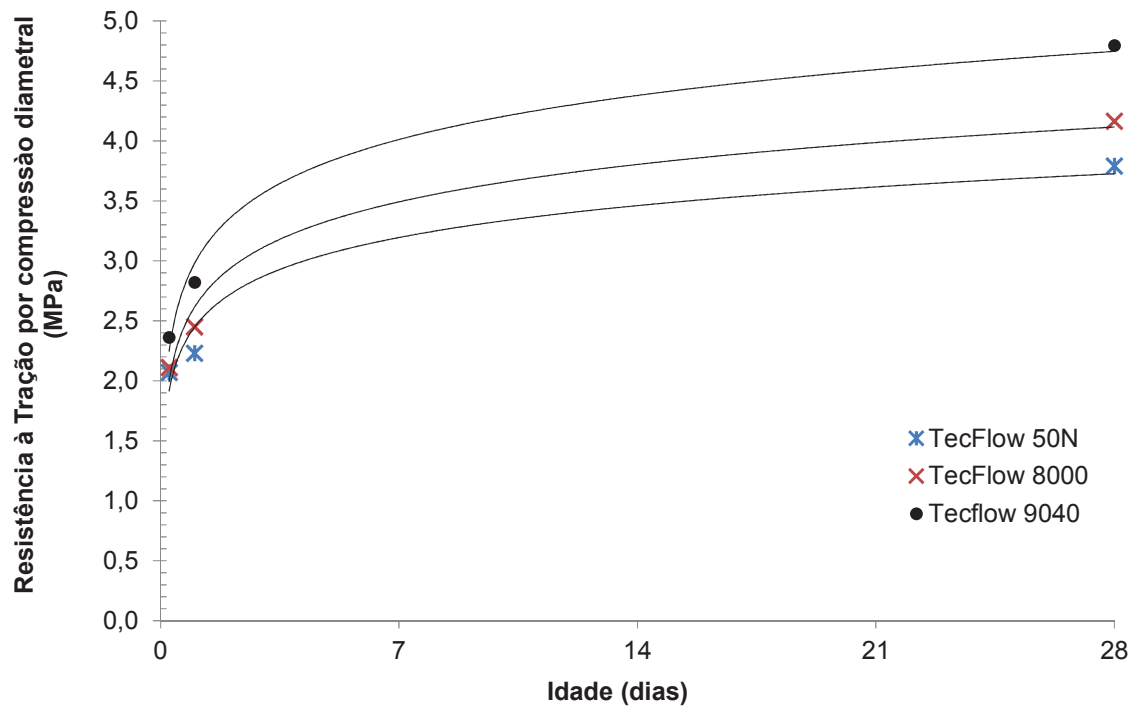


Figura 58: Resistência à tração por compressão diametral para os três aditivos analisados.

Tendo em vista o principal requisito de dosagem do concreto, a resistência à tração por compressão diametral, a Figura 59 apresenta este parâmetro para a idade de 6 horas em relação aos três aditivos analisados.

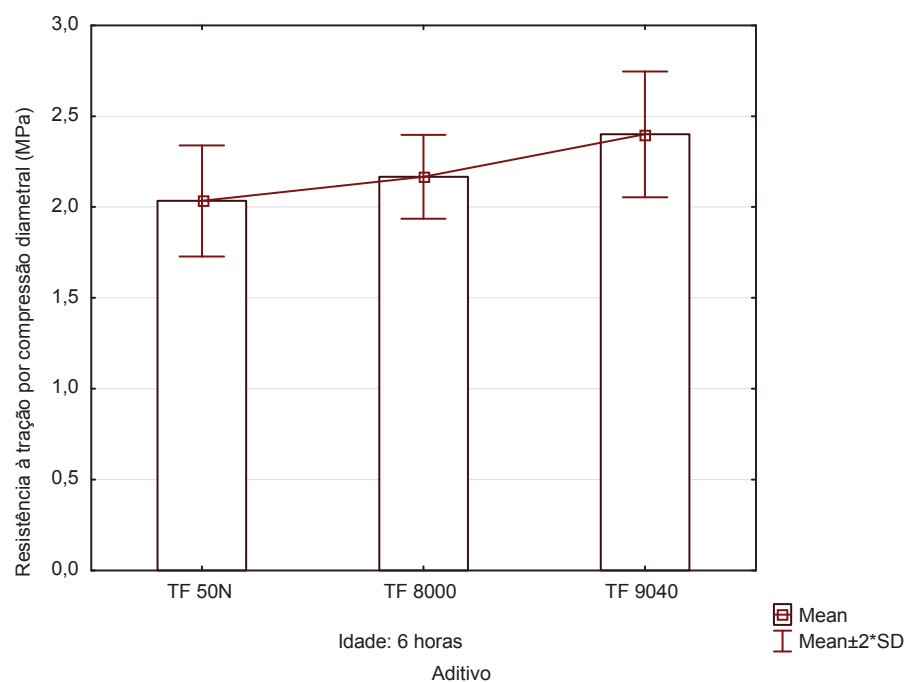


Figura 59: Resistência à tração por compressão diametral para os três aditivos analisados a 6 horas.

Na Figura 59 consta-se que independente do aditivo utilizado, ambos atingem o requisito de 2,0 MPa de resistência à tração, aonde não há diferenças estatisticamente significativas entre os aditivos para a idade de 6 horas.

Quanto a definição do aditivo para ser empregado em escala real, decidiu-se pela utilização de dois aditivos, o TecFlow 9040 e o TecFlow 50N. Inicialmente definiu-se o TecFlow 9040 por apresentar melhor desempenho mecânico perante os demais. Optou-se também pelo aditivo 50N, por este apresentar custo 20% inferior aos demais aditivos, sendo que o aditivo 50N não apresentou diferenças significativas quando comparado com o aditivo TecFlow 8000. Desta forma, optou-se pela análise em escala real dos dois aditivos, o TecFlow 9040 e o TecFlow 50N.

## 5.5 ADIÇÃO DE FIBRAS

Tendo em vista as possíveis dificuldades a serem enfrentadas na produção de postes de concreto armado com a adição de fibras na mistura, optou-se pela realização de um estudo preliminar com fibras em escala real, diretamente na produção dos postes de concreto armado. Realizou-se o estudo da adição de fibras em postes tronco cônicos, tendo em vista que estes apresentam maior dificuldade durante o processo de moldagem, quando comparados aos postes duplo T.

Deste modo, definiu-se para a produção dos postes a utilização de fibra estrutural sintética de polipropileno. Optou-se pela utilização deste tipo de fibra por não atuar como fonte de migração de corrosão, não corroendo em contato com as superfícies expostas ou agentes agressivos, como poderia ocorrer no caso de fibras metálicas não galvanizadas. Utilizou-se inicialmente a dosagem de 1% do volume de concreto. Os traços analisados na produção dos postes estão apresentados na Tabela 33.

Inicialmente testou-se o traço sem adição de fibras, cujas composições unitárias estão apresentadas na Tabela 33. Utilizou-se 65% da composição do agregado graúdo Brita 1 e 35% de Brita 0, obtendo um abatimento de tronco de cone de 210 mm e relação a/c de 0,49.

Tabela 33: Composição unitária e características dos traços utilizados no estudo das fibras.

Material	Traço unitário			
	Sem adição de fibra	Fibra 1%	Fibra 1% B0	Fibra 0,5% B0
Cimento	1	1	1	1
Areia Natural	1,32	1,32	1,32	1,32
Areia Artificial	1,32	1,32	1,32	1,32
Brita 0	1,00	1,00	2,86	2,86
Brita 1	1,86	1,86	0	0
Propriedade	Valor			
a/c	0,49	0,52	0,52	0,54
M (Materiais secos)	5,5	5,5	5,5	5,5
a	2,64	2,64	2,64	2,64
p	2,86	2,86	2,86	2,86
Teor de argamassa ( $\alpha$ )	56%	56%	56%	56%
Abatimento (mm)	210	150	150	190
Teor de Fibra (%)	0%	1,0%	1,0%	0,5%
Porcentagem de Brita 0 (%)	35%	35%	100%	100%
Superplastificante (%)	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%

Em seguida testou-se o traço aprimorado com adição de 1% de fibra de polipropileno em volume (Tabela 33). Entretanto, pela incorporação da fibra houve uma redução da trabalhabilidade do concreto, obtendo-se abatimento de 150 mm. A fim de compensar a perda da trabalhabilidade elevou-se o consumo de água e fixou-se dosagem do aditivo superplastificante (1%) com o propósito de evitar a segregação do concreto, elevando a relação a/c para 0,52. Verificou-se uma dificuldade no adensamento do concreto, devido principalmente à pequena espessura da alma do poste (5 cm), formando ninhos de concretagem devido a aglomeração das fibras, que pode ser observado na Figura 60.



(a)

(b)

Figura 60: Traço com 1% de fibra com brita 1.



Na Figura 60 (b) também é possível observar que, devido à presença da Brita 1, as fibras acabavam separando-se do restante do concreto, havendo uma segregação da mistura, conforme pode ser observada na Figura 61. Deste modo, modificou-se a composição do traço passando-se somente a utilizar Brita 0, por apresentar dimensão máxima característica menor que a Brita 1. A composição deste traço está apresentada na Tabela 33.



Figura 61: Traço com 1% de fibra e somente com brita 0.

Entretanto, percebeu-se ainda uma dificuldade na moldagem do poste. Apesar de ter ocorrido a redução dos ninhos de concretagem e reduzido a segregação do concreto, o poste ainda apresentou falhas de concretagem.

Deste modo, optou-se pela redução do volume de fibras da mistura de 1,0% para 0,5% utilizando somente Brita 0, obtendo um abatimento de 190 mm com uma relação a/c de 0,54. Com a redução do volume de fibras, não ocorreram ninhos de concretagem e segregação do concreto, evidenciando uma melhora significativa na moldagem dos postes.

Através dos estudos preliminares, com a adição de fibras diretamente no elemento em escala real, verificou-se as dificuldades da utilização das mesmas em postes de concreto. Por fim, definiu-se para a moldagem dos postes, como análise final, a utilização de 0,5% em volume de fibras e a composição do agregado graúdo somente com Brita 0. Optou-se por utilizar as fibras em postes de concreto armado tendo em vista possíveis ganhos na resistência mecânica do elemento.

## 5.6 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS PARA PRODUÇÃO EM ESCALA REAL

A partir dos resultados dos estudos de dosagem, abrangendo a composição dos agregados graúdos e miúdos, análise dos diagramas de dosagem, estudos com os aditivos superplastificantes e o estudo preliminar para avaliação do comportamento das fibras no processo dos postes de concreto armado, foram definidos os traços apresentados na Tabela 34 para a produção dos postes de concreto armado.

Na Tabela 34 está apresentado o consumo de cada material na composição dos traços. Também é demonstrada a relação a/c para cada um dos traços e o abatimento obtido durante a produção. Salienta-se que a relação a/c para os traços com adição de CCA representa a relação entre o aglomerante total (cimento + CCA) e água utilizada no traço.

Tabela 34: Descrição dos traços utilizados na produção dos postes de concreto armado.

Material	Aprimorado	Aprimorado + CCA	Fibra m=5,5 + 50 N	Fibra m=5,5 + 9040	Fibra m=6,5 + 50 N	Traço Padrão
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	351	314	340	342	294	429
CCA (kg/m <sup>3</sup> )	0	31	0	0	0	0
Areia Natural (kg/m <sup>3</sup> )	454	446	466	473	488	897
Areia Artificial (kg/m <sup>3</sup> )	440	435	466	467	488	0
Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	375	369	972	980	966	695
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	697	686	0	0	0	220
Água (kg/m <sup>3</sup> )	171	168	170	177	175	253
Fibra (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	5	5	5	0
TecFlow 9040 (kg/m <sup>3</sup> )	2,8	2,8	0,0	2,8	0,0	0,0
TecFlow 50N (kg/m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	2,7	0,0	2,8	0,0
A/C	0,49	0,49	0,50	0,52	0,59	0,59
Abatimento (mm)	200 mm	210 mm	200 mm	190 mm	190 mm	160 mm

Conforme apresentado na Tabela 34, analisou-se 6 traços diferentes na moldagem dos postes, sendo moldados 12 postes no total. O traço “Aprimorado”, representa o aperfeiçoamento do traço atualmente utilizado pela empresa na produção dos postes de concreto armado (Traço Padrão), o traço “Aprimorado + CCA” representa o traço aperfeiçoado com a adição de CCA, ambos estes traços foram dosados com aditivo TecFlow 9040.

Os traços estudados com a adição de fibras foram divididos em três traços distintos. Dois traços com o mesmo consumo de cimento (Fibra m=5,5 + 50 N e Fibra m=5,5 + 9040), porém

dosados com aditivos superplastificantes diferentes, TecFlow 50 N e TecFlow 9040. O terceiro traço com adição de fibras (Fibra  $m=6,5 + 50 N$ ) foi avaliado com o aditivo TecFlow 9040, entretanto reduziu-se o consumo de cimento do traço, aumentando a proporção dos agregados, com o objetivo de compensar o custo da fibra reduzindo o consumo de cimento do traço.

Assim, foram adotados 5 traços diferentes para a moldagem dos postes de concreto armado. A Tabela 35 apresenta a identificação de cada um dos 12 postes moldados correlacionando cada um deles com o traço utilizado.

Tabela 35: Identificação de todos os postes moldados com seu respectivo traço utilizado.

Identificação do Poste	Traço utilizado
P1 (Poste 1)	Aprimorado
P2 (Poste 2)	Aprimorado + CCA
P3 (Poste 3)	Aprimorado + CCA
P4 (Poste 4)	Fibra (0,5%) $m=5,5 + 9040$
P5 (Poste 5)	Fibra (0,5%) $m=5,5 + 9040$
P6 (Poste 6)	Fibra (0,5%) $m=5,5 + 50 N$
P7 (Poste 7)	Fibra (0,5%) $m=6,5 + 50 N$
P8 (Poste 8)	Fibra (0,5%) $m=6,5 + 50 N$
P9 (Poste 9)	Fibra (0,5%) $m=6,5 + 50 N$
PC1 (Poste Padrão 1)	Traço Padrão
PC2 (Poste Padrão 2)	Traço Padrão
PC3 (Poste Padrão 3)	Traço Padrão

A resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes traços analisados está apresentada graficamente na Figura 62, foram rompidos 3 corpos de prova para cada traço analisado. O traço “Aprimorado” apresentou maior resistência à compressão, comparada aos demais. O traço “Aprimorado + CCA” apresentou uma queda na resistência com a adição da CCA.

Os traços com adição de fibras demonstraram uma redução da resistência à compressão comparando com os traços aprimorados. Isso deve-se a maior demanda de água na mistura para a manutenção da trabalhabilidade e, por consequência, aumento da relação a/c. No caso do traço com o aditivo TecFlow 9040 a resistência à compressão foi maior que o traço com o aditivo TecFlow 50N.

Conjuntamente observa-se na Figura 62 que houve, como esperado, uma redução da resistência à compressão para o traço com menor consumo de cimento. Outro ponto que pode ser observado é que todos os traços obtiveram melhor desempenho frente ao “Traço Padrão”.

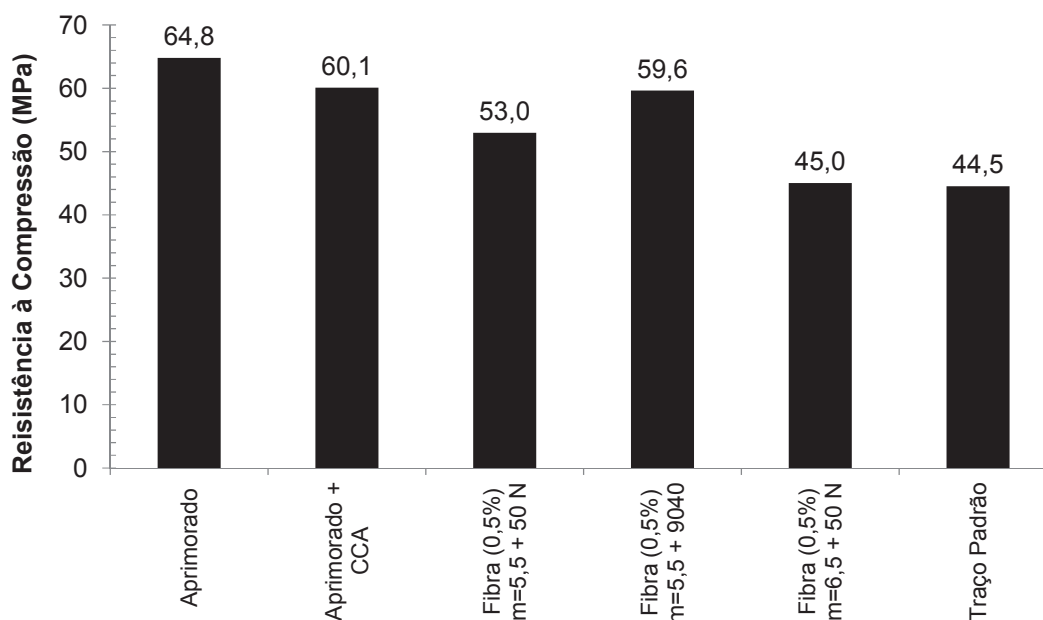


Figura 62: Resistência à compressão dos traços utilizados na produção dos postes de concreto armado.

Durante a produção dos postes de concreto armado, verificou-se o tempo para moldagem dos postes para cada um dos traços dosados, abrangendo o tempo de concretagem e o tempo de vibração do poste para o adensamento do concreto. Os valores dos tempos são apresentados na Tabela 36, juntamente como tempo total para a moldagem dos postes.

Tabela 36: Tempos de concretagem para cada um dos traços utilizados na produção dos postes.

Identificação da Mistura	Tempo de concretagem	Tempo de vibração	Tempo total
Aprimorado	02:15 min	01:38 min	03:53 min
Aprimorado + CCA	02:15 min	01:41 min	03:56 min
Fibra (0,5%) m=5,5 + 50 N	04:11 min	03:00 min	07:11 min
Fibra (0,5%) m=5,5 + 9040	04:46 min	03:35 min	08:21 min
Fibra (0,5%) m=6,5 + 50 N	03:48 min	03:20 min	07:07 min
Traço Padrão	03:23 min	02:27 min	05:49 min

Pela análise do tempo total para a moldagem dos postes, em função de cada um dos traços dosados, observa-se na Tabela 36 que os traços “Aprimorado” e “Aprimorado +CCA”

apresentaram menor tempo de moldagem, em comparação ao “Traço Padrão”. Devido ao uso de fibras no concreto, pode-se observar que houve maior tempo para a moldagem dos postes para os três traços com adição de fibras, sendo o traço com o aditivo TecFlow 9040 com maior tempo de moldagem.

Para avaliação dos traços utilizados nas moldagens dos postes, foi realizado um estudo do custo para a produção dos traços, baseando-se na tabela de preços SINAP da Caixa Econômica Federal, referente ao mês de Março de 2014, no estado do Rio Grande do Sul. Quanto aos valores dos aditivos e a fibra, estes foram cotados com os respectivos fornecedores para o mesmo mês. Os resultados do custo por metro cúbico estão apresentados na Figura 63 para cada um dos traços utilizados, os valores referem-se somente ao custo do material para a produção dos traços, não quantificando a mão de obra necessária para a produção do concreto.

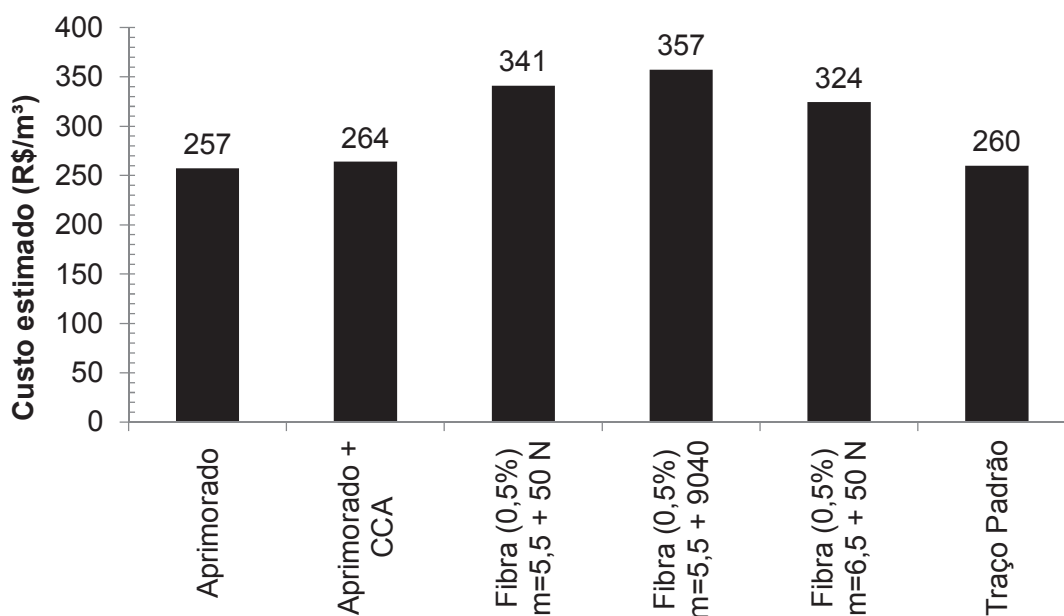


Figura 63: Estimativa de custo do material para a produção dos traços, expressa em unidades monetárias (R\$/m³).

Na Figura 63 pode ser observado que os traços “Aprimorado” e “Aprimorado + CCA” tiveram o custo de produção próximo ao traço atualmente utilizado pela empresa (Traço Padrão) e os traços com adição de fibras um valor acima destes, principalmente pelo elevado preço da fibra. Mesmo o traço com fibras e com menor consumo de cimento manteve-se 64 R\$ acima do custo do traço atualmente produzido.

## 6 ENSAIOS EM ESCALA REAL

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos diferentes tipos de traços nos próprios postes de concreto armado foram moldados 12 elementos na empresa, localizada no município de Teutônia – RS. Após o período de cura de 7 dias, os postes foram transportados até o Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, onde foram ensaiados com idade de 10 dias. Adotou-se a idade de 10 dias, por esta representar o tempo em que o poste é liberado para instalação na rede de distribuição de energia.

Os elementos em escala real foram avaliados quanto à inspeção geral, ensaio de flexão, elasticidade, ruptura e absorção de água. Juntamente, realizou-se a extração de testemunhos dos postes de concreto, com a finalidade de avaliar a resistência à compressão do concreto e a obtenção de parâmetros de durabilidade através da penetração de íons cloreto.

### 6.1 INSPEÇÃO GERAL

Quanto à inspeção geral de postes de concreto armado, aferiu-se os seguintes itens: acabamento, dimensões, furações e traços de referência, retlineidade, desobstrução do furo de aterramento e identificação.

Frente ao acabamento, realizou-se uma inspeção visual contemplando as tolerâncias previstas na NBR 8451-1 (ABNT, 2011), onde se verificou que os postes apresentavam superfícies externas suficientemente lisas, sem ninhos de concretagem e armadura aparente, fendas ou fraturas.

Na inspeção geral também foi realizada a verificação da retlineidade de cada um dos postes analisados, juntamente com a aferição da identificação frente aos requisitos exigidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) e a metodologia apresentada pela NBR 8451-3 (ABNT, 2011). Nestes requisitos, todos os postes apresentaram-se em conformidade com as regulamentações normativas.

## 6.2 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio de flexão nos postes de concreto armado seguiu as orientações da NBR 8451-3 (ABNT, 2011), com o procedimento de ensaio já apresentado no item 3.4.2.

Em relação aos resultados obtidos no ensaio de flexão, a Figura 64 apresenta a flecha nominal para cada um dos postes. A flecha nominal representa a flecha quando aplicada a carga de projeto. A NBR 8451-1 (ABNT, 2011) define o limite da flecha nominal em 3,5% do comprimento nominal do poste, neste caso, admite-se o limite máximo da flecha nominal de 315 mm.

Pela análise dos resultados apresentados na Figura 64, observa-se que todos os postes, quando submetidos à carga nominal, apresentaram flecha abaixo do limite determinado pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), apresentando flechas nominais próximas entre eles, variando de 131 (Poste 6) a 163 mm (Poste Padrão 1).

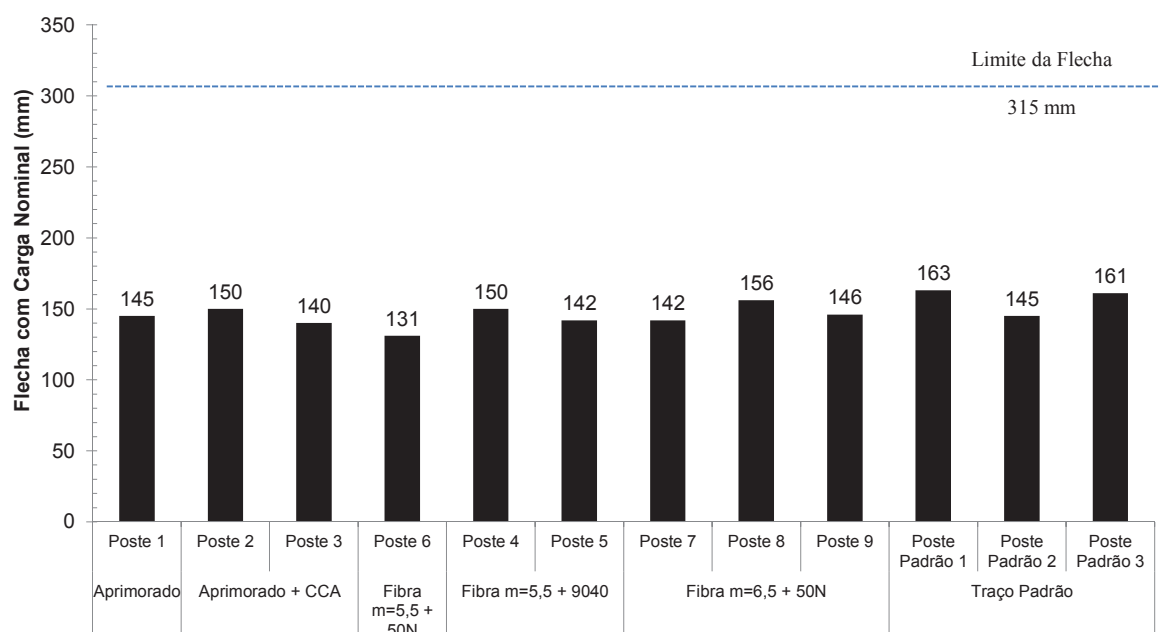


Figura 64: Flecha nominal para cada um dos postes analisados.

Quanto aos valores da flecha residual, determinada após a aplicação da carga no regime elástico ( $1,4 \cdot C_n$ ), estes estão apresentados na Figura 65. Juntamente demonstra-se o limite da flecha residual determinado pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), sendo 0,35% do comprimento nominal do poste, neste caso, admite-se o limite de 31,5 mm para a flecha residual.

Entretanto, como pode ser observado na Figura 65, os postes 2, 5 e o Padrão 1, apresentaram flecha residual maior que o limite determinado pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), sendo reprovados neste requisito de aceitação do poste. Contudo os demais postes apresentaram flecha residual abaixo do limite.

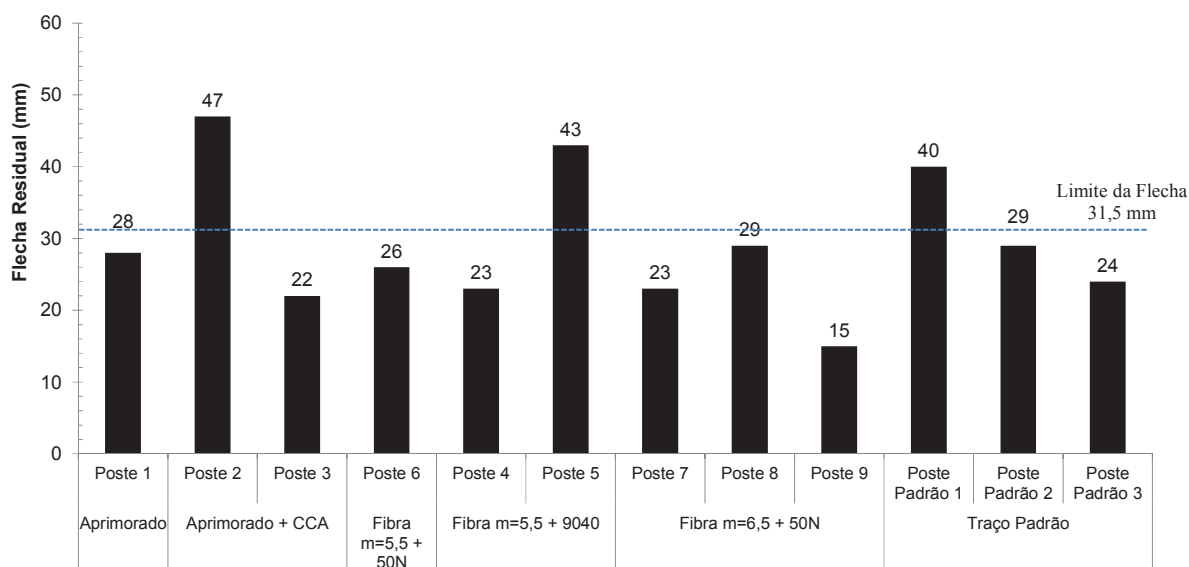


Figura 65: Flecha residual para cada um dos postes analisados.

Outro ponto analisado no ensaio de flexão dos postes de concreto armado foi quanto à abertura de fissuras na parte tracionada do elemento. A Figura 66 apresenta o número de abertura de fissuras para cada um dos postes referente à carga em regime elástico ( $1,4 \cdot C_n$ ).

Analisando-se a quantidade de fissuras (Figura 66), constata-se que o Poste 1 apresentou menor número de fissuras comparando com o restante dos postes analisados. Já os postes com adição de CCA (Postes 2 e 3) apresentaram quantidade de fissuras superior: 26 e 29 fissuras, respectivamente. Quando analisados os postes produzidos com o traço padrão da empresa, verificou-se uma quantidade de abertura de fissuras superior a dos postes, compreendida entre 26 e 36 fissuras.



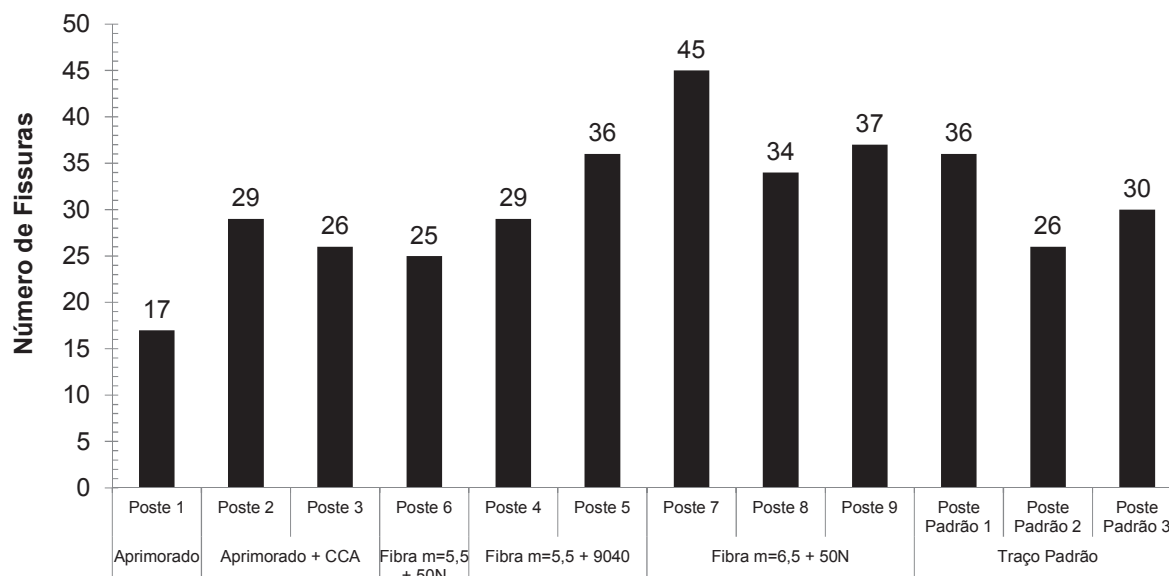


Figura 66: Número de abertura de fissuras para cada um dos postes analisados.

Analisando-se a Figura 66, observa-se o número de abertura de fissuras para cada um dos postes ensaiados, obtendo-se um aumento relativo do número de fissuras nos postes dosados com fibras comparando com os demais postes, com exceção do Poste 5.

Tal fato deve-se à atuação das fibras no ensaio de flexão, servindo como ponte de transferência de tensão aumentando o número de fissuras, porém diminuindo o tamanho da abertura destas fissuras. Este fenômeno pode ser claramente observado na Figura 67, onde está relacionado à porcentagem de cada tamanho de abertura de fissura em função do número total de fissuras. Observa-se uma maior porcentagem de fissuras com abertura  $<0,05$  mm, comparando com os demais postes.

Juntamente, pode ser observado na Figura 67, a maior abertura de fissura verificada em todos os postes de 0,25 mm para o Poste 6. Em comparação com o limite máximo determinado pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), pode-se concluir que todos os postes atendem o requisito quanto a abertura máxima de fissura, sendo menor que 0,30 mm.

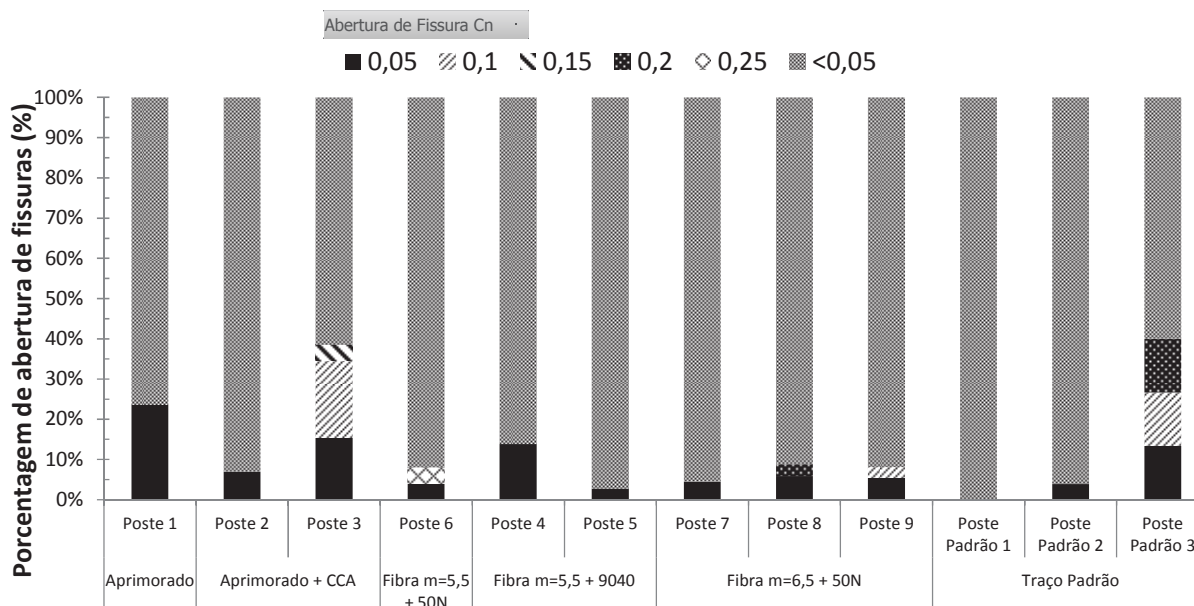


Figura 67: Porcentagem da abertura de fissuras em função do tamanho da abertura.

Conforme os procedimentos descritos pela NBR 8451-3 (ABNT, 2011), após a determinação das flechas e aberturas de fissuras, submetem-se os postes até a ruptura, obtendo a carga de ruptura para cada um dos postes moldados. A Figura 68 apresenta os resultados dessa ruptura.

A NBR 8451-1 (ABNT, 2011) exige que a carga de ruptura dos postes de concreto armado seja superior a duas vezes a carga nominal ( $2 \cdot C_n$ ). Neste estudo, a carga de ruptura deve ser superior a 600 daN, para atender os requisitos da referida norma. Na Figura 68 pode ser observado que todos os postes atingiram valores da carga de ruptura acima do exigido pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011).

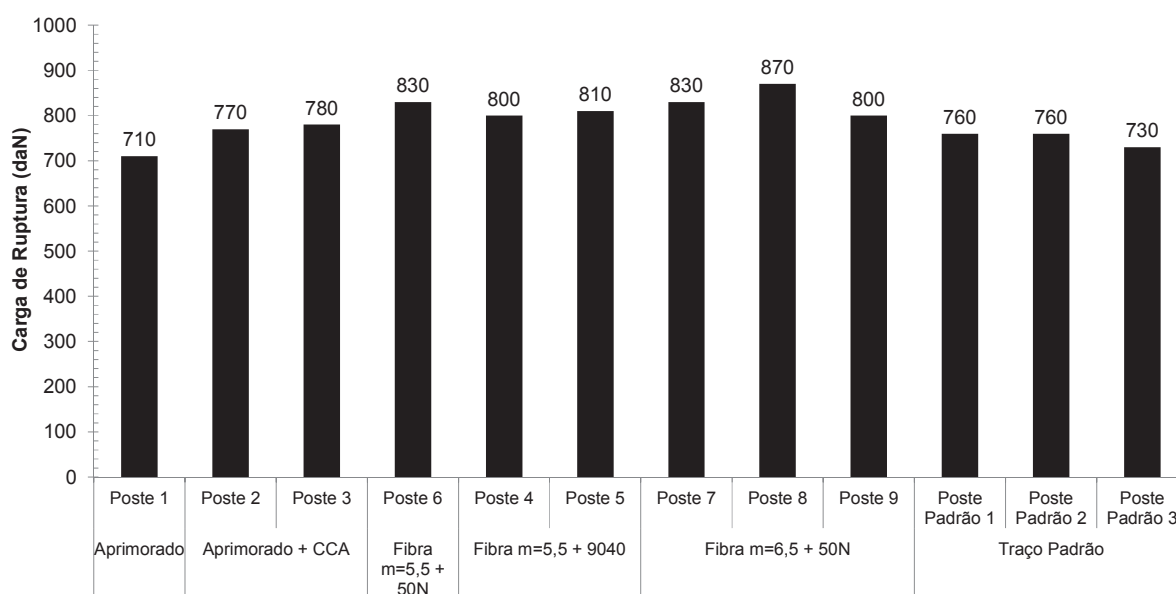


Figura 68: Carga de ruptura para cada um dos postes moldados.

Quanto aos resultados obtidos, os postes aprimorados com adição de CCA (Postes 2 e 3) apresentaram desempenho superior aos postes produzidos atualmente pela empresa (Postes Padrões 1, 2, e 3) e também que o poste aprimorado sem adição de CCA (Poste 1), que por sua vez apresentou desempenho inferior ao dos postes produzidos pela empresa.

Todavia, os postes com adição de fibras apresentaram os melhores desempenhos (Postes 4 a 9) com carga de ruptura acima de 800 daN. Outro fato que pode ser observado na Figura 68 é que os postes com consumo de cimento reduzido (Postes 7, 8 e 9) apresentaram carga de ruptura próxima dos postes com maior consumo de cimento (Postes 4, 5 e 6), sendo que a maior carga de ruptura foi obtida para o Poste 8. Assim, observa-se que a redução no consumo de cimento, conseqüentemente na resistência à compressão do concreto, parece não impactar na carga máxima de ruptura dos postes de concreto armado quando submetidos ao ensaio de flexão, sendo que a armadura de flexão e de cisalhamento são responsáveis pela maior parcela desta resistência.

### 6.3 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS

Os resultados da resistência à compressão dos corpos de provas extraídos dos postes de concreto armado estão apresentados na Tabela 37, juntamente com aplicação do coeficiente devido ao efeito de broqueamento, conforme Viera Filho (2007) e a correção em função da relação h/d conforme a NBR 7680 (ABNT, 2007). Em conjunto, na Tabela 37, são apresentados os valores obtidos do rompimento dos corpos de prova moldados.

Tendo em vista a determinação da resistência à compressão dos corpos de prova moldados, analisaram-se 3 corpos de prova aos 28 dias, para os corpos de prova extraídos, analisaram-se 6 corpos de prova aos 47 dias.

Tabela 37: Resistência à compressão dos corpos de prova extraídos.

Identificação	Corpos de Prova Moldados aos 28 dias (MPa)		Corpos de Prova Extraídos aos 47 dias (MPa)		
	Resistência à Compressão	Desvio Padrão	Resistência à Compressão	Resistência à Compressão + Broqueamento	Desvio Padrão
Poste 1	64,8	0,39	51,1	56,2	3,61
Poste 2	56,9	1,06	48,9	53,8	5,62
Poste 3	63,3	0,54	52,1	57,3	1,49
Poste 4	61,4	1,01	47,4	52,1	8,24
Poste 5	57,8	0,22	45,9	50,5	2,06
Poste 6	53,0	0,93	46,8	51,4	4,04
Poste 7	46,8	0,16	43,8	48,2	2,67
Poste 8	44,2	1,96	40,1	44,2	2,36
Poste 9	44,2	1,51	40,8	44,9	3,42
Poste Padrão 1	44,8	1,04	39,6	43,6	7,19
Poste Padrão 2	44,8	1,04	40,0	44,0	4,09
Poste Padrão 3	44,8	0,85	43,5	47,9	3,10

Frente aos resultados apresentados na Tabela 37, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) em relação à resistência à compressão, para os corpos de prova moldados e extraídos, o resultado obtido está apresentado na Tabela 38.

Tabela 38: Análise de variância da resistência à compressão para os corpos de prova moldados e extraídos.

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Corpo de Prova	131,9	1	131,9	7,740	0,00	S
Poste	2552,6	11	232,0	11,853	1,15	S
Corpo de Prova*Poste	294,5	11	26,8	1,368	20,78	NS
Erro	1419,5	70	20,0			

\* Para um nível de confiança de 95%  
S – significativo NS – não significativo

Observa-se, na Tabela 38, que o tipo do corpo de prova, extraído ou moldado, exerce influência significativa na resistência à compressão do concreto. Tal fato evidencia-se na Figura 69, onde está relacionado à resistência à compressão, em função do tipo do corpo de prova.

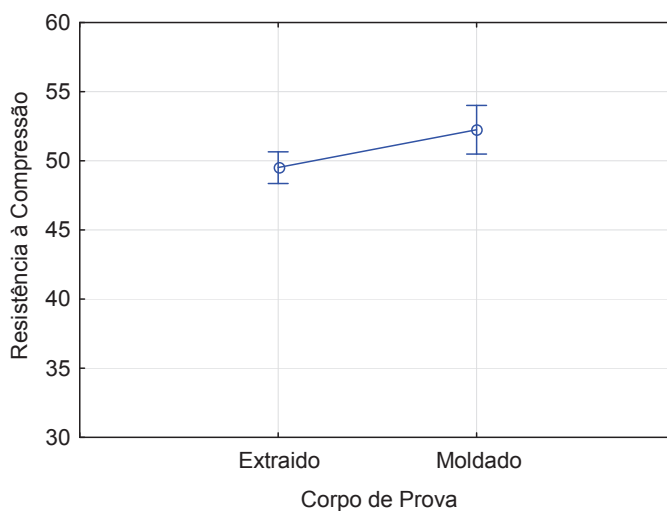


Figura 69: Resistência à compressão média para corpos de prova extraídos e moldados.

Pela análise de variância (Tabela 38) constatou-se que a interação entre o tipo do corpo de prova e o poste, para a avaliação da resistência à compressão não exerce influência significativa, conforme observa-se na Figura 70, com um intervalo de confiança de 95%.

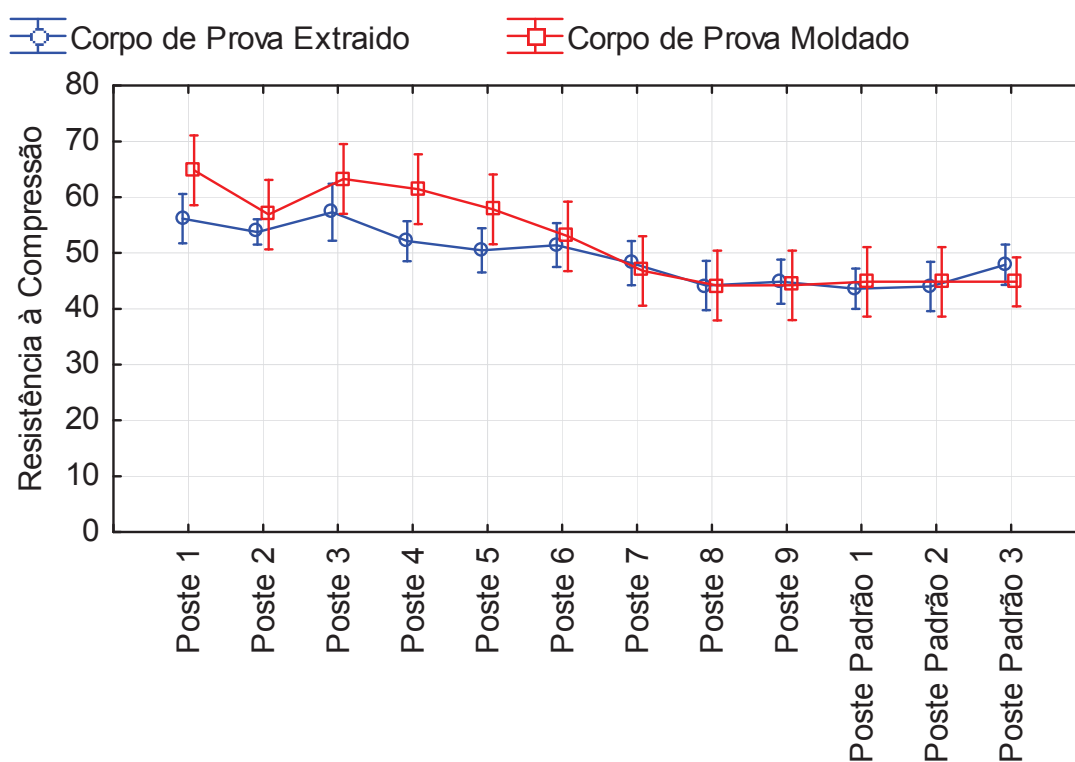


Figura 70: Resistência à compressão para os corpos de prova extraídos e moldados.

A Figura 70 relaciona a média da resistência à compressão dos corpos de prova moldados e extraídos para cada um dos postes analisados, aonde verifica-se que não há diferenças

significativas entre o uso de corpos de prova extraídos ou moldados para a avaliação da resistência a compressão dos postes de concreto armado.

Comparando os resultados apresentados na Figura 70, observa-se que para os postes com maior resistência a compressão acima de 50 MPa (Postes 1 a 5), a diferença entre os corpos de prova moldados e os corpos de provas extraídos é mais acentuada. Entretanto, para os postes com resistência abaixo de 50 MPa, constata-se que a diferença entre os corpos de prova extraídos e moldados é menor, apresentando um resultado mais próximo.

#### 6.4 AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO A/C FRENTE AOS REQUISITOS DE DURABILIDADE

Quanto à qualidade do concreto utilizado na fabricação de postes de concreto, a NBR 8451-1 (ABTN, 2011) estabelece que o mesmo deve atender o prescrito na NBR 12655 (ABNT, 2006), que estabelece a correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto, já apresentada no item 2.3.

Analisando os resultados obtidos com os traços executados nos postes Duplo T (Figura 71), frente à relação a/c exigida para as classes de agressividade II e III, pode-se constatar que os traços atualmente executados pela empresa (PC3, PC2 e PC1) não satisfazem a relação a/c mínima para a classe de agressividade ambiental III, estando também muito próximo do limite estabelecido para a classe de agressividade II. O mesmo fato constata-se para os postes moldados com fibras com menor consumo de cimento (P7, P8 e P9).

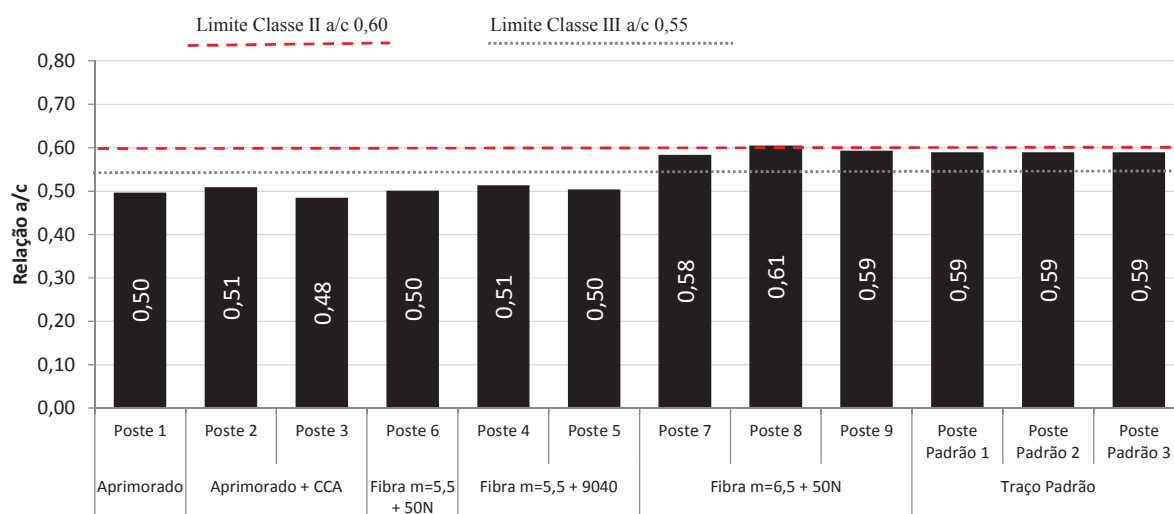


Figura 71: Relação água/aglomerante para cada poste moldado.

Todavia, os demais postes atendem os requisitos exigidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) e da NBR 12655 (ABNT, 2006) quanto à relação a/c mínima para ambas as classes de agressividade ambiental II e III. Deste modo, indica-se, frente à relação a/c, para a produção de postes de concreto armado a utilização dos traços Aprimorado, Aprimorado com adição de CCA e com adição de Fibras m=5,5.

## 6.5 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

Tendo-se como foco a proteção das armaduras, a NBR 8451-1 (ABTN, 2011) limita o índice de absorção de água do concreto de acordo com as classes de agressividade ambiental, conforme apresentado no item 2.3.

Analisando os resultados obtidos com os traços executados nos postes Duplo T (Figura 72), frente à absorção máxima de água exigida para as classes de agressividade II e III, pode-se constatar que os traços atualmente executados pela empresa (Poste Padrão 1 e Poste Padrão 2) apresentam a maior absorção que a máxima permitida para as classes de agressividade ambiental III e II, já o Poste Padrão 1 atende somente o requisito para a classe de agressividade III.

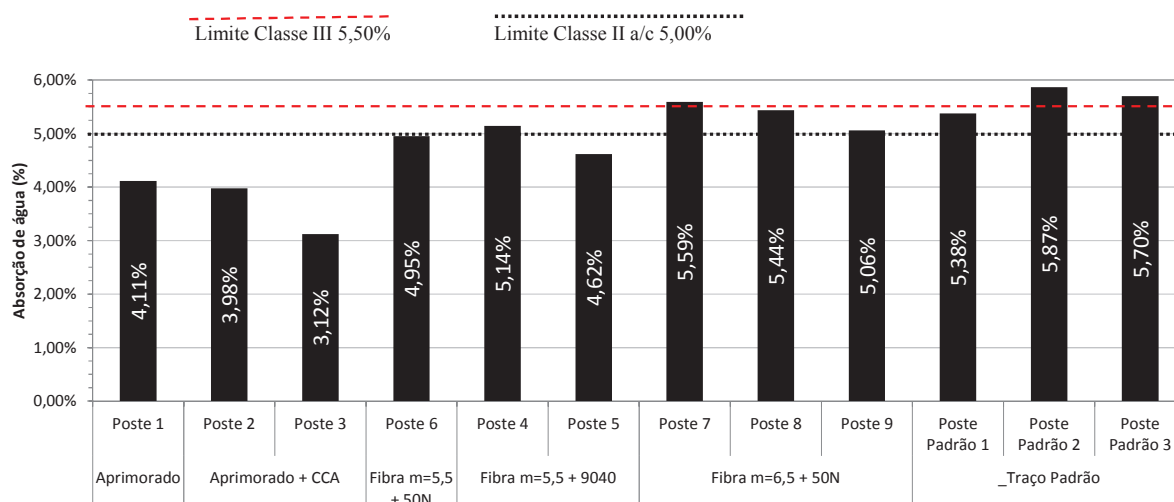


Figura 72: Absorção de água para cada poste moldado.

Quanto aos postes moldados com fibras, constatam-se que todos atendem o requisito para a classe de agressividade II, com exceção do Poste 7, que apresentou absorção 0,59% acima deste limite. Já para a classe de agressividade III, os postes com fibras moldados com menor consumo de cimento (m=6,5) não atingem os requisitos para a classe de agressividade III.

Analisando os postes com fibras ( $m=5,5$ ) observa-se que somente o Poste 4 não atingiu o limite para a classe de agressividade III apresentando 0,14% acima do limite estipulado pela NBR 8451-1 (ABTN, 2011).

Entretanto, o Poste Aprimorado apresentou absorção de água abaixo dos limites da classe de agressividade III, apresentando absorção de água de 4,11%. Todavia apenas os postes moldados com CCA atenderam as exigências de todas as classes ambientais, inclusive a classe de agressividade muito forte (classe IV), ficando abaixo de 4,00% a absorção de água do concreto.

Baseando-se nesse estudo, indica-se para a produção de postes de concreto armado a utilização dos traços: Aprimorado e Aprimorado com adição de CCA.

## 6.6 DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

Com o intuito de avaliar um indicativo de durabilidade dos postes de concreto armado moldados, adotou-se como indicativo a penetração de íons cloreto. Para tal, seguiram-se as orientações da ASTM C1202 (2012). Este método de ensaio apresenta um indicativo da durabilidade de traços de concreto, pois avalia a facilidade com que íons de cloreto penetram no concreto, sendo que, quando os íons atingem a armadura das estruturas de concreto provocam a corrosão das mesmas.

Os resultados ilustrados na Figura 73, obtidos a partir dos procedimentos da ASTM C1202 (2012), classificam os concretos de acordo com carga passante durante a realização do ensaio. Para concretos com carga passante maior que 4000 coulombs, estes possuem alta penetração de íons cloreto, representando concretos com baixa durabilidade. Resultados entre 2000 e 4000 coulombs representam concretos com moderada penetração de íons cloreto. Já valores compreendidos entre 1000 e 2000 coulombs indicam concretos com maior durabilidade com baixa penetração de íons cloreto.



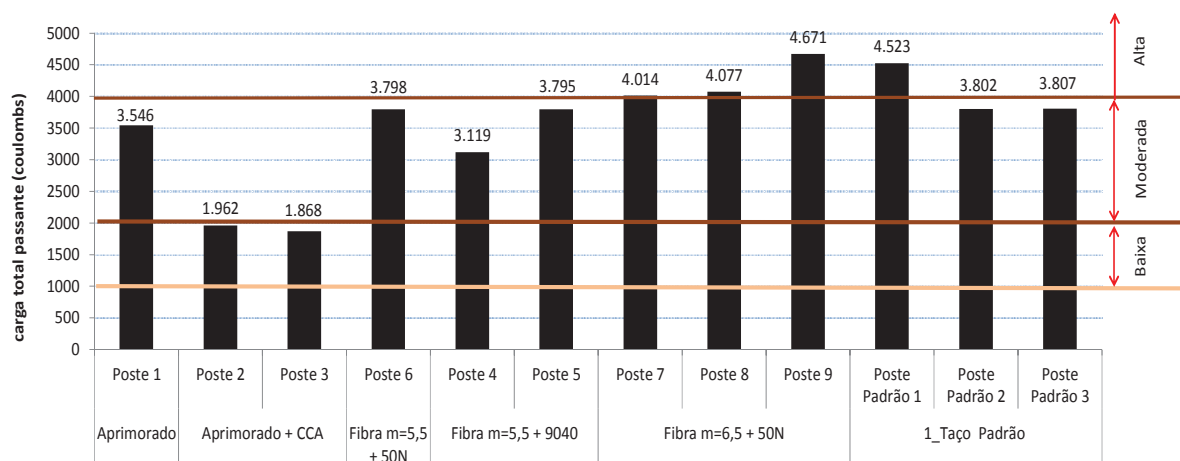


Figura 73: Penetração de íons cloreto para cada um dos postes moldados.

Analisando os resultados obtidos, observa-se que os Postes 7, 8 e 9 moldados com fibras e com consumo de cimento reduzido encontram-se na faixa de alta penetração de íons cloreto, indicando concretos com baixa durabilidade. Tal fato deve-se ao baixo consumo de cimento e consequentemente uma relação  $a/c$  elevada, resultando em um concreto com maior porosidade. Isto também pode ser constatado para o Poste Padrão 1.

Todavia, os Postes 4, 5 e 6, também moldados com fibras, porém com maior consumo de cimento, apresentam moderada penetração de íons cloreto devido à redução da relação  $a/c$ . Os demais postes utilizados atualmente pela empresa (Postes Padrão 2 e 3), encontram-se na faixa de moderada penetração de íons cloreto, porém muito próximos do limite superior da mesma. O traço aprimorado (Poste 1) também encontra-se nesta mesma faixa, porém apresenta um valor menor em relação aos postes atualmente produzidos, indicando uma aperfeiçoamento do traço também no quesito de durabilidade.

Tendo em vista o quesito de durabilidade, pode-se destacar os postes moldados com adição de CCA (Postes 2 e 3) onde estes foram os únicos com baixa penetração de íons cloreto indicando concretos com alta durabilidade, por consequência uma vida útil maior para postes de concreto. Juntamente, pode-se destacar que adição de CCA produz concretos com penetrações de íons cloreto duas vezes menores, que os atuais traços produzidos pela empresa, representando um alto ganho em durabilidade para a produção de postes de concreto armado.

Esta redução na penetração de íons cloreto deve-se, principalmente, à presença da alumina na composição da CCA sendo responsável pela retenção de cloretos nas pastas de cimento hidratadas, contribuindo significativamente para o aumento da durabilidade. Outro fator que

contribui é a redução da porosidade do concreto devido à adição pozolânica e melhor fechamento do pacote granulométrico do concreto.

## 6.7 ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE CARBONATADA E CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIDA ÚTIL DE PROJETO

Buscando averiguar como os traços estudados respondiam em termos de avanço da frente de carbonatação (esse é o mecanismo preponderante que limita a vida útil de projeto dos postes de concreto armado estudados, quando empregados em regiões não marinhas), foram efetuadas medições da profundidade carbonatada, por meio de ensaio colorimétrico com aspersão de solução de fenolftaleína, como explicado no capítulo 3.

Os valores da profundidade de carbonatação coletados para cada um dos traços estão apresentados na Tabela 39. Os corpos de prova usados nas medições foram extraídos de postes reais fabricados com os materiais, para evitar efeitos de moldagem em pequena escala. Para determinação da profundidade de carbonatação foram efetuadas 6 leituras em dois corpos de prova extraídos de cada poste (ou seja, a média corresponde a 12 leituras individuais).

Tabela 39: Profundidade de carbonatação.

Poste	Traço	Idade (dias)	Profundidade de Carbonatação	
			Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
Poste 1	Aprimorado	215	1,5	0,13
Poste 2	Aprimorado + CCA	215	1,9	0,16
Poste 3	Aprimorado + CCA	215	2,2	0,29
Poste 4	Fibra m=5,5 + 9040	215	3,0	0,22
Poste 5	Fibra m=5,5 + 9040	215	2,9	0,35
Poste 6	Fibra m=5,5 + 50N	215	3,0	0,22
Poste 7	Fibra m=6,5 + 50N	215	3,6	0,22
Poste 8	Fibra m=6,5 + 50N	215	4,3	0,22
Poste 9	Fibra m=6,5 + 50N	215	4,0	0,36
Poste Padrão 1	Traço Padrão	215	3,6	0,25
Poste Padrão 2	Traço Padrão	215	3,7	0,36
Poste Padrão 3	Traço Padrão	215	3,9	0,25

De posse dos valores da profundidade de carbonatação e a idade (tempo) determinou-se, simplificadamente, o valor do coeficiente de migração ( $k$ ), através da Equação 1, isolando-o (Equação 7) em função da profundidade de migração ( $e_c$ ) e o tempo ( $t$ ). Os valores de “ $k$ ”

para a difusão de CO<sub>2</sub> estão apresentados na Tabela 40 para cada um dos postes moldados, os valores correspondem a profundidade de carbonatação ( $e_c$ ) em mm e o tempo ( $t$ ) em anos.

Equação 7

$$k = \frac{e_c}{\sqrt{t}}$$

Tabela 40: Valores do coeficiente de migração.

Poste	Traço	k
Poste 1	Aprimorado	1,917195
Poste 2	Aprimorado + CCA	2,438375
Poste 3	Aprimorado + CCA	2,829259
Poste 4	Fibra m=5,5 + 9040	3,908845
Poste 5	Fibra m=5,5 + 9040	3,741323
Poste 6	Fibra m=5,5 + 50N	3,964686
Poste 7	Fibra m=6,5 + 50N	4,727841
Poste 8	Fibra m=6,5 + 50N	5,639905
Poste 9	Fibra m=6,5 + 50N	5,174566
Poste Padrão 1	Traço Padrão	4,709228
Poste Padrão 2	Traço Padrão	4,858136
Poste Padrão 3	Traço Padrão	5,025658

Com base nos valores obtidos do coeficiente de migração ( $k$ ) calculou-se o tempo necessário para frente de carbonatação atingir o cobrimento da armadura, para isso calculou-se o tempo necessário conforme a Equação 8.

Equação 8

$$t = \left(\frac{e_c}{k}\right)^2$$

Usando esses valores foram calculados os tempos estimados até que a frente de carbonatação atingisse a armadura (para fins de comparação foram considerados 2 cobrimentos, de 15 e 20mm, bastante empregados na fabricação de postes de concreto). Considerou-se que a vida útil de projeto estaria terminada quando a frente de carbonatação atingisse a barra, provocando sua despassivação.

A estimativa da vida útil dos postes de concreto armado está apresentada na Tabela 41, para os dois cobrimentos determinados pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) de 15 mm e 20 mm.

Tabela 41: Vida útil dos postes de concreto armado.

Poste	Traço	Vida útil (anos)	
		e=15mm	e=20mm
Poste 1	Aprimorado	61	109
Poste 2	Aprimorado + CCA	38	67
Poste 3	Aprimorado + CCA	28	50
Poste 4	Fibra m=5,5 + 9040	15	26
Poste 5	Fibra m=5,5 + 9040	16	29
Poste 6	Fibra m=5,5 + 50N	14	25
Poste 7	Fibra m=6,5 + 50N	10	18
Poste 8	Fibra m=6,5 + 50N	7	13
Poste 9	Fibra m=6,5 + 50N	8	15
Poste Padrão 1	Traço Padrão	10	18
Poste Padrão 2	Traço Padrão	10	17
Poste Padrão 3	Traço Padrão	9	16

A Figura 74 apresenta a estimativa da vida útil, expressa graficamente, para cada traço analisado, onde observa-se que o traço Aprimorado tem vida útil 6 vezes maior que o traço atualmente utilizado para a produção de postes de concreto armado (Traço Padrão) para os cobrimentos de 15 mm e 20 mm.

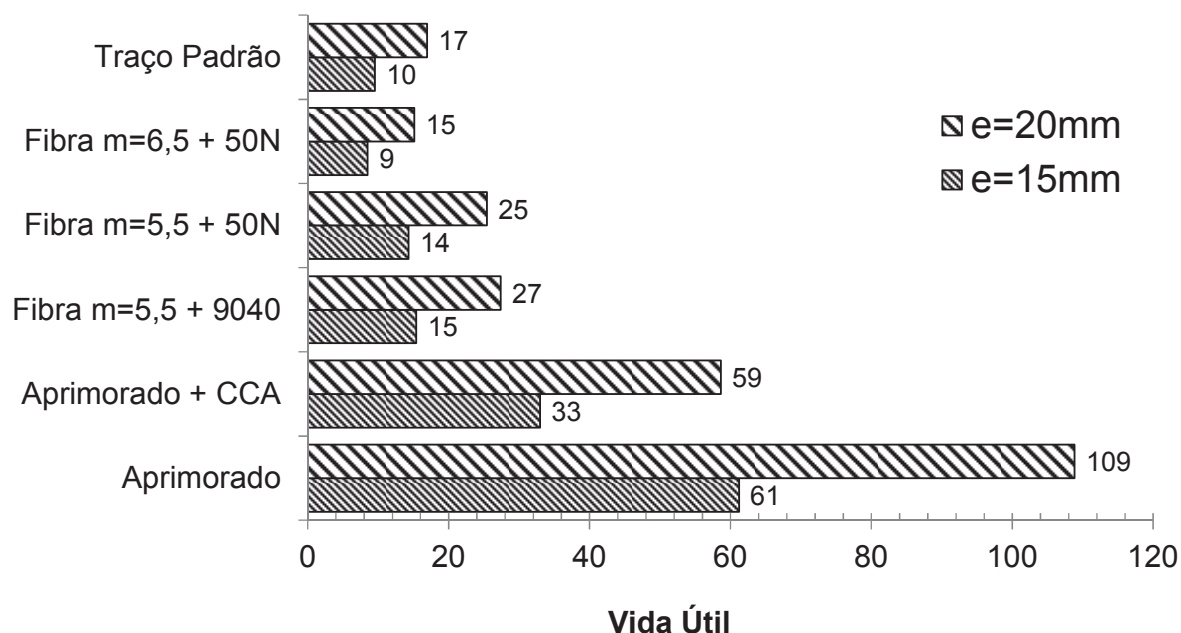


Figura 74: Estimativa da vida útil para os traços dos postes.

Analisando a figura constata-se que o traço Aprimorado com adição de CCA, em comparação com o traço padrão, apresentou um aumento de 3 vezes da vida útil do poste de concreto armado. Os traços com adição de fibra sem a redução do consumo de cimento ( $m=5,5$ ) apresentaram desempenhos similares, evidenciando comportamento acima do traço padrão, por sua vez o traço com fibra e redução do consumo de cimento ( $m=6,5$ ) apresentou desempenho inferior ao traço padrão.

Conforme a NBR 8451-1 (ABNT, 2001) exige-se uma vida útil para os postes de concreto armado de no mínimo 35 anos, deste modo somente o traço Aprimorado atenderia esse requisito para o cobrimento de 15 mm. Todavia para o cobrimento de 20 mm o traço Aprimorado com adição de CCA também atenderia a exigência mínima quanto à vida útil desse elemento.

## 7 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o estudo realizado para o aprimoramento de traços de concreto para a produção de postes de concreto armado, bem como sugestões para trabalhos futuros.

### 7.1 CONCLUSÕES FINAIS

Nos itens abaixo são apresentadas as conclusões para cada uma das etapas do programa experimental, conforme o mesmo foi dividido: estudos preliminares; estudos de dosagem e ensaios em escala real.

#### 7.1.1 Estudos preliminares

Frente aos estudos preliminares (capítulo 4) conclui-se que a incorreta aferição da umidade dos agregados altera a composição do traço, apresentando reflexos na resistência à compressão do mesmo, principalmente devido à elevação da relação a/c. Quanto às condições de cura, conclui-se que a cura à temperatura de 60°C eleva a resistência à compressão do concreto nas primeiras idades, sendo fundamental devido ao içamento dos postes nesta idade. Entretanto, a cura térmica reduz a resistência a partir de 7 dias. Também verificou-se que o tipo de água utilizada no amassamento do concreto não apresenta diferenças significativas.

#### 7.1.2 Estudos de dosagem

Quanto aos estudos de dosagem (capítulo 5) conclui-se que, para os agregados utilizados no estudo, tem-se a melhor proporção de 65% de Brita 1 e 35% de Brita 0 na composição do agregado graúdo. Para os agregados miúdos, tem-se a melhor combinação entre areia natural e areia artificial em 50% cada.

Com a confecção dos diagramas de dosagem, para concretos sem adição de CCA e com adição de CCA, foi possível concluir e determinar a composição dos traços unitários através da resistência à tração do concreto, obtendo-se a composição dos traços para o decorrer dos estudos.

Através da análise dos aditivos superplastificantes, conclui-se que os aditivos TecFlow 9040 e TecFlow 50N atingiram os requisitos quanto a trabalhabilidade e resistência mecânica necessárias para a produção dos postes de concreto armado. Deste modo ambos podem ser utilizados para execução em escala real.

Pelo estudo realizado com a adição de fibras, diretamente na produção, conclui-se que para a moldagem de postes o teor de fibra ideal é de 0,5% em volume juntamente com a utilização de Brita 0 na composição do agregado graúdo no traço de concreto, sem uso de Brita 1 na composição, mantendo assim a mesma faixa de trabalhabilidade da mistura.

Seguindo as conclusões acima obtidas, foram determinados os traços para a execução em escala real, analisando o comportamento no próprio elemento, sendo as conclusões apontadas no item abaixo.

### 7.1.3 Ensaio em escala real

Quanto aos ensaios em escala real (capítulo 6), frente à inspeção geral, conclui-se que todos os postes analisados atenderam os requisitos da NBR 8451-1 (ABNT, 2011), apresentando apenas fissuras capilares.

A partir dos resultados obtidos no ensaio de flexão, de acordo com a NBR 8451-3 (ABNT, 2001) pode-se concluir que quanto à:

- Flecha nominal: todos os postes ficaram abaixo do limite máximo;
- Flecha residual: os postes 2, 5 e padrão 1, apresentaram flechas superiores ao limite máximos, reprovados neste requisito;
- Abertura de fissuras: os postes com adição de fibras apresentaram maior número de fissuras, mas com abertura de fissura inferior. Também conclui-se que todos os postes apresentaram abertura de fissura menor que 0,30 mm, estando de acordo com as prescrições normativas;
- Carga de ruptura: todos os postes apresentaram carga de ruptura acima do valor mínimo (600 daN), atendendo a este requisito.

Em relação a avaliação da resistência à compressão dos corpos de prova extraídos, de forma geral conclui-se que esses apresentaram comportamento semelhante aos corpos de prova moldados, onde os postes 1, 2 e 3 tiveram maior resistência à compressão. Houve uma

redução deste parâmetro para os postes com fibra (Postes 4, 5 e 6) e maior redução para os Postes 7, 8 e 9, por apresentarem menor consumo de cimento. Já para os postes padrões 1, 2 e 3, tem-se a resistência à compressão próxima aos postes com menor consumo de cimento.

Analisando a relação a/c frente aos requisitos de durabilidade, conclui-se que os postes atualmente produzidos não satisfazem a relação a/c mínima para a classe de agressividade ambiental III, estando também muito próximo do limite estabelecido para a classe de agressividade II, mesmo fato constatou-se para os postes moldados com fibras e com menor consumo de cimento (P7, P8 e P9). Já para os demais postes conclui-se que todos atendem os requisitos quanto à relação a/c para ambas as classes ambientais.

Pela análise dos resultados da absorção de água dos postes moldados, conclui-se que o traço empregado atualmente na produção dos postes de concreto extrapola o limite máximo para absorção de água para as classes de agressividade ambiental II e III. Quanto aos postes moldados com fibras, constatam-se que todos atendem o requisito para a classe de agressividade II, com exceção do Poste 7. Todavia, os postes com fibras, moldados com menor consumo de cimento ( $m=6,5$ ) não atingiram os requisitos para a classe de agressividade III. Também se pode concluir que o Poste Aprimorado apresentou absorção de água abaixo dos limites da classe de agressividade III, entretanto, apenas os postes moldados com CCA atenderam as exigências de todas as classes ambientais, inclusive a classe de agressividade muito forte (classe IV), ficando abaixo de 4,00% a absorção de água do concreto.

Em relação à penetração de íons cloreto, como indicativo de durabilidade, conclui-se que os postes atualmente produzidos pela empresa (Poste padrão 1, 2 e 3) encontram-se na faixa de moderada e alta penetração de íons, também observado para os postes com fibras (Poste 4, 5, 6, 7, 8 e 9) e o poste com traço aprimorado (Poste 1). Entretanto, com a adição de CCA constatou-se que houve significativa redução na penetração de íons cloreto, ficando esse traço classificado na faixa de baixa penetração (Postes 2 e 3), sendo indicado para aplicação em ambientes marítimos com alta concentração de íons cloreto.

Quanto à determinação da vida útil dos postes de concreto armado considerando corrosão por carbonatação, conclui-se que o poste moldado com o traço Aprimorado apresentou desempenho 6 vezes superior, quando comparado com o poste atualmente produzido pela



empresa, elevando-se a vida útil de 10 para 60 anos com o cobrimento de 15 mm. Juntamente conclui-se que o poste com adição de CCA possibilitou o aumento da vida útil para 33 anos.

## 7.2 DEFINIÇÃO DO TRAÇO RECOMENDADO PARA A PRODUÇÃO DE POSTES DE CONCRETO ARMADO

Por meio das análises dos resultados e conclusões dos estudos preliminares, dos estudos de dosagem e ensaios em escala real, dentro das limitações deste estudo, conclui-se que o traço “Aprimorado com adição de CCA” é o mais indicado para a produção de postes de concreto armado. Julgou-se isso com base nos parâmetros de durabilidade, de vida útil, de resistência e do comportamento em escala real, aonde aumentou-se a vida útil dos postes de concreto armado de 10 para 33 anos.

Em resposta a questão de pesquisa, foi possível aprimorar o traço atualmente utilizado para a produção de postes de concreto armado, elevando o custo do traço em 4 R\$/m<sup>3</sup>, reduzindo o consumo de cimento de 429 kg/m<sup>3</sup> para 314 kg/m<sup>3</sup> tornando o traço mais ambientalmente correto. Além disso, foi possível aumentar a resistência à compressão, reduzindo, conjuntamente, o tempo para a moldagem do elemento. Quanto à durabilidade, reduziu-se os requisitos de absorção, reduziu-se significativamente a penetração de íons cloreto tornando o elemento mais resistente a corrosão por cloretos e juntamente reduziu-se a relação a/c, deste modo evidenciou-se uma vida útil 3vezes maior, comparando com os postes atualmente produzidos.

## 7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, este trabalho apresenta algumas sugestões para desenvolvimento futuros que podem ser estudados a fim de garantir continuidade e complementação à pesquisa:

- 1) Estudar o desempenho de concreto auto adensáveis para a produção de postes de concreto armado;
- 2) Avaliar a produção de postes de concreto armado com armaduras poliméricas;
- 3) Estudar diferentes formatos e geometrias para produção de postes de concreto armado;
- 4) Avaliar a produção de postes com compósitos cimentícios de ultra-alta resistência reforçados com fibra (UHPC), visando a produção de postes sem armaduras.

## REFERÊNCIAS

- ABRADEE. **A distribuição de energia**. Brasília, DF. 2014. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>>. Acesso em: 14 jul. 2014.
- ABRAMS, D. A. Design of Concrete Mixtures. **Bulletin 1 - Structural Materials Research Laboratory**. Chicago: Lewis Institute, v.1, n.1, p. 1-20. 1918.
- American Society for Testing and Materials. ASTM C1202. **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete 's Ability to Resist Chloride**. p. 1–8. West Conshohocken, 2012.
- ARRUDA, R. P. De. **Melhorias nos métodos de identificação e controle de postes de madeira por meio da rádio frequência e do estudo de suas propriedades mecânicas**. 2006. 132f. Dissertação (Mestrado engenharia e tecnologia dos materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733** - Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5737** - Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738** - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739** – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211** - Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215** - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7222** - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011
- \_\_\_\_\_. **NBR 7680** - Concreto - Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8451-1** - Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e transmissão de energia elétrica Par1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8451-3** - Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica Parte 3: Ensaio mecânicos, cobrimento da armadura e inspeção geral. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8451-4** - Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica Parte 4: Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768** - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653** - Materiais pozzolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655** - Concreto de Cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45** - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52** - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53** - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67** - Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248** - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003

BASTOS, S. R. B. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais**. 2002. 136f. Dissertação (Mestrado engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento portland**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

BRANDÃO, J. H. **Análise Experimental e Numérica de Cascas de Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras**. 2005. 144f. Tese (Doutorado em ciência em engenharia civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

CHANG, P.-K. An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 4, p. 623–629, abr. 2004.

CLIFTON, J. R. James R. Clifton. **ACI Materials Journal**, v. 90, n. 6, p. 611–617, 1993.

DAL MOLIN, D. C. Adições minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo / SP. IBRACON, 2011 1v. cap 8 p. 261-310.

DAY, K. W. **Concrete Mix Design, Quality Control and Specification**. 2. ed. [s.l: s.n.]. p. 307

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**. [s.l.] Taylor & Francis, 1999.

DE SÁ, D. A.; LENZI, J. R. **Concreto e Postes de Concreto**. 2003. Disponível em < [www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/Diego&Janaina.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/Diego&Janaina.pdf)>..Acesso em: 02 juh. 2014.

DÉSIR, J. M.; LORENZI, L. S.; SILVA FILHO, L. C. P.; KLEIN, D. L. **Relatório interno**. Projeto de pesquisa e desenvolvimento. LEME. 2014

FIB. **Model Code for Service Life Design**. International Federation for Structural Concrete (FIB), 2006.

FIGUEIREDO, A. D.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto com Fibras**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo / SP IBRACON, 2011 2v. cap 37 p. 1327-1368.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248f. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2011.

FOLIC, R. Durability design of concrete structures, Part 1: Analysis fundamentals. **Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering**, v. 7, n. 1, p. 1–18, 2009.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. 259f. Tese (Doutorado ciências em engenharia civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPE, 2005.

GARCIA, D. A. A.; DUZZI JR, F. E. Capítulo II Tópicos de sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. **Revista O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 74, p. 52, 2012. Disponível em < <http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes> >. Acesso em: 5 mar. 2014.

GERALDO, F. C. A Madeira de Eucalipto para Postes. **Revista da Madeira**, v. 59, 2001. Disponível em < <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira.php> >. Acesso em: 18 mar. 2014.

GIACON JÚNIOR, M. **Propagação de ondas de ultra-som em protótipos de postes tubulares de concreto armado**. 2009 .117f. Dissertação (Mestrado em em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

HARTMANN, C; JEKANAVORIAN, A; SILVA, D; BENINI, H. **Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo / SP IBRACON, 2011 1v. cap 10 p. 345-380.

HELENE, P. A nova NBR 6118 e a vida útil das estruturas de concreto. In: Seminário de Patologia das Construções , 2, 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, LEME, UFRGS, 2004.

HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo / SP IBRACON, 2011 1v. cap 12 p. 439-471.

HELENE, P.. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo / SP IBRACON, 2005 1v. cap 15 p. 439-471.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, Pini, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **General principles on the design of structures for durability**. ISO 13823. 2008

Jl, T. et al. A mix proportion design method of manufactured sand concrete based on minimum paste theory. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 422–426, jul. 2013.

KONG, F. K.; EVANS, R. H. **Properties of structural concrete**. v. 5, Springer US, 1987.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. **Design and Control Design and Control of Concrete Mixtures**. Portland Cement Association. 2003

LEÃO, R. **GTD – Geração , Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009. 38p. Apostila

LYSE, I. **Tests on consistency and strength of concrete having constant water content**ASTM, Vol. 32. **Anais...**1932

MALHOTRA, V. M. FLY ASH, SLAG, SILICA FUME, AND RICE-HUSK ASH IN CONCRETE: A REVIEW. **Concrete International**, v. 15, n. 4, p. 23–28, 1993.

MEDEIROS, M. H. F. De. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 2008. 156f. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2008

MEDEIROS, M. H. F. De; ANDRADE, J. J. De O.; HELENE, P. R. L. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo / SP IBRACON, 2011 1v. cap 22 p. 773-807.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008. XXVIII, 674 p

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Bookman. 2ed. 472p. 2013

O'REILY, V. D. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. Pini. 1ed. 122p. São Pauo, 1998.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 345f. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2006.

REGINATO, L. A.; TRENTIN, L. C.; PIOVESAN, A. Z. **Utilização do método do empacotamento em dosagens de Concretos de Alta Resistência utilizando agregados britados do Meio Oeste Catarinense**, In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. Anais... IBRACON, 2010.

ROSSI, P.; ACKER, P.; MALIER, Y. Effect of steel fibres at two different stages : the material and the structure I • **Materials and Structures/Mat&iaux et Constructions**, v. 20, p. 436–439, 1987.

ROSTAM, S. **Service life design of concrete structures** -. v. 6, n. 5, p. 423–445, 2005.

SARJA, P. A. **Durability design of concrete structures**-Committee report 130-CSL. v. 33, n. February, p. 14–20, 2000.

SARMENTO, M.; LACOURSIERE, B. A State of the Art Overview: Composite Utility Poles for Distribution and Transmission Applications. **2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America**, p. 1–4, 2006.

SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. A Influência do Tratamento Térmico da Cinza de Casca de Arroz na pozolanicidade e na Resistência à Compressão de Argamassas. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, Goiânia. **Anais... ANTAC**, 1995.

SOUSA, R. D. B. DE. **Previsão da vida útil de revestimentos cerâmicos aderentes em fachadas**. 2008. 155f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Técnica de Lisboa. Instituto superior técnico, Lisboa, 2008.

TARTUCE, R. **Dosagem experimental do concreto**. Pini/Ibracon. 115p. São Paulo, 1989

TORRES, F. Poste flexível conquista o mercado por ser opção mais segura. **Inovação em Pauta**. v.6. Finep. p. 20–22, 2012.

TOSTES, M. E. De L. **Distribuição de energia elétrica**. Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Apostila. 2012.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2006. 162f. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-adensável**. PINI. 144p. 2008.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo / SP IBRACON, 2011 1v. cap 12 p. 415-452.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo / SP IBRACON, 2011 2v. cap 36 p. 1283-1326.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **U.S.-Canada Power System Outage Task Force**: Final Report. Agosto n.14. 2004.

VIERIA FILHO, O. **Avaliação da resistência à compressão do concreto através de testemunhos extraídos: contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido aos efeitos do broqueamento**. 2007. 247f. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2007

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento portland**. 2008. 273f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

## AENXOS

Anexo 1 – Projeto estrutural do poste de concreto armado.

