

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
DAYANA RUTH BOLA OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS UTILIZANDO  
AREIA 100% ARTIFICIAL E COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO  
CIMENTO PORTLAND POR FÍLER CALCÁRIO

CURITIBA  
2016

DAYANA RUTH BOLA OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS UTILIZANDO  
AREIA 100% ARTIFICIAL E COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO  
CIMENTO PORTLAND POR FÍLER CALCÁRIO

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia de  
Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Construção Civil, Setor de  
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

CURITIBA

2016

Oliveira, Dayana Ruth Bola

Avaliação da durabilidade de concretos utilizando areia 100% artificial e com substituição parcial do cimento portland por filer calcário / Dayana Ruth Bola Oliveira. – Curitiba, 2016.

170 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: José Marques Filho

1. Durabilidade (Engenharia). 2. Areia. 3. Concreto. I. Marques Filho, José. II. Título.

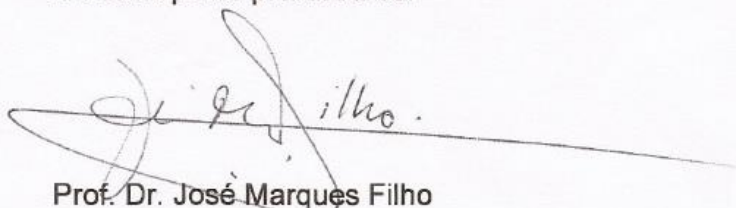
CDD 620.136

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**DAYANA RUTH BOLA OLIVEIRA**

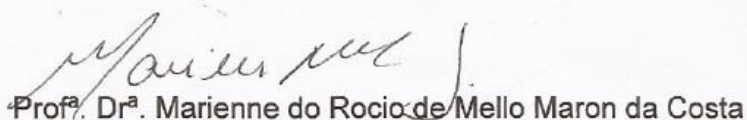
**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS UTILIZANDO AREIA 100%  
ARTIFICIAL E COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR  
FÍLER CALCÁRIO.**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela Banca Examinadora formada pelos professores:



Prof. Dr. José Marques Filho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR



Prof.ª Dr.ª Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR



Prof. Dr. Wellington Mazer

Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Eng. M.Sc. Mauricio Bianchini

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR

Curitiba, 27 de Junho de 2016

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Marques Filho, pelos ensinamentos, apoio, e por toda dedicação e compreensão. Meu muito obrigada acima de tudo pela paciência em me orientar e por acreditar que seria possível chegar até aqui. O amor pelo que faz e a generosidade para com seus alunos, são fontes de inspiração.

Ao meu coorientador Maurício Bianchini e toda à equipe da SUPERMIX pela prestatividade com a execução dos ensaios de compressão dos concretos.

Ao Prof. Dr. Wellington Mazer da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil, pela dedicação em ceder seu tempo e espaço para o que seria a realização do ensaio de permeabilidade.

À Prof. Heloisa Fuganti Campos, pela dedicação durante a elaboração desta dissertação.

À minha mãe Marli, pai Flori, irmãos Gean e Rafa e a minha cunhada Fer, que estiveram sempre ao meu lado, me apoiando, encorajando e mesmo que de longe transmitiam todo seu amor e otimismo.

Ao meu marido Wellington, pelo amor, pela compreensão e amparo em todos os momentos difíceis. Por me animar e incentivar para chegar até aqui.

Às minhas amigas Ana Caroline e Ana Paula pelas horas que me ouviram com paciência, pela injeção de animo, pelos conselhos, e principalmente pela amizade.

Aos meus tios Marlene e Gedeão, que estavam sempre disponíveis e prontificados a ajudar, por tudo que fizeram por mim, agradeço imensamente.

Meus especial agradecimento ao meu esposo e ao colega Caio Cadilhe pelos finais de semana e horas incontáveis rodando concreto.

Aos meus chefes Ronaldo, Lindenor e Diego, que me permitiram horários diferenciados e liberações das minhas atividades, para que esta pesquisa pudesse ser realizada, meu muito obrigada por toda compreensão e disponibilidade em ajudar.

Aos técnicos Ricardo e Douglas, do Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/DCC, pela disponibilidade de horários e finais de semana para execução dos ensaios.

Ao Curso e Colegiado de Pós-Graduação em Construção Civil, no Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Às empresas Companhia de Cimentos Itambé e Grace, que prontamente nos forneceram os materiais necessários à produção dos concretos em análise.

E por fim, e mais importante, à Deus, quem melhor conhece nosso potencial e nos dá caminhos pelos quais sabe que podemos percorrer, basta crer. Obrigada Senhor por mais esta vitória.

“Faze-te sem limites no tempo...”

Cecília Meireles  
*In Cânticos, 1982*

OLIVEIRA, D. R. B. **Avaliação da durabilidade de concretos utilizando areia 100% artificial e com substituição parcial do Cimento Portland por fíler calcário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

## RESUMO

A indústria da construção civil é reconhecida como uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico e social, porém, é uma das grandes geradoras de impactos ambientais. Principalmente, devido à geração de resíduos, consumo dos recursos naturais para extração de agregados e emissão de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), oriunda principalmente da fabricação do cimento. A utilização de concretos com baixo consumo de aglomerante possibilita, além da diminuição da quantidade de cimento, melhorias técnicas como a redução do calor de hidratação, atenuação de deformações e fissuras, além de maior controle em relação a penetração de agentes agressivos ao concreto, tornando-os potencialmente mais duráveis. O conceito de durabilidade está associado aos mecanismos de transporte, principalmente à permeabilidade, aliada à carbonatação, migração de íons cloreto e resistividade. Nesse contexto, o objetivo geral do presente trabalho é avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra e areia artificial, proveniente da região metropolitana de Curitiba, na durabilidade dos concretos. O estudo baseia-se na substituição em 100% da areia natural pela areia artificial e teores de 0%, 6% e 12% de pó de pedra substituídos em relação a areia e ao cimento. Para os concretos de 30 MPa foram mantidas as mesmas quantidades de cimento e variados os teores de pó de pedra em relação a areia, já para os concretos de 50 MPa e 80 MPa, foram mantidos os teores de areia e houve a substituição do pó de pedra em relação ao cimento. O intuito deste estudo é fornecer parâmetros de durabilidade para produção de concretos. Hoje em dia ainda não é possível definir exatamente o que é um concreto durável, deste modo este trabalho pretende ser um balizador para esta definição. O estudo tem caráter experimental, realizado através de ensaios de carbonatação, migração de íons cloreto, permeabilidade, resistividade elétrica e resistência à compressão. A partir das análises dos resultados, se obteve redução significativa do consumo de cimento com a substituição parcial do pó de pedra, no entanto, para as substituições parciais do fíler calcário à areia artificial, não se mostrou considerável ao estudo. Os melhores resultados encontrados com as substituições de pó de pedra foram para as relações água/aglomerante de 0,28 e 0,35, para as análises à carbonatação e permeabilidade. Para migração de íons cloreto e resistência à compressão, as adições, no geral, foram expressivas para todas as amostras. Em relação à resistividade elétrica os resultados foram representativos para os concretos com resistência de 80 MPa. Desta forma, as substituições foram relevantes para as substituições frente aos ensaios realizados.

Palavras – chave: durabilidade, areia artificial, fíler calcário e sustentabilidade.

OLIVEIRA, D. R. B. **Concrete durability evaluation using sand 100% artificial and partial replacement of Portland cement by limestone filler.** Dissertation (Master Degree on Construction Engineering) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

## ABSTRACT

The construction industry is recognized as one of the most important activities for economic and social development, however, is one of the major generators of environmental impacts due to the generation of waste, consumption of natural resources for aggregate extraction, as well as generating carbon dioxide ( $CO_2$ ), mainly arising from the cement manufacturing, harmful both to the environment and to society. The use of concrete with low Portland cement consumption enables in addition to decreasing the amount of cement, technical improvements such as reducing the heat of hydration, attenuation deformations and cracks, as well as greater control over the penetration of aggressive agents to the concrete, making potentially more durable. The concept of durability is associated with the transport mechanisms, especially the permeability, combined with carbonation, chloride ion migration and resistivity. The goal is to apply these concepts in conventional concrete and high strength through the use of standards and procedures commonly used by the academic community. The study is based on the replacement of 100% natural sand by artificial sand and contents of 0%, 6% and 12% stone powder replaced for the sand and cement. For concrete 30 MPa were kept the same amounts of cement and varied stone dust levels than the sand, as for the concrete 50 MPa and 80 Mpa, were maintained sand content and was the replacement of stone powder for cement. The purpose of this study is to provide durability parameters for the production of concrete. Nowadays it is not possible to define exactly what is a durable concrete, so this work aims to be a beacon for this setting. The study is experimental, performed by carbonation tests, migration of chloride ions, permeability, electrical resistivity and compressive strength. From the analysis results, there was obtained a significant reduction in cement consumption with partial replacement of stone powder, however, partial substitutions for limestone filler artificial sand was not significant to the study. The best results with the stone dust replacements were for water / binder of 0,28 and 0,35, for the analyzes to carbonation and permeability. For migration of chloride ions and compressive strength, additions, in general, it was significant for all samples. Regarding the electrical resistivity results were representative for the concrete with strength of 80 MPa. Thus, substitutions are relevant to the front replacements tests.

Keywords: durability, artificial sand, limestone filer and sustainability.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MAPA MENTAL – UNIDADE DE ANÁLISE.....	31
FIGURA 2 – CONSEQUENCIAS MAIS RELEVANTES DA CARBONATAÇÃO NO CONCRETO.....	39
FIGURA 3 - CAMARA DE CARBONATAÇÃO PARA ENSAIO ACELERADO .....	40
FIGURA 4 – ENSAIO DE RESITIVIDADE COM EQUIPAMENTO RESIPOD.....	50
FIGURA 5 – EFEITO DA QUANTIDADE E DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NA EFICIENCIA DO EMPACOTAMENTO: a) sistema monodisperso; b) máxima densidade de empacotamento teórico; c) deficiência de partículas pequenas; d) deficiência de partículas grandes; e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.....	54
FIGURA 6 – INTERAÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A RESITÊNCIA DO CONCRETO. ZT = ZONA DE TRANSIÇÃO.....	63
FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA CPV-ARI.....	69
FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO MIÚDO.....	70
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA BRITA.....	71
FIGURA 10 - PÓ DE PEDRA COLETADO EM PEDREIRA.....	72
FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PÓ DE PEDRA .....	73
FIGURA 12 - MESA VIBRATÓRIA EMPREGADA NOS ENSAIOS .....	77
FIGURA 13 - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO APÓS MOLDAGEM .....	78
FIGURA 14 - CÂMARA SECA OU CÂMARA DE SAZONAMENTO .....	84
FIGURA 15 – CAMARA DE CARBONATAÇÃO PARA ENSAIO ACELERADO .....	84
FIGURA 16 – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA .....	85
FIGURA 17 – CORPOS DE PROVA EMPREGADOS NO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	86
FIGURA 18 – MEDIDAS REALIZADAS DO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	86
FIGURA 19 - ENSAIO DE CARBONATAÇÃO 91 DIAS DE CURA, 28 SAZONAMENTO E 35 CAMARA CARBONATAÇÃO. ....	87
FIGURA 20 – AMOSTRAS SELADAS COM SILICONE PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	89
FIGURA 21 – CORPOS DE PROVA ENCAMINHADOS AO DESSECADOR PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	90
FIGURA 22 – CORPOS DE PROVA APENAS À VACULO POR 3 HORAS PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	90

FIGURA 23 – INCREMENTO DE ÁGUA DESTILADA AO DESSECADOR PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	91
FIGURA 24 – CORPOS DE PROVA SUBMERSOS AO DESSECADOR PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	91
FIGURA 25 – APLICAÇÃO DE VÁCUO COM ÁGUA DESTILADA E IMERSÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	92
FIGURA 26 – MONTAGEM DAS CÉLULAS PARA ENSAIO DE PENETRABILIDADE PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	92
FIGURA 27 - SOLUÇÕES DE NaCl E NaOH NAS CÉLULAS DE ACRÍLICO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	93
FIGURA 28 - CÉLULA DE MIGRAÇÃO USADA NO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	93
FIGURA 29 – APLICAÇÃO DE CARGA PASSANTE DE 60V NA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	94
FIGURA 30 - ENSAIO DE ÍONS CLORETO.....	94
FIGURA 31 - VOLTAGEM APLICADA PARA ENSAIO DE PENETRABILIDADE.....	95
FIGURA 32 – CAPEAMENTO E CORTE DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	97
FIGURA 33 - ESQUEMA DE ENSAIOS DE PERMEABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	98
FIGURA 34 – EQUIPAMENTO TORRENT PERMEABILITY TESTER PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR.....	98
FIGURA 35 – MEDIÇÃO DE $K_T$ (COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO CONCRETO) ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR .....	99
FIGURA 36 – EQUIPAMENTO RESIPOD SEGUNDO MÉTODO WENNER PARA ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	101
FIGURA 37 – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....	101
FIGURA 38 – PRENSA UTILIZADA PARA O ENSAIO A COMPRESSÃO.....	102
FIGURA 39 – REGRESSÃO LINEAR PARA ENSAIO ACELERADO DE CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	104
FIGURA 40 – CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA E NATURAL.....	107
FIGURA 41 – PROFUNDIDADE CARBONATADA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA CORPOS DE PROVA COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	109

FIGURA 42 - EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	110
FIGURA 43 - EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ DE PEDRA PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	111
FIGURA 44 - EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ DE PEDRA PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	111
FIGURA 45 – REGRESSÃO LINEAR PARA ENSAIO ACELERADO DE CONCRETOS COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	114
FIGURA 46 - PROFUNDIDADE CARBONATADA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA CORPOS DE PROVA COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	117
FIGURA 47 – PENETRABILIDADE MÉDIA DE ÍONS CLORETO AOS 91 DIAS .....	122
FIGURA 48 – PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA.....	124
FIGURA 49 – EVOLUÇÃO DA PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA .....	125
FIGURA 50 – EFEITO DAS IDADES DE CURA EM RELAÇÃO ÀS RESISTÊNCIAS – ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	125
FIGURA 51 – EFEITO DAS IDADES DE CURA EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ – ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	126
FIGURA 52 – PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO A IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA .....	128
FIGURA 53 – EVOLUÇÃO DA PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO A PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA .....	128
FIGURA 54 – EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	129
FIGURA 55 – EFEITO DA PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ DE PEDRA COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA.....	129
FIGURA 56 – PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO A PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA .....	131
FIGURA 57 – EVOLUÇÃO DA PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO A IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA.....	132

FIGURA 58 – EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	132
FIGURA 59 – EFEITO DO TEOR DE PÓ EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	133
FIGURA 60 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA.....	135
FIGURA 61 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA .....	136
FIGURA 62 – EFEITO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA LOGO APÓS A CURA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA.....	137
FIGURA 63 - EFEITO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA LOGO APÓS A CURA EM RELAÇÃO AO TEOR DE PÓ.....	137
FIGURA 64 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM RELAÇÃO ÀS IDADES DE EXPOSIÇÃO COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS .....	140
FIGURA 65 – EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	140
FIGURA 66 - EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO RELAÇÃO AO TEOR DE PÓ COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....	141
FIGURA 67 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM RELAÇÃO ÀS IDADES DE EXPOSIÇÃO COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS .....	143
FIGURA 68 – EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	144
FIGURA 69 – EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO EM RELAÇÃO AO TEOR DE PÓ COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	145
FIGURA 70 – EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AS IDADES DE CURA.....	148
FIGURA 71 – EFEITO DOS TEORES DE PÓ EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	149
FIGURA 72 – EFEITO DAS IDADES DE CURA EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	150

## LISTA DE TABELAS

QUADRO 1 – EMISSÕES DE GEEs DECORRENTES DE PROCESSOS INDUSTRIAIS .....	25
QUADRO 2 - PRODUÇÃO DO CIMENTO NO BRASIL .....	26
QUADRO 3 - CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	29
QUADRO 4 - PESQUISAS RELACIONANDO PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> .....	41
QUADRO 5 - RESULTADOS DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	43
QUADRO 6 - ESTIMATIVA DA PROBABILIDADE DE CORROSÃO .....	50
QUADRO 7 - INDICAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO .....	51
QUADRO 8 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS CPV-ARI .....	69
QUADRO 9 - GRANULOMETRIA CPV-ARI .....	69
QUADRO 10 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO MIÚDO .....	70
QUADRO 11 - CARACTERÍSTICAS AGREGADO MIÚDO .....	70
QUADRO 12 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO	71
QUADRO 13 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO .....	71
QUADRO 14 - CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE PEDRA .....	72
QUADRO 15 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - SÍLICA ATIVA.....	74
QUADRO 16 - FAIXAS DE RESISTÊNCIAS ESPERADAS .....	75
QUADRO 17 - TRAÇO BASE SEM ADIÇÃO DE PÓ DE PEDRA .....	75
QUADRO 18 - TRAÇO COM 6% DE PÓ DE PEDRA.....	76
QUADRO 19 - TRAÇO COM 12% DE PÓ DE PEDRA.....	76
QUADRO 20 - ESCALA DE IMPORTANCIA .....	79
QUADRO 21 - CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE .....	79
QUADRO 22 - VARIÁVEIS DE RESPOSTA.....	79
QUADRO 23 - PARÂMETROS DO PROCESSO .....	80
QUADRO 24 - DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES.....	80
QUADRO 25 - FATORES DE RUÍDO .....	80
QUADRO 26 - DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	82
QUADRO 27 - ENSAIO DE CARBONATAÇÃO E RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	82
QUADRO 28 - ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	83
QUADRO 29 - ENSAIO DE PERMEABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....	83

QUADRO 30 - PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETO BASEADO NA CARGA PASSANTE .....	95
QUADRO 31 – PARAMETRO DE VERIFICAÇÃO DE PERMEABILIDADE AO AR .....	100
QUADRO 32 - PROFUNDIDADE CARBONATADA MÉDIA E COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO AOS 28 DIAS DE CURA SUBMERSA E 28 DIAS DE CÂMARA DE SECA.....	105
QUADRO 33 - PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS PARA OS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA (NEVILLE, 1997) – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	106
QUADRO 34 – PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS PARA OS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA (FERREIRA, 2013) - – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	107
QUADRO 35 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA CARBONATAÇÃO ACELERADA PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS .....	112
QUADRO 36 - PROFUNDIDADE CARBONATADA E COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO AOS 91 DIAS DE CURA SUBMERSA E 28 DIAS DE CÂMARA DE SECA.....	115
QUADRO 37 - PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS PARA OS CONCRETOS COM 91 DIAS DE CURA (NEVILLE, 1997) – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	116
QUADRO 38 - PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS PARA OS CONCRETOS COM 91 DIAS DE CURA (FERREIRA, 2013) – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	116
QUADRO 39 – EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 91 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	118
QUADRO 40 – EFEITO DOS TEORES DE PÓ EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 91 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	118
QUADRO 41 – EFEITO DAS RESISTÊNCIAS EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 91 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	119
QUADRO 42 – ANOVA PARA CONCRETOS COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	120
QUADRO 43 – PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETO VERIFICADOS PELA CARGA PASSANTE ACUMULADA .....	121
QUADRO 44 – ANOVA PARA MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	123
QUADRO 45 – ANOVA PARA PERMEABILIDADE LOGO APÓS A CURA .....	126

QUADRO 46 – ANOVA PARA PERMEABILIDADE DE CONCRETOS COM CURA AOS 28 DIAS .....	130
QUADRO 47 - ANOVA PARA PERMEABILIDADE DE CONCRETOS COM CURA AOS 91 DIAS .....	134
QUADRO 48 – ANOVA PARA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA LOGO APÓS A CURA.....	138
QUADRO 49 - ANOVA PARA RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA CURA SUBMERSA AOS 28 DIAS.....	142
QUADRO 50 – ANOVA PARA RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA CURA SUBMERSA AOS 91 DIAS.....	146
QUADRO 51 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa).....	147
QUADRO 52 – RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA .....	148
QUADRO 53 – ANOVA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	151

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1.	PROBLEMA DA PESQUISA	17
1.2.	OBJETIVO	18
1.2.1.	Objetivo geral	18
1.3.	HIPÓTESE	18
1.4.	JUSTIFICATIVA	19
1.4.1.	<b>Justificativa social e ambiental</b>	21
1.4.2.	<b>Justificativa econômica</b>	23
1.4.3.	<b>Justificativa tecnológica</b>	24
1.4.4.	Sustentabilidade na produção do concreto	24
1.5.	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	26
1.6.	CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA	27
1.7.	ESTRATÉGIA DA PESQUISA	28
1.8.	UNIDADE DE ANÁLISE	29
1.9.	ESTRUTURA DA PESQUISA	32
<b>2.</b>	<b>DURABILIDADE</b>	<b>33</b>
2.1.	HISTÓRICO	33
2.2.	DEFINIÇÃO DE DURABILIDADE	34
2.3.	AGENTES DE DEGRADAÇÃO DO CONCRETO	36
2.4.	PARÂMETROS DE DURABILIDADE	38
2.4.1.	<b>Carbonatação</b>	38
2.4.2.	<b>Migração de íons cloreto</b>	45
2.4.3.	<b>Permeabilidade</b>	46
2.4.4.	Resistividade	48
<b>3.</b>	<b>CONCRETO COM FINOS</b>	<b>52</b>
3.1.	GRANULOMETRIA E EMPACOTAMENTO	53
3.2.	AGREGADOS	55
3.2.1.	<b>Agregados naturais</b>	55
3.2.2.	<b>Agregados artificiais</b>	57
3.2.3.	<b>Pó de pedra</b>	58
3.3.	ADITIVOS E ADIÇÕES	59
3.3.1.	<b>Sílica ativa</b>	59
3.3.2.	<b>Aditivos plastificantes</b>	60
3.3.3.	<b>Aditivos superplastificantes</b>	61
3.4.	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	62
3.4.1.	Resistência à compressão	62
3.4.2.	Módulo de elasticidade	63
3.4.3.	Retração e fluência	64
<b>4.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>66</b>
4.1.	VALIDADE DA PESQUISA	66
4.2.	MATERIAIS	68



4.2.1.Cimento .....	68
4.2.2.Agregado miúdo.....	70
4.2.3.Agregado graúdo .....	71
4.2.4.Pó de pedra .....	72
4.2.5.Aditivos .....	73
4.2.6.Sílica Ativa .....	73
4.3. SELEÇÃO DA AMOSTRA.....	74
4.4. MATRIZ EXPERIMENTAL .....	78
4.5. MÉTODOS .....	81
<b>4.5.1.Ensaio de carbonatação acelerada .....</b>	<b>83</b>
<b>4.5.2.Ensaio de migração de íons cloreto .....</b>	<b>89</b>
<b>4.5.3.Ensaio de permeabilidade.....</b>	<b>96</b>
<b>4.5.4.Ensaio de resistividade Elétrica .....</b>	<b>100</b>
<b>4.5.5.Ensaio de resistência à compressão.....</b>	<b>102</b>
5. ANÁLISE DE RESULTADOS .....	103
5.1. CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	103
<b>5.1.1.Avaliação estatística da carbonatação acelerada aos 28 dias de cura submersa .....</b>	<b>103</b>
<b>5.1.2.Avaliação estatística da carbonatação acelerada aos 91 dias de cura submersa .....</b>	<b>113</b>
5.2. MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	121
5.3. PERMEABILIDADE.....	123
<b>5.3.1.Avaliação estatística da permeabilidade dos corpos de prova logo após a cura.....</b>	<b>124</b>
<b>5.3.2.Avaliação estatística da permeabilidade dos corpos de prova com 60% de umidade .....</b>	<b>127</b>
5.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	135
<b>5.4.1.Avaliação estatística da resistividade elétrica dos corpos de prova logo após a cura.....</b>	<b>135</b>
<b>5.4.1.Avaliação estatística da resistividade elétrica dos corpos de prova com 60% de umidade .....</b>	<b>139</b>
5.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	146
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	152
6.1. SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	155
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	157

## 1 INTRODUÇÃO

É fundamental, ao projetar uma estrutura, que as características de durabilidade dos materiais em questão sejam avaliadas com o mesmo cuidado que outros aspectos, tais como propriedades mecânicas e custo inicial. Uma vez que uma estrutura durável sob um conjunto de condições, não significa necessariamente que o seja, sob outro conjunto, costuma-se incluir uma referência geral ao ambiente ao se definir durabilidade (MEHTA, 1999).

Observando a NBR 6118/2014, a mais relevante é a resistência do concreto, pois fornece uma indicação da qualidade do material, uma vez que está diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento endurecida. As demais propriedades do concreto são, em geral, a ela correlacionadas ou à relação água cimento, porém, essa abordagem não é uma medida totalmente confiável quando utilizada isoladamente, como quantificador da durabilidade. Para tanto, é ideal conhecer o comportamento dos materiais que compõe a estrutura quando submetidos às várias condições de exposição, pois suas propriedades variam em decorrência da interação da sua estrutura ou mais especificamente, da sua microestrutura com o meio ambiente. Assim, o grau de deterioração de um concreto é influenciado, entre outros fatores, pela capacidade do material em impedir que a solução agressiva penetre por sua superfície, de modo que, para ser mais durável, um concreto deve ser o mais impermeável possível. Portanto, a permeabilidade é uma das propriedades mais importantes no estudo da durabilidade do concreto, pois esta determina a vulnerabilidade do concreto aos agentes externos. Essa propriedade pode ser obtida por um alto consumo de cimento, utilização de finos e adições minerais, por uma baixa relação água/cimento, uma trabalhabilidade adequada, assim como operações corretas no que se refere à mistura, ao lançamento, ao adensamento e à cura do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 1997; RIBEIRO et al., 2013).

As variações de comportamento e deteriorações ocorrem ao longo do tempo e da vida útil de um determinado material, a qual é finalizada quando suas propriedades tornam seu uso inseguro ou antieconômico. Atribuiu-se o problema atual da pouca durabilidade das construções à carência de conhecimento quanto aos materiais e componentes das estruturas de concreto.

No caso de materiais e componentes “tradicionalmente utilizados”, o conhecimento do seu uso constitui uma fonte preciosa de dados para a estimativa da vida útil. No entanto, quando se trata de materiais e componentes de características novas, é necessário recorrer a métodos de ensaio que simulem seu uso (ROQUE e MORENO JUNIOR, 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os agregados eram tratados como materiais de enchimento dentro do concreto, pelo fato de não apresentarem reações químicas complexas em contato com a água, sendo considerados inertes. Porém, esse tratamento secundário dado aos agregados se mostrou errôneo diante de descobertas da influência que estas partículas exercem na trabalhabilidade das misturas, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto. Com o crescimento das aglomerações humanas, e escassez de areia natural próximos às construções, a utilização de areia natural se torna cada vez mais limitada, tanto por questões de custo quanto socioambientais. A areia artificial passa a assumir um protagonismo maior como componente de concretos, levando a necessidade de estudos de seus efeitos ao longo da cadeia produtiva do concreto.

Diante disso, este trabalho visa fornecer parâmetros de durabilidade através do emprego de agregado pulverizado e areia 100% artificial, ambos de origem calcária, visando avaliar os efeitos das características de empacotamento obtidas em seu emprego, através de pesquisa e ensaios de carbonatação, migração de íons cloreto, permeabilidade, resistividade elétrica e resistência à compressão. Para concretos convencionais e de alta resistência, com areia artificial e adições de agregado pulverizado variando entre 0% e 12%.

### 1.1. PROBLEMA DA PESQUISA

As mudanças climáticas, a degradação ambiental e a utilização intensiva na construção civil de materiais não renováveis geram a necessidade de criar concretos resistentes, duráveis e que diminuam a preocupação com as questões ambientais, além de, paralelamente, satisfazer às questões sociais e econômicas. O meio técnico tem realizado diversos estudos para criar alternativas para o emprego de areia artificial e pó de pedra em substituição à areia natural na fabricação de concretos já que a

disponibilidade da areia natural perto dos grandes centros é escassa. Portanto, a utilização de areia artificial se apresenta com alternativa interessante para a produção de concretos. Sabendo-se que a produção de areia artificial produz quantidade significativa de calcário pulverizado, que em grande parte gera, resíduos que impactam ao meio ambiente, e várias pesquisas indicam que podem ser empregados em substituição parcial do cimento e da areia, aplicando conceito de empacotamento das misturas. Este trabalho tenta avaliar os efeitos da utilização de areia artificial e agregados pulverizados na durabilidade de concretos.

A durabilidade é um vetor importante dos modernos conceitos de sustentabilidade das construções, aliando o conceito de vida útil àqueles que minimizem os impactos ambientais para que, sejam projetadas estruturas que necessitem de menos recursos, manutenção e intervenções ao longo do tempo.

Esta pesquisa preocupa-se em verificar se é possível obter concretos duráveis, através da substituição parcial de pó de pedra ao cimento e utilização de areia 100% artificial, comparando ensaios de: carbonatação, migração de íons cloreto, permeabilidade, resistividade elétrica e resistência à compressão, correlacionando-os.

## 1.2. OBJETIVO

### 1.2.1. Objetivo geral

Avaliar a influência da substituição em 100% da areia natural pela areia artificial e o emprego de teores de 0%, 6% e 12% de pó de pedra substituídos em relação a areia e ao cimento na durabilidade do concreto.

## 1.3. HIPÓTESE

A produção de agregado artificial gera agregado pulverizado, cuja quantidade é mais significativa quanto menor a dimensão do material obtido. Desta forma, parte-se da hipótese que a presença de materiais finos na areia artificial pode preencher os vazios do concreto, diminuindo a porosidade e aumentando a resistência. No entanto,

a alta superfície específica dos finos demanda mais água, reduzindo a trabalhabilidade e elevando o consumo de aditivos plastificantes, para concretos convencionais, e superplastificantes para os concretos de alta resistência. Utilizando-se de tecnologia do concreto, acredita-se que o efeito filler do pó de pedra levará a economia do consumo de cimento, mantendo a resistência, através do uso de aditivos, e contribui para a manutenção ou aumento da durabilidade.

O processo produtivo do concreto é responsável por aproximadamente 7% das emissões antropogênicas, aquelas derivadas de atividades humanas, de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) emitido na atmosfera, contribuindo significativamente para o aquecimento global (POSSAN et al., 2012) (IPCC (2007)).

Segundo Mehta (1999), três são as ferramentas na direção da sustentabilidade da indústria do cimento: redução do consumo de concreto nas estruturas, redução no consumo de cimento no concreto e redução no consumo de clínquer no cimento.

Considerando que o concreto fabricado com areia natural e o concreto dosado com areia artificial possuem diferentes microestruturas e comportamentos reológicos, tem-se como hipótese também que substituindo a areia natural por areia artificial (com agregado pulverizado) e teor de finos controlado (calcário pulverizado), obtém-se a melhora no empacotamento das partículas. Conseqüentemente, os resultados obtidos serão satisfatórios quanto à permeabilidade e à durabilidade, ou seja, uma estrutura de concreto durável e econômica, trazendo uma saída para a escassez do agregado natural, para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e redução também de custos na produção do concreto. Portanto, a originalidade deste estudo está justamente em analisar e conhecer a influência desses dois resíduos da construção civil, areia artificial com pó de pedra nas propriedades de durabilidade.

#### 1.4. JUSTIFICATIVA

A exploração prolongada das areias naturais, utilizadas na construção civil em larga escala como um dos materiais constituintes de argamassas para diferentes usos e de concretos, resultou no esgotamento das jazidas próximas aos grandes centros urbanos. Além disso, são crescentes as restrições impostas pelos órgãos ambientais à sua exploração em leitos de rios, visto que, as diversas formas de vegetação e florestas situadas às margens dos cursos d'água são consideradas como áreas de preservação permanentes.

As limitações que decorrem das razões acima descritas têm tornado necessária à busca desse material em locais cada vez mais distantes, elevando o custo desta matéria-prima que está cada dia mais escassa (GUACELLI, 2010).

A construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. No Brasil, a demanda de agregados vem aumentando ano a ano. De acordo com Departamento Nacional de Produção Mineral (2008) o consumo estimado de areia, somente para a construção civil, era, no ano 2001, de aproximadamente 244,4 milhões de toneladas, em 2007 aproximadamente 279,0 milhões de toneladas e em 2012 cresceu para 368,9 milhões de toneladas.

A ABNT NBR 7211:2009 fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Dessa forma, define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas consolidadas, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075mm. Define ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas consolidadas, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm (SERNA e REZENDE, 2009).

No que se refere a grande parte do agregado miúdo natural (areia), que é extraída de leitos de rios, ela é responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente. Órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), vêm coibindo essa extração. Dentro desse contexto, os mineradores são forçados a extrair esses agregados em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, o que aumenta o preço final do produto (BARBOSA et. al, 2008).

A construção civil é considerada como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social. Assume um papel estratégico para o desenvolvimento do país, pela geração de emprego e renda, participação no PIB e bem-estar da população, mas, paralelamente, como apresentado, é uma grande geradora de impactos ambientais.

Diante disso, obter alternativas ao consumo do agregado miúdo natural, decorrente da escassez crescente de oferta é objeto de estudos no meio técnico e

científico em busca de um cenário mais sustentável. A presença de agregado miúdo é fundamental para a diminuição dos vazios do esqueleto granular do concreto, dar coesão e travamento visando manter a integridade da massa.

O setor tem um grande desafio, harmonizar uma atividade produtiva dessa magnitude com as condições que levem a um desenvolvimento sustentável, assim conciliando questões econômicas, sociais e ambientais, sem comprometer as gerações futuras (CAMPOS, 2015).

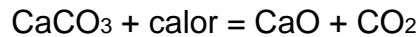
Como a durabilidade também é um dos vetores em prol da sustentabilidade, esta pesquisa visa fornecer parâmetros que caracterizem os concretos produzidos com areia artificial e teores de pó de pedra.

#### **1.4.1. Justificativa social e ambiental**

O ramo da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais. O consumo de agregados naturais varia entre um e oito toneladas/habitante.ano. No Brasil, a demanda de agregados vem aumentando ano a ano. De acordo com John (2000), o consumo estimado de agregados naturais, somente na produção de concretos e de argamassas, era, no ano 2000, de aproximadamente 220 milhões de toneladas. Em 2006, Buest (2006) menciona que o consumo chega a 395 milhões de toneladas.

De acordo com Freitas (2005), a extração de minerais em grandes jazidas, como o calcário para a produção do cimento ou o minério de ferro para produção do aço, sempre gerou um grande impacto sobre o meio ambiente. Também a industrialização do minério, seja para cimenteiras ou nas siderúrgicas, é uma atividade de intenso consumo de recursos naturais e energia, com a inevitável geração de resíduos. Produzindo concretos mais duráveis através da exploração do potencial dos materiais anteriormente descartados, juntamente com a utilização de matérias primas menos nobres, é possível minimizar o consumo de cimento e do concreto, reduzir o impacto ao meio ambiente e as emissões de CO<sub>2</sub>. Na cadeia produtiva do concreto, além da produção de gases do efeito estufa (GEE) nos processos de exploração de pedreiras, moagem das matérias primas, fabricação de equipamentos e transporte; a maior parte das emissões de CO<sub>2</sub> é na etapa de produção de cimento. As grandes emissões nas usinas são ocasionadas principalmente na produção do clínquer - pela alta

temperatura do forno rotativo, cerca de 1500°C, o qual consome grandes volumes de combustíveis - e à decomposição química das matérias-primas. A decomposição ocorre pelo processo de descarbonatação, que transforma calcário (CaCO<sub>3</sub>) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), conforme:



(1)

Através do emprego de agregado artificial também é possível atenuar consideravelmente o impacto da extração de agregado natural ao meio ambiente e a sociedade, como discutido anteriormente.

Em relação à utilização do pó de pedra, de acordo com Hoffman (2015) durante o processo de produção da areia britada, é gerado material fino, passante pela peneira #100 e em grande parte passante pela peneira #200. Este material é considerado usualmente indesejável devido à sua alta superfície específica, sendo efetuada sua retirada, que é feita através da lavagem do material britado. A água com este material fino em suspensão é encaminhada para lagoas de decantação, e posteriormente o material decantado é disposto em aterros, tornando as regiões de disposição em ambientes improdutivos. Menossi (2004) afirma que o descarte dessa fração granulométrica (0,075mm) das areias artificiais pode ocasionar uma séria de impactos ambientais.

As políticas ambientais relacionadas ao tema devem focar-se no adequado manuseio, visando uma possível reutilização ou redução, reciclagem e posterior disposição desses resíduos. A principal ação efetiva em termos legais, para a superação dos problemas ambientais, foi a criação da Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 2002. A citada resolução, definiu responsabilidades e deveres, justificando um novo sistema de gestão, o qual obriga os geradores a reduzir, reutilizar e reciclar, tratar e dispor os resíduos de construção e demolição (RCD).



### 1.4.2. Justificativa econômica

Atualmente, durabilidade, resistência e custo das estruturas vêm sendo tratadas com igual importância. Como a durabilidade afeta diretamente o custo das construções, a necessidade de reforço e reparo em estruturas tem feito com que os engenheiros se conscientizem da importância do tema (POGGIALI, 2009).

Além do fato de que a substituição de parte do cimento por pó de pedra oferece vantagens econômicas, pois o clínquer é substituído por um agregado economicamente mais viável, consumindo menor quantidade de recursos naturais como calcário para a sua produção. Além disso, é possível reduzir o consumo de energia térmica para produção do cimento e de energia elétrica na moagem.

A escolha adequada dos materiais de construção, pode assim contribuir de forma decisiva para a redução da quantidade de energia necessária na construção de edifícios. Uma escolha correta dos materiais de construção podem reduzir quase 30% às emissões de CO<sub>2</sub> (JALALI e TORRAL, 2008).

Outra questão é a distância para extração de agregado natural, pois, segundo Almeida (2005), a exaustão de áreas próximas aos grandes centros consumidores e a restrição desta atividade extrativa pelos órgãos de fiscalização ambiental, tem resultado na exploração de areia em locais cada vez mais distantes dos grandes centros urbanos, o que onera o preço final da areia natural, visto que a distância entre produtor e consumidor tem sido em média 100 km. A vantagem da areia artificial é que a sua produção pode ser realizada no canteiro das pedreiras localizadas próximas aos grandes centros urbanos, o que reduziria o custo da matéria-prima para a indústria da construção civil.

Além disso, reiterando os conceitos já apresentados, como o agregado custa menos que o cimento, quanto mais agregado e menos cimento se usar no concreto, mais econômico este será. Na produção de areia artificial existe o custo de lavagem da areia para retirada do material fino. Será possível, assim, diminuir o custo de produção da areia, caso não seja necessária a realização desta etapa de lavagem. Este fato será viável a partir do momento que este material fino puder estar presente na areia para ser usada na produção de concretos ou argamassas, sem qualquer restrição (NEVILLE, 1997).

### **1.4.3. Justificativa tecnológica**

Almeida (2005) salienta a importância da utilização de areia artificial, já que ela apresenta maiores vantagens em relação à areia natural por ser mais uniforme, facilitando sua utilização, também contribui com o empacotamento e a granulometria. É importante salientar a melhoria das características de qualidade constante da areia de britagem, na maioria dos casos, tanto em relação à sua granulometria quanto à ausência de impurezas, quando comparada à areia natural. Essa é uma das características mais relevantes que podem tornar a areia artificial um produto de boa aceitação no mercado, principalmente nas concreteiras.

É interessante notar que embora existam inúmeros trabalhos a respeito de durabilidade, são poucos os que geram parâmetros para avaliação da durabilidade, relacionando dados de carbonatação, migração de íons cloreto, permeabilidade, resistividade elétrica e resistência à compressão.

### **1.4.4. Sustentabilidade na produção do concreto**

É indiscutível a importância da cadeia produtiva do concreto para o desenvolvimento econômico, social e ambiental de nosso país, por meio da elevada geração de empregos, renda, impostos, viabilização de moradias, infraestrutura, estradas e tudo que dela advém. Porém é a grande consumidora de recursos naturais e energéticos, além de geradora de resíduos. Essas realidades, cada vez mais, têm impulsionado para uma tomada de consciência no sentido de adotarmos práticas e processos produtivos que visam a sustentabilidade (FIEMG, 2009).

A sustentabilidade do segmento implica em sistemas construtivos que promovam integração com o meio ambiente, adaptando-os para as necessidades de uso, produção e consumo humano, sem esgotar os recursos naturais, preservando-os para as gerações futuras; além da adoção de soluções que propiciem edificações econômicas e bem-estar social (FIEMG, 2009).

Nos últimos anos, as mudanças climáticas têm sido constantemente enfatizadas pelos diferentes canais da sociedade civil, causando preocupação aos governos, à população e aos cientistas de todo mundo. Essas alterações do clima podem estar

relacionadas ao aumento de concentração de gases de efeito estufa (GEEs), responsáveis pelo aquecimento da temperatura da terra. Os GEEs são compostos principalmente pelo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorcarbonos (PFC) e hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) (SANQUETTA, et. al. 2013).

Através do MCT: Estimativa anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil (2014), é possível verificar as principais emissões decorrentes da construção civil relacionadas ao processo industrial QUADRO 1.

QUADRO 1 – EMISSÕES DE GEEs DECORRENTES DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

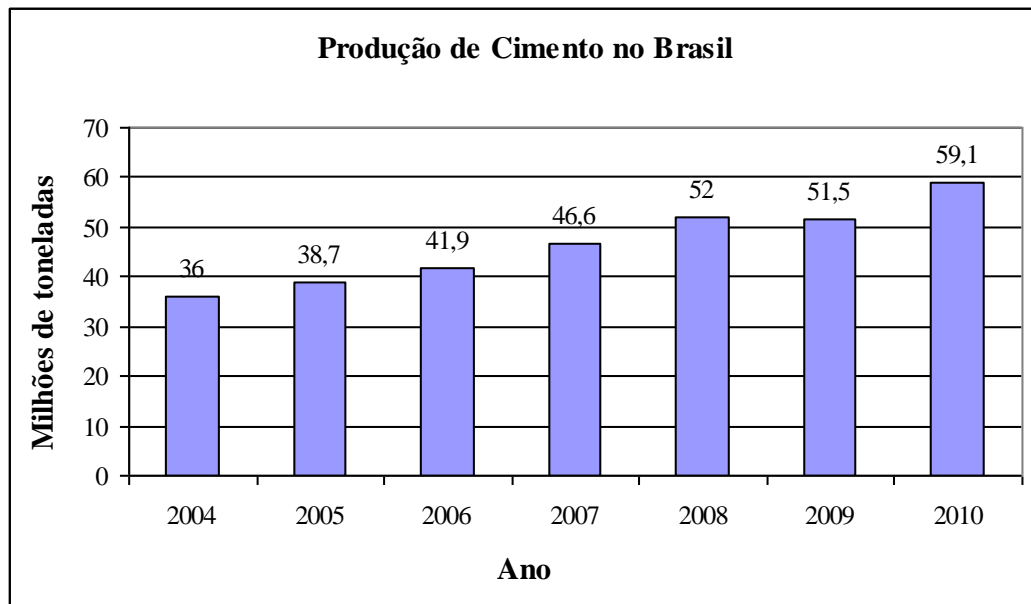
PROCESSOS INDUSTRIAIS (t/CO <sub>2</sub> e)	1990	1995	2000	2005	2011	2012	VARIÇÃO	
							1995-2005	2005-2012
Produção de cimento	11.062.000	11.528.000	16.047.000	14.349.000	22.493.000	25.309.000	24,50%	76,40%
Produção de cal	3.688.000	4.104.000	5.008.000	5.356.000	6.337.000	6.403.000	30,50%	19,50%
Produção de ferro-gusa e aço	24.756.000	30.686.000	35.437.000	38.283.000	40.590.000	36.655.000	24,80%	-4,30%
Produção de alumínio	3.781.000	4.197.000	3.176.000	3.373.000	3.115.000	3.126.000	-19,60%	-7,30%

FONTE: MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (2014).

Segundo a ABCP (2010), o cimento brasileiro é um dos mais ecoeficientes do mundo, em função do emprego de resíduos de outras indústrias, seja como combustíveis alternativos, seja como adições para conferir propriedades especiais ao insumo. Uma vez empregado na elaboração de produtos e sistemas construtivos recicláveis, sua contribuição para a sustentabilidade da construção civil é ampliada. Outra característica que contribui para a obtenção de empreendimentos mais sustentáveis é a durabilidade. Um produto durável auxilia o meio ambiente na conservação dos recursos naturais, além de reduzir os resíduos e o impacto ambiental causado pela restauração ou pela construção.

Através do QUADRO 2 verifica-se a produção do cimento do Brasil, sendo esse setor da indústria o responsável por aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e por aproximadamente 5% das emissões de CO<sub>2</sub>. Destes, 50% referem-se ao processo produtivo, 5% ao transporte, 5% ao uso da eletricidade e outros 40% ao processo de clinquerização (MAURY & BLUMENSCHIN, 2012).

QUADRO 2 - PRODUÇÃO DO CIMENTO NO BRASIL



FONTE: SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC – ALTERADO POR: GOBBI (2013).

Em uma visão holística, as construções sustentáveis devem ser concebidas e planejadas a partir de várias premissas. Dentre elas, a escolha de materiais ambientalmente corretos, de origem certificada e com baixas emissões de CO<sub>2</sub>; o cumprimento das normas, principalmente de desempenho; que suprimam menores áreas de vegetação; que demandem menos energia e água em todas as fases – construção e uso - a conscientização sobre a utilização sustentável das matérias-primas e reciclagem dos materiais; e que possam ser amplamente reaproveitadas no fim do seu ciclo de vida. A construção sustentável deve prever também atendimento às normas de segurança e formalidade das contratações. Tudo isso culminará em benefícios ambientais, sociais e econômicos, que compõem a sustentabilidade no seu conceito mais amplo (FIEMG, 2009 e POGGIALI, 2009).

### 1.5. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O escopo da pesquisa restringe-se a comparação entre concretos com relação de a/a de 0,55 (30 MPa), 0,35 (50 MPa) e 0,28 (80 MPa), não se considerando as demais tecnologias do concreto, como concreto auto adensável, concreto compactado a rolo, concreto massa, entre outros. Bem como não se aterá ao estudo da granulometria da porção fina, nem na correção dos diferentes pesos específicos do cimento e da rocha

geradora do agregado. A influência da substituição total da areia natural por artificial com diferentes teores de pó de pedra no concreto será analisada em termos de durabilidade. Apesar das duas pesquisas possuírem abordagens diferentes, a utilização dos resultados permite a validação externa das misturas executadas e diminui consideravelmente o tempo de execução das dosagens, permitindo foco nos ensaios de permeabilidade.

A pesquisa é restrita também quanto aos agregados, estes provenientes da região metropolitana de Curitiba – PR. Foram utilizados agregados de origem calcária e pó de pedra originários de fornecedor comercial de concreto dosado em central.

Quanto ao aditivo, é utilizado um único aditivo plastificante na produção de todos os concretos convencionais e um superplastificante para produção dos concretos de alta-resistência.

#### 1.6. CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA

Este projeto de pesquisa insere-se no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, área de concentração de Materiais e Estruturas, linha de pesquisa de durabilidade e concretos especiais. O tema é utilização de areia artificial com teores de pó de pedra para produção de concretos.

Abaixo estão relacionadas algumas dissertações apresentadas neste programa que tem como interesse a tecnologia dos concretos, desde o período que esta dissertação começou a ser formulada:

- Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental (CAMPOS, H. F., 2015);
- Efeitos da adição de materiais pulverulentos provenientes de britagem de rochas na resistência à abrasão de concretos convencionais (HOFFMANN, L., 2015);

- Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: Efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos (RAISDORFER, J. W., 2015);
- Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial (REAL, L. V., 2015);
- Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos pós reativos (SOARES, T. C. C., 2015);

Além das pesquisas citadas, neste mesmo programa de pós-graduação, há outras pesquisas relacionadas. Em desenvolvimento há o tema de Polucha (2016) está estudando a influência da areia artificial e pó de pedra na confecção de concreto auto adensável, em desenvolvimento.

#### 1.7. ESTRATÉGIA DA PESQUISA

Para cumprimento dos objetivos propostos nesta pesquisa, pretende-se realizar uma pesquisa de natureza aplicada, visando conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos, que neste caso, se trata de verificar a viabilidade da utilização de areia artificial com teores de pó de pedra para produção de concretos atendendo critérios de durabilidade.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, a é considerada quantitativa, pois se considera que tudo pode ser quantificável, ou seja, requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas. Quanto aos objetivos, é considerada explicativa, visando identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, aprofundando o conhecimento da realidade porque explica a razão e o “porquê” das coisas. Requer o uso do método observacional.

QUADRO 3 - CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA



FONTE: A AUTORA (2014)

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, essa pesquisa pode ser considerada como experimental, pois ao se determinar o objeto de estudo, são selecionadas as variáveis que sejam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto, conforme QUADRO 3, acima.

### 1.8. UNIDADE DE ANÁLISE

A unidade de análise deste trabalho serão corpos de prova fabricados com areia artificial e com teores de pó controlados.

Trabalhou-se com concretos com resistência à compressão na faixa de 30 MPa, 50 MPa e 80 MPa, sendo este trabalho uma continuidade das pesquisas desenvolvidas neste mesmo programa de pós-graduação, são elas: Hoffmann, 2015 (estudou concretos convencionais) e Campos, 2015 (estudou concretos de alta-resistência), cujas dosagens orientaram os traços e concretos desta pesquisa.

Em um primeiro momento, foi realizada a caracterização dos materiais envolvidos (pedra, areia e cimento), para posterior moldagem dos corpos de prova.

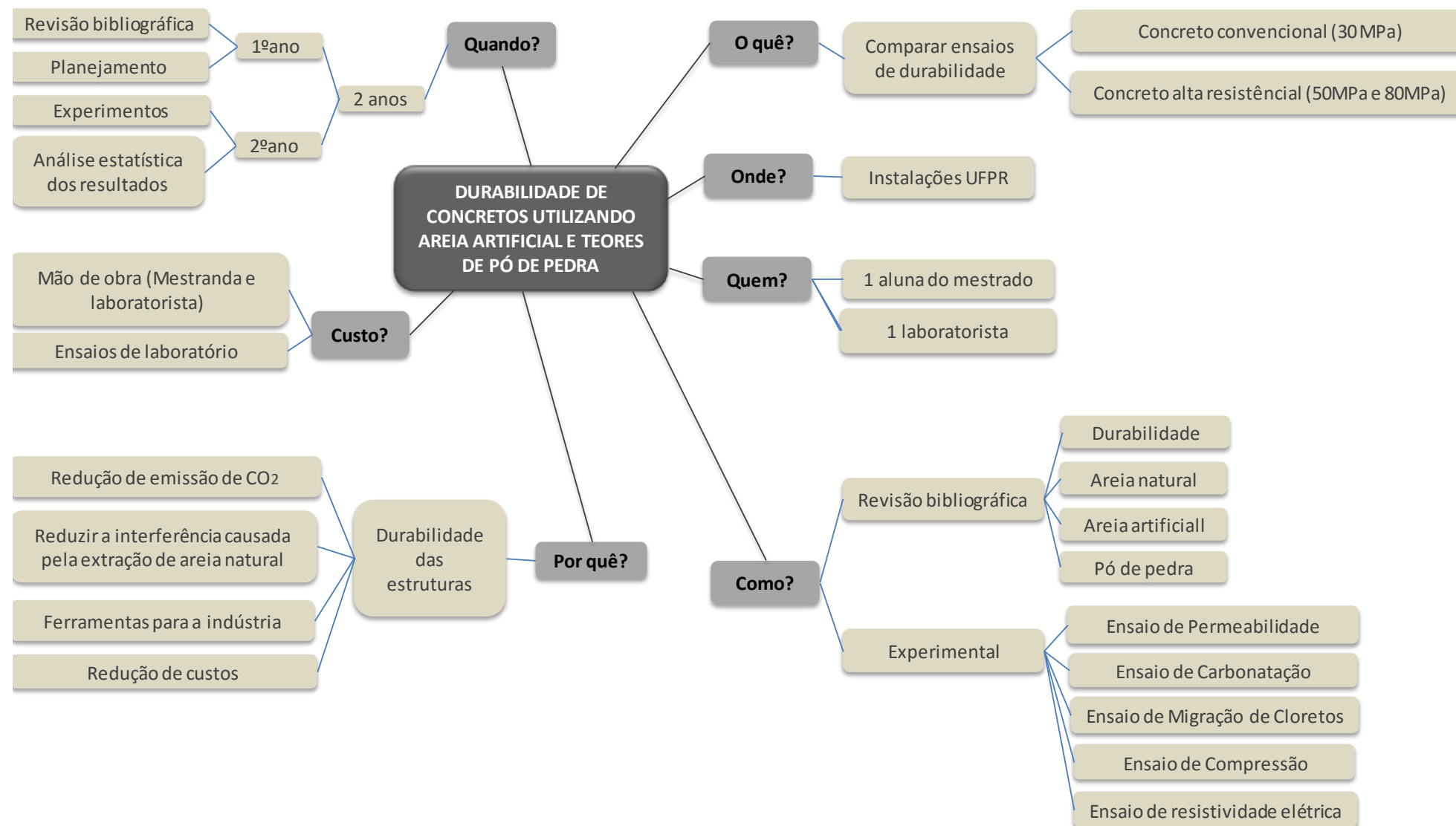
Com base nos dados e traço padrão, os ensaios foram realizados com diferentes teores de pó de pedra, caracterizados pelas frações finas produzidas através da britagem de rocha, passante na peneira # nº 200 (0,075 mm), de modo a verificar a viabilidade de substituir cimento e areia artificial por pó de pedra.

O programa de ensaios, quanto à durabilidade, abrange: ensaio de carbonatação, migração de íons cloreto, permeabilidade, resistividade elétrica e resistência à compressão. Paralelamente, a pesquisa bibliográfica que visa fundamentar os estudos teoricamente, e ao mesmo tempo, manter a pesquisa atualizada.

Para melhor compreensão das variáveis que interferem a unidade de análise desta pesquisa, a FIGURA 1 apresenta um mapa mental desta dissertação.



FIGURA 1 – MAPA MENTAL – UNIDADE DE ANÁLISE



FONTE: A AUTORA (2016).

## 1.9. ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação é dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, indicando o problema, os objetivos, as hipóteses, justificativas da pesquisa, a questão da sustentabilidade para embasamento do tema, as limitações da pesquisa, contextualização no programa, a estratégia da pesquisa e sua unidade de análise.

No Capítulo 2 e 3 são apresentadas as revisões bibliográficas dos principais assuntos expostos na dissertação: a durabilidade e a influência da utilização de finos, em especial do pó de pedra, no concreto.

O estudo experimental desenvolvido, com os materiais e métodos utilizados é exposto no Capítulo 4. No Capítulo 5, efetua-se a análise dos resultados obtidos e conclui-se a pesquisa com as considerações finais apresentadas no Capítulo 6.

## 2. DURABILIDADE

Os conceitos de durabilidade e vida útil são essenciais para definição das especificações técnicas necessárias à obtenção de estruturas de concreto.

Como discutido anteriormente, a durabilidade é um dos itens importantes quando se procura soluções mais sustentáveis de concreto, e poucos são os ensaios que a medem diretamente.

### 2.1. HISTÓRICO

A humanidade empregava materiais naturais para edificar cidades, em diversas culturas e épocas, segundo Herrmann (1992), ela sempre dependeu dos recursos minerais para sua sobrevivência. Inicialmente as pedras eram empregadas mantendo as características naturais, em formas de seixos rolados e lascas encontradas no meio ambiente, posteriormente com as inovações tecnológicas e escassez de materiais, grande parte dessas técnicas foram incrementadas, dando origem a novas alternativas, o concreto.

Vital para o desenvolvimento da sociedade foi e ainda é, explorar este material com características complexas. O concreto é basicamente o resultado da mistura de agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e água, a partir disso, são empregados componentes que modificam sua estrutura, de modo a torna-lo um material de excelente desempenho, sob os mais diversos ambientes de exposição.

Com o incremento do uso do concreto, sua aplicação em larga escala logo colocou em evidência o seu verdadeiro papel e deu aos agregados a real importância técnica, econômica e social.

Na indústria da construção, um meio de reduzir os danos ao meio ambiente é a obtenção de uma estrutura mais durável, que necessitará de menos recursos de manutenção e de intervenções ao longo do tempo (PEREIRA, 2010).

## 2.2. DEFINIÇÃO DE DURABILIDADE

Uma das maiores preocupações que existe hoje em dia é em relação ao desempenho do concreto, que está diretamente ligada à durabilidade. Com o emprego do concreto em larga escala, a importância dos agregados foi colocada em evidência, de acordo com Buest Neto (2006) a qualidade dos agregados está diretamente ligada à qualidade do concreto.

Desta forma, em função do crescente aumento da demanda de areia natural no mercado nacional e a exaustão dessas reservas, considerando os crescentes impactos decorrentes da exploração para obtenção de agregado miúdo natural (areia), que é responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água, aumento de vazão de água e acelerado processo de erosão das margens, tornando o solo estéril, sem crescimento de vegetação e sem possibilidade de recomposição do ambiente explorado, e por vários outros consideráveis prejuízos ao meio ambiente. Os Órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), vêm coibindo esta extração. Dentro desse contexto, os mineradores são forçados a extrair esses agregados em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, o que aumenta o preço final do produto (BUEST NETO, 2006; BARBOSA, COURA & MENDES, 2008).

Com isso, o meio técnico e científico, busca alternativas que visam a substituição total do agregado miúdo natural, fazendo frente a essa escassez crescente de oferta e do decorrente aumento do preço de mercado, de modo que venham atender à redução de custos, à agilidade de execução, à durabilidade e à melhoria das propriedades do produto final, visando, principalmente, à redução da extração de materiais naturais (BARBOSA, COURA & MENDES, 2008).

Deste modo, a alternativa a ser estudada é substituir o agregado natural por areia artificial e parte do cimento por material pulverulento, proveniente da britagem de rochas para a confecção da brita, material este denominado pó de pedra. De acordo com Buest Neto (2006), a utilização desses rejeitos traz benefícios para o meio ambiente e maior lucratividade para as empresas produtoras uma vez que o material retirado das jazidas passa a ser mais bem aproveitado, reduzindo as perdas do processo e fornecendo alternativa para o mercado.

Um fator limitador ao emprego disseminado da areia de britagem (areia artificial) pode ser a quantidade de finos, o que justifica seu uso ainda reduzido em diversas regiões do Brasil. A ABNT NBR 7211 (2005) admite o seu uso, visto que define agregado miúdo como “areia natural quartzosa ou areia artificial resultante da britagem de rochas estáveis, de diâmetro máximo igual ou inferior a 4,75mm”.

De acordo com Bastos (2005) a areia artificial de origem basáltica é constituída por grãos angulosos, com textura superficial mais áspera e com maior teor de finos, o que favorece a obtenção de concretos menos trabalháveis, que exigem uma maior demanda de água. Segundo o mesmo autor, este problema pode ser amenizado consideravelmente com o controle da porcentagem dos elementos finos da areia artificial britada, o pó de pedra.

A utilização do pó de pedra como agregado miúdo no concreto, quer por motivos econômicos, quer por aspectos relacionados à durabilidade, vem sendo analisada e tem gerado grande interesse, não só pelos aspectos ambientais, mas também pelos aspectos econômicos, uma vez que as pedreiras poderão comercializar um produto oriundo de rejeito que não tinha valor algum, que causava transtornos no que diz respeito à estocagem e ao meio ambiente, e que passou a ser um produto com um valor final mais acessível (MENOSSI, 2004).

Para Medeiros, Andrade e Helene (2011), durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Portanto é uma propriedade inerente ou intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto. Uma estrutura pode ter diferentes comportamentos, ou seja, diferente função de durabilidade no tempo, segundo suas diversas partes, até depende da forma de utilizá-la.

Para o ACI Comitê 201/1991, a durabilidade é definida como a capacidade de resistência à ação de intempéries, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. É função de vários parâmetros, como as características das diversas etapas construtivas (projetos, especificações, materiais, manutenção), da agressividade do meio ambiente em que a estrutura está inserida, da forma de utilização da estrutura e do tempo, ou seja, da vida útil requerida (MEHTA, 1999).

A durabilidade das estruturas de concreto é um tema atual e complexo, onde uma gama enorme de variáveis afetará a vida útil da construção. Dentre estas variáveis podemos citar a fase de projeto, a concepção dos materiais e dos processos construtivos e a utilização e manutenção da construção finalizada (POGGIALI, 2009).

Deve-se entender que a concepção de uma construção durável implica a adoção de um conjunto de decisões e procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que as compõem um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção. Em termos de durabilidade das estruturas de concreto, e para além das questões ligadas à resistência mecânica propriamente dita, a palavra-chave relacionada ao material concreto é água. Assim, será a quantidade de água no concreto e a sua relação com a quantidade de material aglomerante, o elemento básico que irá reger as características como: densidade, compacidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e fissuração, além de sua resistência mecânica. Em resumo, estes são os indicadores de qualidade do material, passo primeiro para classificação de uma estrutura como durável ou não (SOUZA e RIPPER, 1998).

### 2.3. AGENTES DE DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

Segundo Neville (1997), é essencial que as estruturas de concreto consigam desempenhar as funções que lhe foram atribuídas, que mantenha a resistência e a utilidade que foram projetadas, durante o período de vida previsto. O concreto deve suportar o processo de deterioração, ao qual venha a ser submetido. A durabilidade é limitada por agentes externos quanto por fatores inerentes ao próprio concreto.

Segundo Aitcin (2000), o ambiente possui uma série de agentes agressivos, sendo classificados em duas grandes categorias: os agentes externos e os agentes internos. Dentre os agentes externos, podem ser citados: os íons cloreto, o dióxido de carbono, os sulfatos, os ciclos de congelamento e degelo, fungos, bactérias e os abrasivos. Dentre os agentes internos podem ser citados: os íons cloretos incorporados, quando são usados aceleradores, e os álcalis cimento, quando são usados agregados potencialmente reativos.

Mehta e Monteiro (2014), apresentam outro ponto de vista, a classificação da deterioração do concreto dividida em causas físicas (desgaste superficial; erosão; cavitação; fissuração, devido a gradientes de temperaturas e umidade; pressões de cristalização de sais nos poros; carregamento estrutural; exposição a extremos de temperatura), e causas químicas (hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura; trocas iônicas entre fluidos agressivos e pasta de cimento; reações

causadoras de produtos expansíveis, tais como na expansão de sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão da armadura de concreto).

Para Poggiali (2009), quando estes agentes são desconhecidos ou desconsiderados por parte dos engenheiros projetistas ou construtores, o resultado são obras que não atendem ao requisito mínimo de durabilidade, qualidade e vida útil. Estes fatores, associados à ausência de manutenção, possuem como consequência principal um alto custo com a recuperação da estrutura.

Os mesmos autores apresentam os mecanismos mais importantes e frequentes de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto, segundo ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 12655:2006.

- Mecanismos relativos ao concreto: lixiviação (águas puras e ácidas); expansão (sulfatos, magnésio, reação álcali-agregado, reações deletérias (eflorescências).
- Mecanismos relativos à armadura: corrosão devida à carbonatação; corrosão por elevado teor de íon cloreto);
- Mecanismos relativos à deterioração da estrutura: ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta, relaxação, entre outros.

A Norma NBR 6118:2014 ainda define requisitos mínimos que o concreto necessita para garantir uma boa durabilidade, referentes à relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto.

As medidas necessárias para estimar a vida útil das estruturas são escolhidas levando-se em consideração as características dos materiais, as condições de exposição e os modelos de deterioração. Porém a determinação da durabilidade e da vida útil das estruturas é extremamente difícil de ser realizada devido ao sinergismo existente entre os diversos fatores que regem as várias formas de degradação (PEREIRA, 2001).

Segundo Helene (1997), a durabilidade do concreto depende muito da facilidade com que as substâncias agressivas podem ingressar e se deslocar no seu interior, sendo fortemente influenciada pela penetração da água que, além de dissolver compostos presentes na pasta endurecida, pode ter sua fase hidratada atacada por agentes agressivos presentes na água.

Dentre as causas principais de deterioração das estruturas de concreto armado, afetando diretamente a sua vida útil, está a corrosão das armaduras, sendo possível

ocorrer de forma generalizada por carbonatação da camada de revestimento ou pontual, devido ao ataque de cloretos. Para Helene (1986), a corrosão é uma interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica.

É evidente que a deterioração do concreto está geralmente associada a mais de um fenômeno, diante disto, os principais ensaios a serem realizados, considerados como balizadores do potencial de durabilidade do material, são:

- Carbonatação;
- Migração de íons cloreto.
- Permeabilidade;
- Resistividade.

## 2.4. PARÂMETROS DE DURABILIDADE

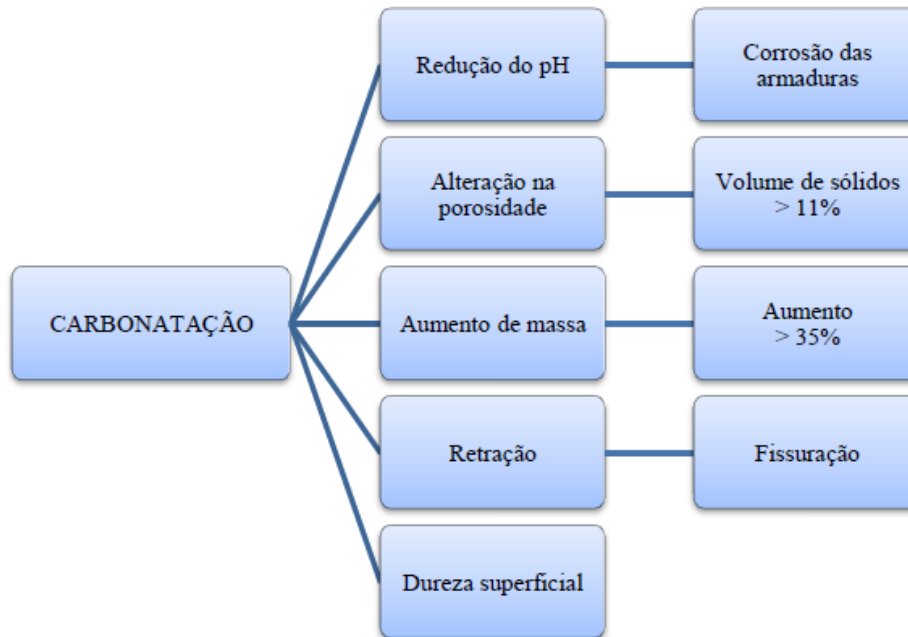
### 2.4.1. Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno físico-químico onde, a partir da reação de gases ácidos, presentes no ambiente, com os produtos alcalinos do concreto, provenientes da hidratação do cimento, ocorre a formação de produtos com pH de precipitação inferior a 9. Os principais gases ácidos que levam à carbonatação e que podem ser encontrados no ar atmosférico, principalmente em ambientes urbanos, são o gás sulfídrico ( $H_2S$ ), o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e o gás carbônico ( $CO_2$ ), este último encontrado comumente no meio ambiente, em maior ou menor concentração (Kulakowski, 2002).

De acordo com Perim (2013), a carbonatação provoca uma série de alterações na estrutura interna (microestrutura) dos materiais cimentícios, e essas mudanças trazem consequências, sendo que, as mais relevantes são apresentadas na FIGURA 2.



FIGURA 2 – CONSEQUENCIAS MAIS RELEVANTES DA CARBONATAÇÃO NO CONCRETO



FONTE: PERIM (2013)

A determinação da profundidade de carbonatação é realizada por meio de um indicador químico de pH, sendo o método mais utilizado o da fenolftaleína, devido a sua praticidade e baixo custo.

De acordo com Cascudo e Carasek (2011), uma característica do processo de carbonatação é a existência de uma frente de avanço do processo, que separa duas zonas de pH muito diferentes, uma carbonatada com pH em torno de 9 ou menor e a outra não carbonatada com pH maior que 12, conhecida como frente de carbonatação.

Como a carbonatação é um processo bastante lento, a maioria das pesquisas sobre o assunto utiliza o ensaio de carbonatação acelerada, para avaliar suas consequências. O procedimento de ensaio consiste em submeter as amostras à um ambiente com controle de temperatura, umidade relativa e a uma concentração de CO<sub>2</sub> maior que a encontrada na atmosfera, geralmente dada pela quantidade em volume de gás introduzida na câmara de carbonatação (PAULETTI, 2004). Para promover este ambiente controlado, foi utilizada a câmara de carbonatação conforme figura FIGURA 3:

FIGURA 3 - CAMARA DE CARBONATAÇÃO PARA ENSAIO ACELERADO



FONTE: A AUTORA (2016)

O método acelerado de carbonatação com o objetivo de avaliar a influência do tipo de cimento, das adições minerais (pozolanas), da relação água/cimento, tempo e tipo de cura na resistência à penetração de  $\text{CO}_2$  em concretos, argamassas e pasta de cimento, porém este ensaio não é padronizado, ficando cada autor livre para adotar os parâmetros que melhor se adaptam às suas condições. Pode-se observar que os experimentos são conduzidos sob diversas condições de temperatura, umidade relativa e concentração de  $\text{CO}_2$  do ambiente de teste, e distintos tempos de exposição, bem como empregando ou não a etapa de sazonalidade.

Segundo Pauletti (2004), as diferentes formas de sazonalidade influenciam na carbonatação, pois é nessa etapa que serão desenvolvidas propriedades que interferem nos resultados dos ensaios, como o teor de umidade do corpo de prova, e a porosidade do corpo de prova, que irão interferir na velocidade de penetração da frente de carbonatação. Desta forma, o QUADRO 4 apresenta uma tabela onde

resume o tempo de exposição e concentração de CO<sub>2</sub> para a condução de ensaios acelerados apresentados por diversos autores, contendo tipo das formas das amostras, relação a/a, tipo e período de cura, sazonalidade, umidade relativa, temperatura.

QUADRO 4 - PESQUISAS RELACIONANDO PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

Pesq.	Ano	Amostras forma/dim (mm)	a/agl	Tipo cura Tempo cura (dias)	Saz. Tempo /Local	UR (%)	T (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	Tempo de exposição (dias)
Tuutti	1982	-	0,40 e 0,70	submersa 7	6 meses laboratório	80	-	1	90
Ho e Lewis	1987	prismas 75x75x300	-	úmida 1,7,28,91 e 365	21 dias laboratório	50	23	4	7,28,63 e 112
Fattuhi	1988	prismas 50x50x285	-	submersa/ao ar 28	nota	entre 50 e 70	entre 20 e 26	100	-
Dhir et al.	1989	cubos 100	-	úmida/ao ar 28	14 dias laboratório	50	20	4	140
Ohga e Nagataki	1989	prismas 100x100x300	-	submersa 7, 28 e 91	nota	50	40	7	a cada 7 dias
Papadakis et al.	1991b	prismas 100x100x300	0,50 a 0,80	úmida 90	estufa	-	-	50	1, 3, 5, 10, 15 e 20
Branca et al.	1993	cubos 100	0,35 a 0,65	úmida 7	-	75	20	30	-
Nepomuceno <sup>18</sup>	1992	prismas 20x55x80	-	úmida/ ao ar 1, 7 e 28	70 dias laboratório	entre 50 e 70	20	100	variável
Isaia	1995	cilindros 100x100	0,30 a 0,50	úmida 7	28 dias laboratório	-	-	10	28,56,84 e 112
Balayssac et al.	1995	cilindros 110x100	-	submersa/ao ar 1, 3 e 28	-	60	20	0,03	-
Roy et al.	1999	prismas 100x100x500	0,55 a 0,75	submersa 7	nota	52, 64, 75, 84 e 92	-	6	7,28,56 e 112
Vagheti	1999	cilindros 100x100	0,35 a 0,55	úmida 7	21 e 84 laboratório	entre 50 e 80	23	10	28, 56, 84 e 112
Lopes	1999	cilindros 100x200	0,38 a 0,48	úmida 7 e 28	22 e 43 laboratório	55	27	100	7, 14, 21, 28 e 35
Alves	2000	cilindro 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	21 dias laboratório	80	24	5	28, 56 e 84
Jiang et al.	2000	prismas 100x100x200	-	-	nota	70	20	20	-
Cunha e Helene	2001	prismas 279x152x114	0,35 a 0,65	úmida 28	15 dias laboratório	65	23,5	100	2h/2h (a/c=0,35) 4h/4h(a/c=0,65)
Sanjuán e Olmo	2001	cilindros 75x150	-	submersa 28	-	70	-	5,20 e 100	-
Venquiaruto	2002	cilindros 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	35 dias laboratório/ estufa RILEM	75	23	5	28, 56 e 84
Kulakowski	2002	prismas 100x100x300	0,30 a 80	úmida amostras embaladas 14	14 dias câmara sazonal.	70	25	5	35, 56, 91 e 126
Lo e Lee	2002	cilindros 100x200	0,38 a 0,54	submersa/ao ar 28	-	-	21	2	30, 60 e 90

## Conclusão

Pesq.	Ano	Amostras forma/dim (mm)	a/agl	Tipo cura Tempo cura (dias)	Saz. Tempo /Local	UR (%)	T (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	Tempo de exposição (dias)
Coelho et al.	2002	cilindros 100x200	-	úmida 28	35 dias laboratório	entre 60 e 70	26	100	77 e 91
Kirchheim	2003	prismas 60x60x180	0,40 a 0,60	úmida 28	até constância câmara sazón.	70	25	100	
Abreu	2004	prismas 100x100x60	0,44 a 0,65	úmida 28	32 dias câmara sazón.	70	25	5 e < 50	63 e 195
Meyer	1969	prismas 40x40x160	0,40 a 0,80	submersa 7	-	50	18	-	-
Ying - Yu e Qui - Dong	1987	prismas 80x40x160	-	submersa 2 dia e ao vapor 22h	24 horas estufa a 60°C	52	20	20	-
Andrade	1988	-	0,5	úmida 28	-	entre 50 e 70	20	100	-
Wolf e Dal Molin	1989	cilindros 50x100	-	submersa 7	-	30, 50, 70 e 90	-	-	-
Kobayashi e Uno	1989	cilindros 50x100	0,40 a 0,60	úmida 28	-	60	20	10	-
Wolf	1991	cilindros 50x100	0,28 a 0,58	úmida 28	nota	-	-	-	28, 63, 91, 150 e 180
Kazmierczack	1995	prismas 55x80x20	-	submersa 7	câmara saz	-	-	100	-
John	1995	prismas 40x40x160	-	-	-	-	21,5	5	-
Bauer	1995	cilindros 50x100	0,30 a 0,70	úmida 63	15 dias estufa á 50°C, depois lab. Cte massa	entre 65 e 70	-	50	inicial 2 dias, depois variável
Monteiro	1996	prisma 60x80x25	0,40 a 0,70	úmida 7 e 28	15 dias laboratório	entre 50 e 70	24	100	variável
Seidler	1999	prismas 40x40x160	0,40 a 0,70	úmida 28	7 dias câmara saz.	68	21	5	56, 91 e 126
Papadakis	2000	cilindros 60x90	-	submersa 365	28 laboratório	61	25	3	100
Johannesson e Utgenannt	2001	cilindros ø3	-	-	-	65	20	1	120
Kulakowski	2002	prismas 40x40x160	0,30 a 0,80	úmida amostras embaladas 14	14 dias câmara sazón. 19	70	25	5	35, 56, 91 e 126
Van Gerven et al.	2004	cubos 40	-	úmida 28	nota <sup>17</sup>	>90	37	5 e 20	72 e 360 horas
Gervais et al.	2004	cubos 40	-	-	-	23, 48 e 98	-	100	-

FONTE: PAULETTI (2004)

O QUADRO 5, demonstra em síntese possíveis resultados que podem ser atingidos com a realização deste ensaio.

QUADRO 5 - RESULTADOS DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

PH	Coloração	Situação
Próximo de 8,3	Incolor	Carbonatado
Acima de 10	Rosa	Não -carbonatado

FONTE: KULAKOWSKI (2002)

De acordo com Neville (1997) a carbonatação ou avanço da frente de carbonatação ocorre sob uma velocidade decrescente, desenvolvendo-se sob uma determinada taxa, que sofre a influencia de diversos fatores diretamente vinculados às condições de exposição e às características do concreto. Esses fatores são explicados por Kulakowski (2002):

1. Condição de exposição:

- Concentração de CO<sub>2</sub> – a penetração do gás é diretamente proporcional à diferença de concentração de CO<sub>2</sub> entre os dois meios. Quanto maior o gradiente de concentração entre o meio externo e o interior do concreto, ou entre a porção carbonatada e a não carbonatada, maior será a velocidade de penetração da frente de carbonatação. Segundo Helene (1993) a concentração de CO<sub>2</sub> no ar pode ser de 0,03 a 0,05% em atmosferas rurais, 0,10 a 1,2% em locais de tráfego pesado e em ambientes viciados a concentração pode chegar a 1,8%.
- Umidade relativa – umidade que determina o grau de saturação dos poros do concreto. A difusão de CO<sub>2</sub> em meio líquido é mais lenta do que em meio gasoso, na ordem de 10<sup>4</sup> vezes menor. Ou seja, em concretos saturados a penetração de CO<sub>2</sub> praticamente para. De acordo com Helene (1993), as maiores velocidades de carbonatação ocorrem em umidade relativa de 60 a 85%.
- Temperatura – de acordo com Loo et al. (1994) apud Kulakowski (2002), o estudo da carbonatação com temperaturas variando entre

20 e 40°C não se apresenta tão significativa para a profundidade de carbonatação quanto a concentração de CO<sub>2</sub>.

## 2. Composição química do cimento:

A composição química do cimento irá determinar a quantidade total de álcalis disponível para a reação de carbonatação, ou seja, a quantidade de NaOH, KOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado. De acordo com Helene (1993), quanto maior a concentração de hidróxido de cálcio na solução intersticial dos poros menor será a velocidade de penetração do CO<sub>2</sub>. Isto é, para frente de carbonatação avançar, primeiro é necessário que o CO<sub>2</sub> rebaixe o pH dos poros e reaja com todo o hidróxido de cálcio disponível para, então, continuar penetrando e precipitar o carbonato de cálcio.

## 3. Composição do concreto:

De acordo com Bakker (1988) apud Kulakowski (2002), a composição do concreto determina a qualidade potencial do material, isto é, a estrutura e tamanho dos poros e, conseqüentemente, as condições de acesso de agentes agressivos. Dentre os parâmetros considerados no proporcionamento do concreto, o efeito da relação água/cimento na profundidade de carbonatação é mais pronunciado quando comparado ao consumo de cimento.

## 4. Execução do concreto:

A qualidade de execução do concreto refere-se principalmente à compactação e à cura. A compactação deficiente pode gerar falhas, como ninhos de concretagem, excesso de ar aprisionado, alterações na porosidade, facilitando a penetração e a propagação da frente de carbonatação. A cura influencia diretamente na hidratação e formação da microestrutura do concreto. Quanto maior o grau de hidratação do cimento, maior será densificação da matriz e menor será a taxa de penetração de agentes agressivos.

## 5. Porosidade:

Os parâmetros que regem a difusão de CO<sub>2</sub> no concreto é a estrutura de poros da matriz, fator determinante para qualidade deste. Os poros do concreto podem ser classificados tanto em relação ao seu tamanho, quanto em relação a sua capacidade de impedir a percolação de fluídos, genericamente denominada permeabilidade. O tamanho dos poros pode variar de mm a dimensões inferiores ao nm, em ordem crescente, são classificados como poros de gel, poros capilares e macroporos. Em relação à permeabilidade são classificados como abertos ou fechados.

### 2.4.2. Migração de íons cloreto

A penetração de íons cloreto na estrutura do concreto pode provocar a despassivação da armadura e gerar a formação de pilhas eletroquímicas, deflagrando a corrosão da armadura (RODOLPHO, 1999).

De acordo com Neville (1997), o ingresso de cloretos é progressivo em concretos ora expostos à água do mar ora secos, pois o concreto seco vai sendo embebido por água do mar por absorção e, em certas condições, até a saturação. Se as condições externas passarem a mais secas, inverte-se o movimento da água e ela evapora pelas extremidades dos poros capilares abertas ao ar. No entanto, é a água pura que evapora, permanecendo os sais. Assim, aumenta a concentração salina na água nas proximidades da superfície do concreto. O gradiente de concentração que se origina faz com que o sal da região superficial se desloque para as partes de menor concentração. Como resultado deste processo, a concentração de cloretos decresce da superfície para o interior do concreto.

A penetração de íons cloreto é provavelmente o fenômenos mais devastador das estruturas construídas com concreto. Os cloretos podem estar presentes no concreto por terem sido incorporados na mistura por agregados contaminados, por água do mar salobra, ou por aditivos com cloretos, portanto, não deve ser permitido o uso de nenhum desses materiais no concreto armado, e as normas, geralmente estabelecem limites rigorosos para o teor de cloreto no concreto, qualquer que seja a origem (AITCIN, 2000; NEVILLE, 1997).

De acordo com a NBR 6118/2014 o teor máximo de cloretos em 500mg/l em relação à água de amassamento, isto é, na ordem de 0,02% em relação à massa de cimento, Kulakowski (2002) complementa, que o teor de cloretos permitido no concreto é aquele tomado como o necessário para despassivar o aço, porém o limite não está bem estabelecido, uma vez que verifica-se certa divergência em normas de diversos países.

Quando os íons cloreto penetram nas soluções intersticiais, podem reagir com o C<sub>3</sub>A para formar monocloroaluminatos ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), que permitem modificar favoravelmente a microestrutura do concreto, ou, de forma mais devastadora, podem atingir as armaduras, corroendo-as muito rapidamente (AÏTCIN, 2000).

A penetração de íons cloreto no concreto pode romper a película de passivação proporcionada pelo ambiente alcalino (pasta de cimento), assim como pode diminuir a resistividade do concreto, acelerando diretamente o processo corrosivo. O fenômeno da corrosão pode ser proveniente da existência de pilhas de corrosão eletroquímica ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa. Sabe-se também que a migração dos íons cloreto pode ser acelerada pela passagem de uma corrente elétrica, portanto, pode-se realizar o ensaio acelerado de migração de íons cloreto. (MAYS, 1992; GASPARIM 2007; GENTIL, 1996; RODOLPHO e ISA, 1999).

### **2.4.3. Permeabilidade**

A água está sempre envolvida no processo de deterioração do concreto, por meio da porosidade do material. Essa permeabilidade do material define o quanto ele pode se deteriorar. Quanto maior a permeabilidade do concreto, mais sujeito às ações da água e de meios agressivos ele estará, e mais rápido deteriorará (POGGIALI, 2009).

A permeabilidade caracteriza-se pela existência de um gradiente hidráulico, que força o deslocamento de um fluido no concreto pela penetração sob pressão. É dependente de fatores como: pressão exercida, geometria dos vazios, viscosidade do líquido, espessura do material, presença de ar nos poros e tempo (FORNASIER, 1995; FERREIRA, 1999).

A estrutura da pasta de cimento, o agregado e a zona de transição determinam a facilidade com que os fluidos, líquidos ou gases penetram e se deslocam no material,



sob os mais distintos gradientes de pressão. Assim sendo, é importante, cada vez mais, se utilizar concretos ditos impermeáveis e que proporcione maior estanqueidade às estruturas. Entretanto, para que isto seja possível é importante que a comunidade científica tenha em mãos metodologias de análise e avaliação da permeabilidade apresentada pelo concreto, de uma forma expedita, confiável e precisa, haja vista serem vários os fatores que influenciam a sua permeabilidade, tais como: o meio ambiente; a composição do concreto; o tipo de cimento; o tipo de forma e molde utilizado; o nível da energia de vibração; as condições de cura e a solicitação imposta às estruturas (estáticas e dinâmicas) (HELENE, 1997; WOLF, 1991).

Considera-se também que os agregados com uma porosidade maior em relação à matriz contribuem para um aumento na medida da permeabilidade de concretos, mas essa não é a principal contribuição. Quanto maior o tamanho efetivo dos grãos, maior será a interface entre a matriz e agregado, o que aumenta a influencia da zona de transição. Essa região é vulnerável a diversos tipos de movimentações, gerada por diferentes esforços, que geram microfissuras de tamanho maior que muitos poros capilares da pasta, as quais acabam por se propagar e aumentar o volume de vazios interconectáveis, e conseqüentemente valores de permeabilidade (SENTONE, 2011).

A durabilidade do concreto depende principalmente da porosidade, sendo função do tipo de aglomerante e relação água/cimento. Segundo Mehta e Monteiro (2014), os poros de ar incorporado possuem forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares. Podem ser decorrentes de uma má vibração do concreto ou terem sido intencionalmente incorporados. Devido a suas grandes dimensões, reduzem bastante a resistência do concreto e aumentam a permeabilidade, agindo diretamente na durabilidade do material. A boa qualidade do concreto depende, além do tipo de aglomerante e da relação água/cimento, da cura e do grau de hidratação, sendo esses os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar de água, de permeabilidade, de migração de íons e de difusividade de água e de gases, assim como as propriedades mecânicas, resistência à 28 compressão, à tração, módulo de elasticidade, abrasão, entre outros (HELENE, 1997).

#### 2.4.4. Resistividade

Segundo Cascudo (1997), a resistividade elétrica do concreto, juntamente com o acesso de oxigênio à armadura constituem os dois elementos principais controladores do processo eletroquímico que gera o fenômeno da corrosão de armaduras. Dessa forma, a velocidade de corrosão do aço no concreto é muito dependente da resistividade elétrica ou, por outro lado, da condutividade iônica do eletrólito (fase líquida do concreto).

Segundo Neville (1997), a resistividade elétrica é a propriedade elétrica que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, ou seja, controla o fluxo de íons que difundem no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros. Todos os fatores que influenciam a estrutura de poros, tais com relação a/c, tipo de cimento, adições minerais e grau de hidratação também afetam a resistividade elétrica do concreto. Esta, também, é altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto.

A resistividade elétrica do concreto está relacionada à porosidade e conectividade entre os poros do concreto saturado. Para Hoppe (2005) a diminuição da umidade implica em uma diminuição da quantidade de solução dos poros, ou seja, a diminuição do eletrólito responsável pela emissão da corrente elétrica que atravessa o concreto e, conseqüentemente, um aumento da resistividade elétrica do concreto.

A resistência do concreto regula o fluxo iônico entre as regiões anódica e catódica da armadura. Quanto maior a resistividade elétrica do concreto, menor a corrente elétrica circulante e menor a velocidade do processo corrosivo, desta forma, quanto maior a resistividade elétrica, maior a dificuldade dos íons em atravessar o concreto, inibindo a corrosão (GOWERS & MILLARD, 1999; SMITH et al., 2004). Uma vez destruída a camada passivadora serão a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio que controlarão a taxa de corrosão. Resistividades acima de 50.000 a 70.000  $\Omega \cdot \text{cm}$  são suficientes para inibir o processo corrosivo (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As medidas de resistividade elétrica além de serem relevantes devido a sua estreita relação com o fenômeno da corrosão, servem também pra indicar regiões de maior porosidade, passíveis de servir como porta de entrada para íons cloreto, desta maneira, a resistividade elétrica pode ser usada para caracterizar a conectividade dos

poros e dar uma idéia do teor de umidade do concreto. Sendo, deste modo, a resistividade um parâmetro de estimativa da durabilidade do concreto, principalmente sob o aspecto de impedir o transporte de íons (ABREU, 1998; CASTELLOTE et al., 2002).

A resistividade elétrica permite acompanhar o desempenho do concreto tanto no período de iniciação quanto no de propagação no modelo proposto por Tuutti (1982) para o desenvolvimento do processo corrosivo. No período de iniciação a resistividade permite estimar a facilidade de acesso dos íons cloreto e CO<sub>2</sub>. Já no período de propagação a resistividade fornece uma estimativa da velocidade do processo corrosivo. (CASTELLOTE et al., 2002).

O método empregado para verificação da resistividade elétrica aparente do concreto é o método dos quatro eletrodos ou método de Wenner através do aparelho *Resipode Proceq*. Segundo o manual fornecido pelo fabricante do aparelho, é aplicada uma corrente às duas sondas nas extremidades e a diferença de potencial é medida entre as duas sondas internas. A corrente é carregada por íons no líquido do poro da estrutura. A resistividade calculada depende do espaçamento destas sondas. É possível fazer a verificação através de:

$$\rho = k. 2. \pi. a. \frac{v}{i} \quad [k \ \Omega cm] \quad (2)$$

Onde:

$\rho$  = resistividade elétrica

$k$  = parâmetro de correção, função da distância entre os eletrodos e profundidade dos mesmos no concreto.

$a$  = distância entre eletrodos

$V$  = a diferença de potencial medida

$i$  = a corrente elétrica medida

O software ResipodLink permite que o usuário corrija a leitura exibida no próprio equipamento para o fator de forma do corpos de prova utilizado. Desta maneira, nosso equipamento já está trabalhando com valores corrigidos para corpos de prova 100mm x 200mm cilíndricos. Para verificar através do display se o fator de forma foi empregado ou não, é possível verificar que à direita do símbolo  $k \ \Omega$  estiver aceso um apóstrofe, conforme FIGURA 4:

FIGURA 4 – ENSAIO DE RESISTIVIDADE COM EQUIPAMENTO RESIPOD



FONTE: A AUTORA (2016).

As medições de resistividade podem ser utilizadas para estimar a probabilidade de corrosão. Quando a resistividade elétrica ( $\rho$ ) do concreto é baixa, a probabilidade de corrosão aumenta. Quando a resistividade elétrica é alta a probabilidade de corrosão diminui. Testes empíricos chegaram aos valores apresentados no QUADRO 6 do MANUAL PROCEQ que podem estimar a probabilidade de corrosão. Estes números são para cimento Portland comum a 20°C. Já no QUADRO 7 há indicação da taxa de corrosão com relação ao aço despassivado.

QUADRO 6 - ESTIMATIVA DA PROBABILIDADE DE CORROSÃO

<b>Resistividade elétrica (kΩcm)</b>	<b>Risco de corrosão</b>
≥ 100	Insignificante
50 a 100	Baixo
10 a 50	Moderado
≤ 10	Elevado

(FONTE: MANUAL PROCEQ).

QUADRO 7 - INDICAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO

<b>Resistividade elétrica (<math>k\Omega cm</math>)</b>	<b>Taxa de corrosão</b>
> 20	Baixa
10 a 20	Baixa a moderada
5 a 10	Alta
< 5	Muito alta

(FONTE: MANUAL PROCEQ).

Muitos estudos ao longo dos anos permitiram a coleta de um número elevado de dados empíricos da resistividade. Os dados apresentados foram extraídos do Manual da Proceq (Equipamento utilizado), sendo estes provenientes do “Test methods for on-site-measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendatios”.

### 3. CONCRETO COM FINOS

A forma mais eficaz para o setor da construção civil se tornar uma atividade sustentável, é a incorporação de resíduos de outras indústrias em seus produtos. O aproveitamento dos resíduos de forma produtiva é prática muito utilizada sob a filosofia da Produção mais Limpa (P+L) e existem diversos casos de sucesso de utilização de diferentes resíduos na composição do concreto. A incorporação desses é uma forma de reduzir a quantidade de resíduos a serem devolvidos para a natureza sem o devido tratamento, aumentando a pressão sobre ecossistemas e sobre a comunidade; diante disto, a incorporação de alguns rejeitos pode ainda contribuir para melhoria da qualidade do produto final, concreto (FIEMG, 2009)

A durabilidade do concreto foi correlacionada por muito tempo com a resistência, mas, devido ao progresso na tecnologia do cimento e do concreto, já no início do século passou a ser possível obter pequena permeabilidade mesmo com concreto com relativamente alta relação água/cimento (a/c) ou baixo consumo de clínquer. A porosidade resultante prejudica a durabilidade, pois a maior permeabilidade aos agentes agressivos é o principal fator desencadeante de agressões (AITCIN, 2000). Já em 2000, o autor afirmava que o concreto de alto desempenho do futuro conterà cada vez menos cimento Portland, cada vez mais materiais cimentícios suplementares ou mesmo adição de fíler. Esta substituição é vantajosa do ponto de vista econômico, reológico e de desenvolvimento de calor. O que se pode perder em termos de propriedades iniciais (24 horas) pode ser compensado pela redução adicional da relação água/aglomerante (a/agl). A redução de cimento e sua substituição por materiais cimentícios menos reativos podem resultar em consumo inferior de superplastificantes para a mesma trabalhabilidade, de forma que uma redução significativa no custo do metro cúbico de concreto de alto desempenho pode ser obtida.

A substituição de teores do cimento por finos na composição do concreto traz benefícios quanto à resistência e durabilidade, porém pode atrapalhar a trabalhabilidade. Por exemplo, Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), demonstraram que o emprego da cinza da casca de arroz tende a promover melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos. Por outro lado, a cinza pode comprometer a trabalhabilidade do concreto em razão da elevada superfície

específica de suas partículas e, em alguns casos, do alto teor de carbono remanescente após a queima da casca.

Muitas pesquisas têm mostrado que a utilização de agregados pulverizados não só não tem um efeito negativo sobre a qualidade do concreto, mas também pode melhorar suas performances se a quantidade ideal é usada (WANG, JIN, LIU, et. al. 2013). O concreto com teor de finos deve atender aos requisitos técnicos especificados. Estas condições é que estabelecem os limites da utilização dos finos, de forma a não causar prejuízos às propriedades do concreto. Assim, é necessário encontrar o teor ótimo de substituição.

A fase agregado é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. A massa específica do agregado graúdo influi diretamente na massa específica do concreto, sendo também diretamente proporcional à resistência do concreto, isto é, quanto maior a porosidade (índice de vazios) do agregado, menor será sua resistência tornando-se o elo fraco da mistura. Este material desempenha importante papel nas argamassas e concretos, quer sob o ponto de vista econômico, quer sob o ponto de vista técnico, exercendo influência benéfica sobre as propriedades do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1999)

### 3.1. GRANULOMETRIA E EMPACOTAMENTO

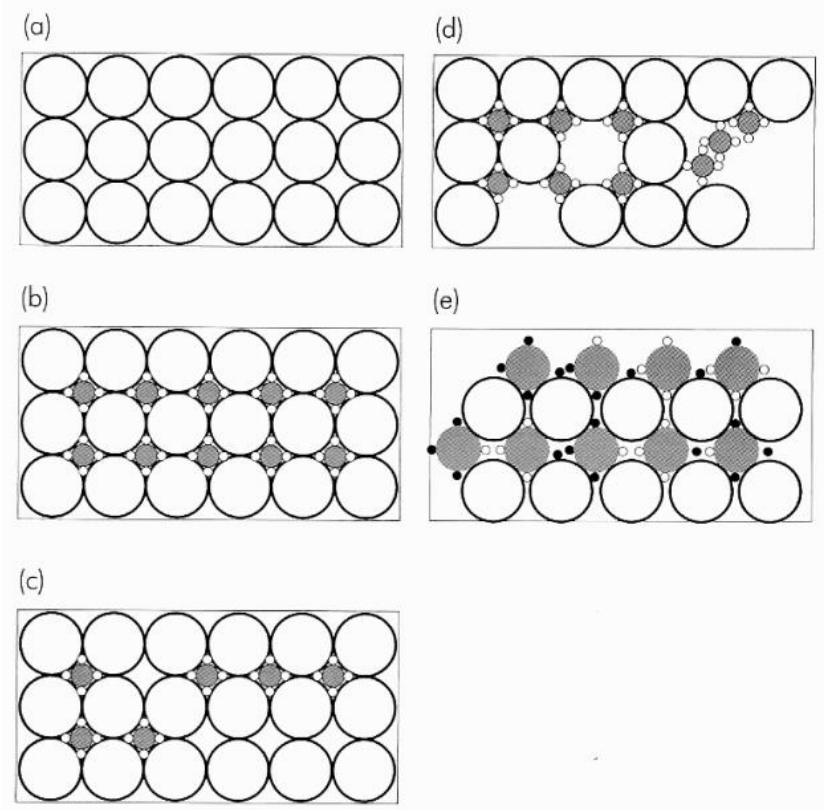
A distribuição das partículas de um agregado segundo as suas dimensões é designada por granulometria e tem influência sobre as propriedades do concreto, conforme salienta Neville (1997), o teor de partículas finas nas misturas de concreto pode influenciar consideravelmente a quantidade de água de amassamento necessária, o que pode provocar diminuição da resistência mecânica do concreto produzido.

Se a granulometria é contínua ou otimizada (partículas distribuídas uniformemente por todas as dimensões da menor à maior) e se as partículas têm uma forma adequada, é possível obter-se um elevado nível de empacotamento do esqueleto granular da mistura, o que leva a um concreto compacto e resistente para um teor mínimo de cimento, reduzindo paralelamente, o risco de segregação (SOARES, 2015).

O empacotamento, segundo Nelson e Guillot (2006), consiste nas partículas menores se encaixarem nos vazios das partículas médias, que por sua vez ocupam os vazios das partículas maiores. A otimização da compacidade na argamassa de cimento é realizada utilizando-se um material de maior granulometria e outro de menor granulometria em relação ao cimento, de acordo com a FIGURA 5.

Segundo Pandolfelli *et al* (2000), a morfologia é um fator que pode alterar a condição de empacotamento das partículas de uma mistura, pois quanto mais distante do formato esférico for a partícula, menor será o grau de empacotamento de uma distribuição e, a quantidade de superfícies irregulares de partículas, leva a uma fricção interparticular. Através do controle da distribuição granulométrica é possível otimizar a densidade de empacotamento em sistemas compostos por partículas não esféricas (BUEST, 2006).

FIGURA 5 – EFEITO DA QUANTIDADE E DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NA EFICIÊNCIA DO EMPACOTAMENTO: a) sistema monodisperso; b) máxima densidade de empacotamento teórico; c) deficiência de partículas pequenas; d) deficiência de partículas grandes; e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.



FONTE: PANDOLFELLI *et al*, (2000).



Campos (2015) fala sobre a influência do conteúdo de finos na trabalhabilidade varia de acordo com a quantidade de cimento. Em geral a influência da granulometria diminui com o aumento do teor de cimento, enquanto o aumento de finos pode afetar a coesão da mistura, podendo haver problemas de segregação.

O agregado de maior dimensão, embora tenha uma área de superfície de aderência menor, relativamente ao agregado miúdo em concretos com as mesmas quantidades restantes dos demais componentes, leva à formação de uma zona de transição muito menos resistente, sendo este efeito ainda mais evidente em concretos com baixa relação água/cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1999).

Também deve-se levar em conta a interação dos grãos, que pode levar a dois efeitos: efeito de parede e efeito de afastamento, como apresenta Formagini (2005), o efeito parede é exercido pelos grãos maiores sobre os grãos menores e também pelas fôrmas sobre os grãos. E o efeito de afastamento quando os grãos menores atuam sobre os grãos maiores. O empacotamento ideal da mistura é definido quando os grãos menores preenchem os vazios deixados pelos grãos maiores, ocupando-os por completo.

Sendo assim, o conhecimento não apenas das características dos agregados, mas também de como elas influenciam no comportamento e desempenho do concreto, é essencial para o desenvolvimento de concretos cada vez mais sustentáveis, econômicos e de alta qualidade (ROQUE e MORENO JUNIOR, 2005).

## 3.2. AGREGADOS

Agregados para Construção Civil são materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia civil, tais como, a pedra britada, o cascalho e as areias naturais ou obtidas por moagem de rocha, além das argilas e dos substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias, produtos industriais, entre outros (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2009).

### 3.2.1. Agregados naturais

A ABNT NBR 7211:2009 fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou

resultantes da britagem de rochas. Dessa forma, define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas consolidadas, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,150 mm. Define ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas consolidadas, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm.

A influência da fase agregado nas propriedades do concreto deve-se mais por características físicas do que características químicas de sua estrutura. A massa unitária, o módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional são as principais propriedades do concreto que dependem essencialmente da densidade e da resistência do tipo de agregado utilizado, além de sua porosidade, forma e textura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A distribuição granulométrica dos agregados tem efeito sobre a demanda de água no concreto, assim, influencia todas as propriedades relacionadas à quantidade de água (trabalhabilidade, densidade, segregação e acabamento). Em geral, é a área superficial do agregado que determina a quantidade de água necessária para molhar e lubrificar a mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Ainda segundo a NBR 7211:2009, as porcentagens admissíveis de material pulverulento presentes nas areias são de 3% para concretos submetidos a desgastes superficial e 5% para concretos protegidos de desgaste superficial, podendo expandir estes limites para 10 e 12%, respectivamente, desde que seja comprovado por análise petrográfica que os grãos constituintes não interferem nas propriedades do concreto.

Pela predominância na composição do concreto, os agregados têm papel fundamental na resistência, caso apresentem propriedades indesejáveis podem prejudicar a resistência deste e comprometer sua durabilidade e seu desempenho estrutural. Desta forma, as características mais importantes de um agregado são: a sua massa específica, textura, granulometria resistência à abrasão (NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A qualidade do concreto está vinculada a propriedades dos agregados. O agregado miúdo merece atenção especial, uma vez que sofrem com a escassez de reservas localizadas próximas aos grandes centros consumidores, fato que leva a busca de alternativas ao uso da areia natural.

### 3.2.2. Agregados artificiais

O aumento das restrições ambientais para a exploração de areia do leito dos rios levou a uma busca por materiais alternativos para a produção de agregados finos, especialmente perto das grandes áreas metropolitanas. Agregados pulverizados apareceram como uma alternativa atraente. O alto teor de finos é vantajoso em concreto para melhorar a coesão. Porém, uma quantidade excessiva tende a aumentar a demanda de água e tende a prejudicar a ligação pasta-agregado do cimento (CAMPOS,2015).

O processo de fabricação do material vai influenciar diretamente a classificação, visto que a areia artificial de origem basáltica é constituída por grãos angulosos, com textura superficial, mais áspera e com maior teor de finos, o que favorece a obtenção de concretos menos trabalháveis, isto é, que exigem uma maior demanda de água, ou seja, a forma, a textura de superfície e mesmo a integridade do agregado fabricado por esmagamento influenciam no desempenho em concretos.

Entre as várias máquinas de redução de tamanho utilizadas na produção, cone e impacto triturador são os mais comuns (BASTOS, 2005; DRAGO, 2009; GONÇALVES *et. al*, 2007). Os autores afirmam que a produção de agregados pulverizados se dá por diferentes trituradores de impacto, em especial os pêndulos de eixo vertical. A moagem neste tipo de triturador é o resultado de propulsão com um rotor de partículas movendo-se a grandes velocidades, contra a bigorna ou de uma cortina de partículas em queda. Essas condições de carga levam a uma maior probabilidade de fratura de partículas que ocorre por clivagem, com uma contribuição significativa de atrito superficial. O resultado é que as partículas com maior integridade e mais formas isométricas são produzidos por este processo de trituração. No caso de britadores de cone, as fraturas de partículas depende da condição de carregamento.

A areia de britagem, ou areia artificial é dotada de uma grande quantidade de material pulverulento, de acordo com a NBR 7211: 2009 seu uso é admitido uma vez que define agregado miúdo como areia natural quartzosa ou areia artificial resultante da britagem de rochas estáveis, de diâmetro máximo igual ou inferior a 4,75mm, o que, dentro de certos limites, confere uma maior trabalhabilidade ao preencher os vazios da pasta de cimento e água. Por outro lado, quando em grandes quantidades,

se torna prejudicial à qualidade do concreto. Isto ocorre, quando o material pulverulento forma uma película envolvendo cada grão, impedindo a aderência da pasta de cimento aos agregados e aumentando assim, a necessidade de água para se manter uma mesma trabalhabilidade. Como forma de minimizar ou até mesmo eliminar essa desvantagem a areia pode ser submetida a um processo de lavagem, o que a tornaria adequada para utilização nas abordagens convencionais (CABRAL, 2007).

Desta forma, é fundamental o estudo da influência do agregado pulverizado nas propriedades do concreto fresco e endurecido, a fim de determinar os teores ótimos de sua adição. Segundo Do Carmo, Andrade, Graça et al. (2001), é importante conhecer os teores ótimos para alcançar o melhor desempenho das misturas e dimensionar os equipamentos de britagem da obra. Vale salientar, a importância de estabelecer os cuidados que deverão ser tomados para os ajustes das dosagens durante a produção dos agregados, devido à variação do agregado pulverizado durante a fabricação do concreto.

### **3.2.3. Pó de pedra**

As frações finas produzidas através da britagem de rocha possuem várias terminologias conforme a granulometria, conforme apresenta Menossi (2004), devido a inexistência de uma norma técnica que apresente especificações gerais, os finos possuem diversas denominações nos meios técnico e comercial (microfinos, finos de pedra, filer, pó de brita, entre outros). Diante de seus produtores e de seus consumidores, a nomenclatura mais utilizada é ainda pó de pedra. A NBR 7211:2009 define pó de pedra como sendo um material proveniente da britagem de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075mm, ou seja, material pulverulento passante na peneira nº 200.

O pó de pedra, segundo Menossi (2004), é considerado um rejeito de pedreiras, que fica estocado nos seus pátios, formando enormes volumes, causando, deste modo, vários danos ambientais.

As propriedades físicas e químicas dos agregados e das misturas dos ligantes são essenciais para a vida útil das estruturas (obras) em que são usados, sendo que os agregados representam aproximadamente 70% do concreto. São inúmeros os

exemplos de colapso estrutural nos quais é possível chegar à conclusão de que as causas principais do problema foi a seleção e uso inadequados dos agregados, o pó de pedra pode se transformar numa boa alternativa, por possuir uma maior uniformidade de suas propriedades (MENOSSI, 2004).

Ainda segundo o mesmo autor, são mencionadas algumas vantagens de utilizar o pó de pedra no concreto:

- Aproveitamento integral das pedreiras sem descarte de efluentes;
- Obtenção de um material com características físicas e químicas constantes;
- Menor consumo de cimento na preparação do concreto;
- Solução de problemas ambientais;
- Custo final reduzido do concreto.

### 3.3. ADITIVOS E ADIÇÕES

#### 3.3.1. Sílica ativa

As propriedades do concreto fresco são alteradas pelo uso de adições à mistura. A sílica ativa é um material altamente pozolânico, devido ao fato de ser constituída basicamente de sílica amorfa, possuindo área superficial muito elevada . A sílica exerce efeito físico (microfiller) e efeito químico (pozolânico) durante o processo de hidratação do cimento, atuando na formação de uma microestrutura mais densa, homogênea e uniforme (MEHTA e MONTEIRO, 2014; SILVA FILHO, 1994; ISAIA, 1995; AİTCIN, 2000).

Assim, a sílica ativa colabora através da ação física e da ação química para o aumento da resistência do concreto. A primeira deve-se ao efeito microfiller causado pela grande finura do material, já mencionado, que produz melhor empacotamento dos sólidos, preenchendo os vazios entre os grãos de cimento, melhorando as características na zona de transição pasta-agregado, o que aumenta o desempenho dos concretos e argamassas (DAL MOLIN e OLIVEIRA 1996). A segunda deve-se à reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, produzido pela reação do cimento,

que gera silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, bastante semelhante ao produzido pela reação do cimento (NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a sílica ativa, no concreto, além do efeito químico, o silicato de cálcio hidratado gerado subdivide os poros capilares, diminuindo a permeabilidade.

Com a utilização de cimentos com adição de sílica ativa, há redução significativa à penetrabilidade, além de aumentar a resistividade do concreto, reduzindo a velocidade de corrosão, pois proporcionam uma matriz mais densa, dificultando a entrada de agentes agressivos como cloretos, assim como de oxigênio e umidade, todos necessários para que a corrosão aconteça (NEVILLE, 1997).

### **3.3.2. Aditivos plastificantes**

A NBR 11768:2011 define como aditivo plastificante o produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada consistência.

A função dos aditivos plastificantes é de melhorar a consistência do concreto sem aumentar a demanda de água; aumentar as propriedades mecânicas e durabilidade da mistura, mantendo a consistência e reduzir o consumo de cimento, para as mesmas resistências e consistência. Agem na superfície das partículas de cimento, causando repulsão entre os grãos mergulhados na água da mistura. Podem ser utilizados para deixar o concreto mais plástico sem adição de mais água na mistura, ou para reduzir a quantidade de água do concreto, mantendo-se a mesma trabalhabilidade, de modo a produzir um concreto mais resistente sem a colocação de mais cimento. Pode ser usado como retardador (Tipo PR) ou acelerador (Tipo PA) (DAL MOLIN, 1995; AİTCIN, 2000).

Também podem ser chamados de redutores de água. Os resultados obtidos pelo emprego destes aditivos são: aumento da fluidez, aumento da resistência e redução do consumo de cimento.

### 3.3.3. Aditivos superplastificantes

Através da adição de pequenas quantidades desses aditivos poliméricos pode-se diminuir consideravelmente a quantidade de água necessária para a obtenção da trabalhabilidade desejada e, conseqüentemente, a porosidade, melhorando a durabilidade do concreto. Com o uso desses aditivos, compatíveis com o cimento, e adições minerais, tem-se que a redução da água da mistura não prejudicará as propriedades no estado fresco, diminuindo a exsudação, melhorando, assim, a zona de transição e a hidratação da pasta de cimento (TUTIKIAN et al., 2011; CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Os aditivos superplastificantes interagem com o  $C_3A$ , que é o primeiro componente do cimento a hidratar-se, e sua reação é controlada pelo sulfato de cálcio, produto adicionado ao clínquer para controlar o tempo de pega do cimento. Uma certa quantidade de aditivo é necessária durante a mistura para obter a trabalhabilidade desejada, no entanto, é imprescindível que o superplastificante não seja totalmente fixado pelo  $C_3A$ . Se a fixação ocorrer é porque íons sulfatos não foram liberados a tempo de reagirem com o  $C_3A$ . Quando os íons sulfatos são liberados vagarosamente, o cimento e o aditivo superplastificante são ditos incompatíveis. O resultado final é que com o uso do superplastificante, é possível obter uma dosagem, para uma dada trabalhabilidade, com uma menor quantidade de água, o que diminui a porosidade do concreto e conseqüentemente o aumento da resistência (DAL MOLIN, 1995; AÏTCIN, 2000).

Os superplastificantes são aditivos conhecidos como redutores de água de alta eficiência, por serem capazes de reduzir o teor de água três a quatro vezes mais, para uma dada mistura, quando comparados aos aditivos plastificantes. São tensoativos de cadeia longa, massa molecular elevada e um grande número de grupos polares na cadeia do hidrocarboneto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo a NBR 11768/2011, o produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir um concreto com determinada consistência.

### 3.4. PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

As principais propriedades do concreto endurecido são expressas pelo projetista e depende das particularidades do concreto fresco. O estado endurecido inicia-se com a hidratação do cimento consequente endurecimento do concreto, estendendo-se por toda a vida da estrutura.

#### 3.4.1. Resistência à compressão

Muitas propriedades do concreto como módulo de elasticidade, estanqueidade, impermeabilidade e resistência às intempéries, são diretamente relacionadas com a resistência à compressão e podem, portanto, ser deduzidas dos dados de resistência. A resistência à compressão aos 28 dias, determinada através de um ensaio padrão de compressão axial, é aceita como um índice geral da resistência do concreto (SCHUMACHER, 2007).

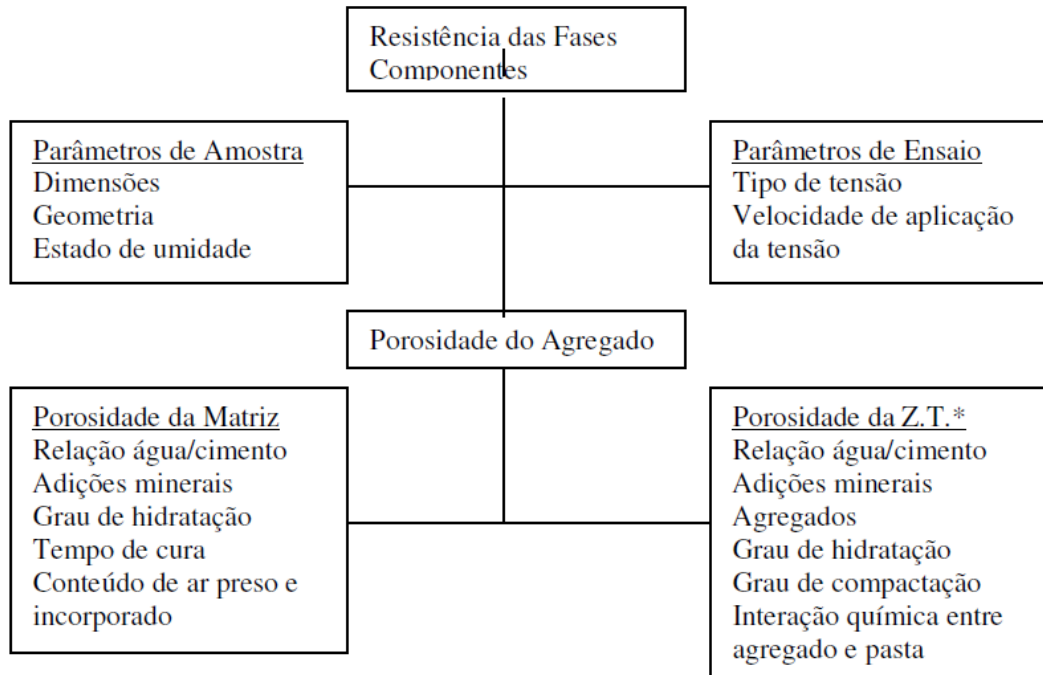
Segundo Neville (1997), a resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante, embora em muitos casos práticos, outras características como durabilidade e permeabilidade sejam de fato as mais importantes quando se quer prever a vida útil de uma estrutura em determinado ambiente.

Além disso, a resistência à compressão pode ser utilizada como parâmetro para avaliação da durabilidade de um concreto, e a grandeza largamente conhecida pelo meio técnico e, universalmente aceita como parâmetro para avaliação da qualidade, sendo seu controle facilmente exequível por um laboratório devidamente equipado para tal finalidade (LEVY, 2001).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o aumento da relação água/cimento, principal fator que influencia a resistência à compressão, ocasiona o aumento da porosidade da pasta de cimento e da zona de transição entre a pasta e o agregado, portanto a resistência à compressão do concreto não depende somente da solicitação à qual o corpo-de-prova estará sujeito, mas também da combinação de diversos fatores internos e externos, que podem afetar o resultado obtido dos ensaios, conforme ilustra FIGURA 6.



FIGURA 6 – INTERAÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA DO CONCRETO. ZT = ZONA DE TRANSIÇÃO.



FONTE: MEHTA E MONTEIRO (2014).

Em relação as outras propriedades, a resistência à compressão é o ensaio mais utilizado, e segue a norma NBR 5739:2007.

### 3.4.2. Módulo de elasticidade

O significado do limite de elasticidade em um projeto estrutural é devido ao fato dele representar a deformação máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente, portanto, o engenheiro deve conhecer o módulo de elasticidade do material uma vez que este influi no cálculo estrutural; conhecido o módulo, será possível calcular as flechas máximas admissíveis, ou seja, as flechas que não provocarão fissuras além de determinados limites (MEHTA, 1994; LEVY, 2001).

De acordo com Schumacher (2007), são muitas as variáveis que podem inferir no módulo de elasticidade do concreto. Dentre elas pode-se citar:

- Resistência à compressão do concreto;
- Consistência do concreto fresco;

- Volume de pasta por metro cúbico de concreto;
- Dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- Dimensão dos corpos de prova e,
- Natureza da rocha do agregado graúdo.

Quando limite de fissuração são ultrapassados, a armadura poderá ser despassivada rapidamente, devido a possível presença e agentes agressivos encontrados no meio ambiente (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>).

Uma vez despassivada a armadura, esta apresentará propensão às indesejáveis reações de corrosão, que em última análise, serão responsáveis pela redução da vida útil da estrutura (LEVY, 2001).

### **3.4.3. Retração e fluência**

A secagem do concreto é o resultado da evaporação de uma parte da água contida dentro da rede de poros. Segundo Amaral (2011) a redução de volume do concreto após a sua moldagem dá origem às deformações chamadas de retração. E fluência é o fenômeno onde ocorre o aumento gradual da deformação de um elemento de concreto quando este é submetido a um estado de tensões constante ao longo do tempo (MEHTA e MONTEIRO, 2014), nas primeiras idades as variações de volume.

Segundo Amaral (2011) são decorrentes de: perda de água de amassamento por evaporação; mudança de temperatura no resfriamento; fenômenos químicos ligados à hidratação do cimento; mudança de volume no estado plástico. E quando as deformações são impedidas surgem tensões de tração que podem levar o concreto à fissuração. Essas deformações podem ser reduzidas com o uso de cimento expansivo, aditivos e adições, melhora na execução da cura do concreto. Desta forma, as retrações podem ser:

- Retração autógena (química): redução macroscópica do volume de materiais cimentícios devido às reações de hidratação do cimento. Ocorrem antes da retração por secagem e devem ser consideradas em concretos de alta resistência devido ao alto consumo de cimento e baixa relação água/cimento.
- Retração por secagem (hidráulica): redução de volume devido à secagem (perda de água para o ambiente) do elemento de concreto. Depende diretamente do

tamanho e forma do elemento; O processo de secagem é longo e difícil de determinar experimentalmente, quando o elemento estará totalmente seco; Deve ser considerada em elemento com baixa espessura, pois, sua magnitude é relevante.

- Retração por carbonatação: redução de volume pela reação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presente na matriz de cimento com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera. Pode ser desconsiderado devido à sua baixa magnitude.
- Retração plástica: redução de volume pela superioridade da taxa de perda de água da superfície do elemento em relação à taxa disponível de água exsudada (surgimento de água na superfície do concreto após seu lançamento e adensamento). Ocorre antes do endurecimento da pasta de cimento (pega do concreto) e pode ser desconsiderada devido à sua baixa magnitude e efeito superficial.
- Retração térmica: redução de volume pelo resfriamento, à temperatura ambiente, do calor liberado pela reação de hidratação do cimento. Deve ser considerado para elemento de concreto com alta espessura, pois, há um grande aumento de temperatura (expansão de volume) pela fraca dissipação de calor e conseqüentemente maior redução de volume no resfriamento pela sua superfície específica alta, com dimensões de partículas relativamente pequenas, o agregado pulverizado resfria os poros, podendo ser importante na diminuição das variações volumétrica.

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi realizado na Universidade Federal do Paraná (UFPR), no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/DCC da UFPR e no LAME/LACTEC, conveniado à Universidade Federal do Paraná, credenciada pelo INMETRO – Instituto Nacional de Metodologia, Normatização e Qualidade Industrial.

### 4.1. VALIDADE DA PESQUISA

A validação da presente pesquisa foi feita com base na validade do constructo, validade externa e validade interna, conforme descrito a seguir.

- Validade constructo

Para analisar a validade de constructo foi utilizada como fonte de evidência uma revisão bibliográfica, com o objetivo de pesquisar, junto à literatura disponível, procedimentos que possam assegurar esta validação. Dessa maneira, foram identificadas adequadamente as técnicas empregadas por diversos pesquisadores influentes no meio acadêmico, ajustadas às condições do laboratório e reproduzidas para posterior análise.

Por não existir normas brasileiras que padronizem os ensaios de carbonatação, migração de íons cloreto, permeabilidade ao ar e resistividade elétrica. A validade citada será comprovada através de procedimentos de ensaios realizados por autores renomados nessas áreas de pesquisa, ajustados a necessidade do estudo, e posteriormente tratamento estatístico nos dados obtidos. Assim, foi possível identificar os ruídos e níveis de significância dos resultados.

- Validade externa

Robson (2002) afirma que a validade externa pode ser obtida em um estudo onde o grupo estudado, o contexto ou período é representativo, quando o objetivo central da pesquisa é estabelecer uma proposição ou teoria científica. A questão da validade

externa diz respeito ao conceito de generalização da pesquisa. É assegurada desde que sejam mantidos os mesmos parâmetros de comparação.

Para garantir a validade externa deste projeto de pesquisa devem-se ser mantidas as mesmas características e condições de laboratório nos experimentos. Desta forma foram selecionados dados que obtiveram resultados satisfatórios das pesquisas de Campos (2015) e Hoffmann (2015) para continuidade ao estudo, voltado a aspectos quanto à durabilidade.

- Campos (2015) Dissertação: Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental; Dos dados da autora, foram escolhidos dois níveis de resistência: 50 MPa e 80 MPa, e três teores de pó de pedra em substituição ao cimento Portland: 0%, 6% e 12%;
- Hoffmann (2015) Dissertação: Efeitos da adição de materiais pulverulentos proveniente da britagem de rochas na resistência à abrasão de concretos convencionais; Dos dados do autor, foi selecionado um nível de resistência: 30 MPa e mantido os mesmo três teores de pó de pedra em substituição à areia.
- Os resultados obtidos a partir dos ensaios deverão ser utilizados como base de dados para novas pesquisas com o objetivo de sugerir que utilização de 100% de agregado artificial com teores de pó de pedra, pode trazer benefícios para a indústria da construção civil, diminuir o consumo de cimento no concreto a fim de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e reduzir custos, como também mitigar a ação da extração de agregados finos (areia) em ambiente natural.

- Validade interna

A validade interna de uma pesquisa refere-se às ameaças à validade de seus resultados. Diz respeito à relação causa efeito, ou seja, verificar se os resultados medidos estão relacionados aos procedimentos realizados (ROBSON, 2002).

Nesta pesquisa, essa validade será buscada relacionando os dados obtidos nos ensaios com os resultados de pesquisadores ao qual o estudo foi baseado; Como também confrontados com normas e procedimentos de outros países e manual dos equipamentos, que fornecem parâmetros de comparação.

Assim, de modo a alcançar os resultados relacionados aos objetivos e hipóteses, a metodologia do desenvolvimento é baseada em estudos já realizados e publicados em fontes de periódicos científicos reconhecidos, dissertações e teses.

## 4.2. MATERIAIS

Para a realização do estudo experimental utilizou-se materiais obtidos na região metropolitana de Curitiba, para aplicação prática dos resultados. A motivação originou-se da crescente utilização de concretos dosados em central nesta região, utilizando inclusive areia artificial e pó de pedra das centrais de britagem usadas na confecção de concretos.

O estudo é uma continuidade dos trabalhos de Campos (2015) e Hoffmann (2015) com foco em durabilidade, para isso todos os materiais empregados são os mesmos utilizados nos trabalhos acima citados.

A rocha matriz de todos os agregados é o calcário, e todas as frações granulométricas são originárias da mesma pedreira.

### 4.2.1. Cimento

O tipo de cimento utilizado irá influenciar na capacidade do cimento resistir à penetrabilidade de agentes agressivos ao concreto.

Utilizou-se o CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial. O clínquer é o mesmo utilizado para fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais, principalmente nas primeiras idades. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, onde se exige desforma rápida, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada. Devido ao alto calor de hidratação, não é indicado para concreto massa (Cimentos Itambé, 2015).

As especificações técnicas estão apresentadas no QUADRO 8, a granulometria no QUADRO 9 e a distribuição granulométrica na FIGURA 7.

QUADRO 8 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS CPV-ARI

FÍSICAS			QUÍMICAS	
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )		3,00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,25
Expan. Quente (mm)		0,2	SiO <sub>2</sub> (%)	18,82
Tempo de pega	Início (h:min)	02:38	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,57
	Fim (h:min)	03:15	CaO (%)	60,55
Consis. Nomal (%)		28	MgO (%)	4,84
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4085	SO <sub>3</sub> (%)	2,88
# 200 (%)		0,41	Perda fogo (%)	2,87
# 325 (%)		3,23	CaO livre (%)	0,82
Resistência a compressão (MPa)	1 (dia)	22,1	Resid. Insolúvel (%)	0,72
	3 (dias)	38,1	Equiv. Alcal. (%)	0,61
	7 (dias)	43,8		
	28 (dias)	51,9		

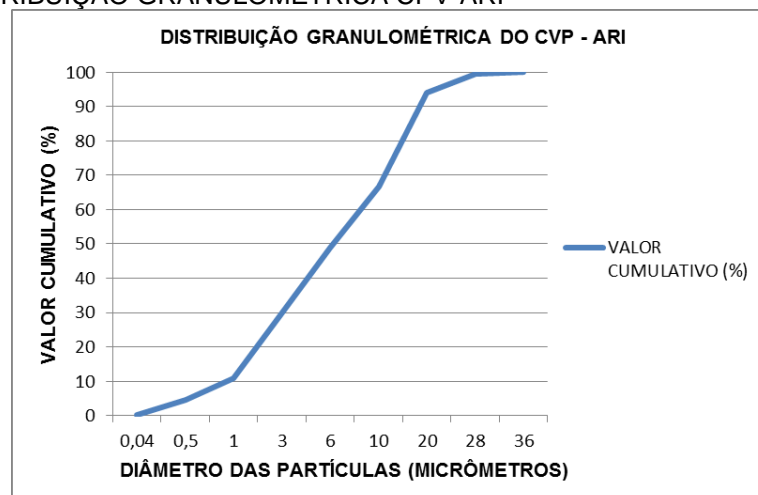
FONTE: FORNECEDOR (2014)

QUADRO 9 - GRANULOMETRIA CPV-ARI

GRANULOMETRIA CP -V - ARI	
DIÂMETRO	VALOR CUMULATIVO (%)
0,04	0,18
0,5	4,51
1	10,98
3	29,88
6	48,76
10	66,72
20	93,92
28	99,46
36	100
FINOS - MICRÔMETROS	
DIÂMETRO A 10%	0,93
DIÂMETRO A 50%	6,24
DIÂMETRO A 90%	17,72
DIÂMETRO MÉDIO	7,97

FONTE: FORNECEDOR (2014)

FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA CPV-ARI



FONTE: CAMPOS (2015)

#### 4.2.2. Agregado miúdo

A areia empregada é 100% artificial, como já mencionado, tem rocha matriz calcária. A granulometria do agregado miúdo está apresentada no QUADRO 10 e as características no QUADRO 11 e a curva granulométrica na FIGURA 8.

QUADRO 10 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO MIÚDO

GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO - NBR 7211:2009		
PENEIRA	% MÉDIA RETIDA	% MÉDIA ACUMULADA
2,4	4	4
1,2	40	44
0,6	24	68
0,3	14	82
0,15	10	92
0,075	5	97
Fundo	3	100

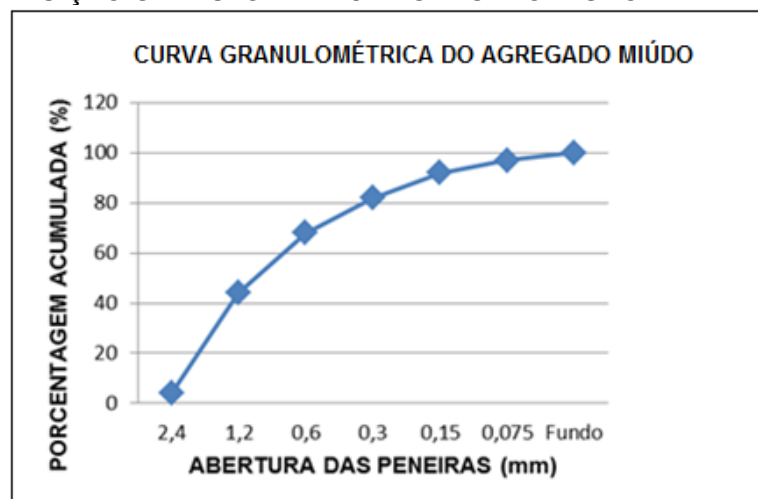
FONTE: FORNECEDOR (2014)

QUADRO 11 - CARACTERÍSTICAS AGREGADO MIÚDO

CARACTERIZAÇÃO AGREGADO MIÚDO		
MASSA ESPECÍFICA - NBR NM 52:2009 (Kg/dm <sup>3</sup> )	MASSA UNITÁRIA - NBR NM 45:2006 (Kg/dm <sup>3</sup> )	MATERIAL PULVERULENTO - NBR NM 46:2003(%)
2,79	1,37	2,1

FONTE: FORNECEDOR (2014)

FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO MIÚDO



FONTE: CAMPOS (2015)



### 4.2.3. Agregado graúdo

A brita utilizada é proveniente do município de Balsa Nova – PR, conforme já mencionado, é de origem calcária com dimensão máxima característica de 19mm. As especificações técnica quanto à granulometria está apresentada no QUADRO 12, as suas características no QUADRO 13 e a curva granulométrica e na FIGURA 9.

QUADRO 12 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO

GRANULOMETRIA AGREGADO GRAÚDO - NBR 7211:2009		
PENEIRA	% MÉDIA RETIDA	% MÉDIA ACUMULADA
19	12	12
12,5	47	59
9,5	29	88
6,3	11	99
4,8	-	99
Fundo	1	100

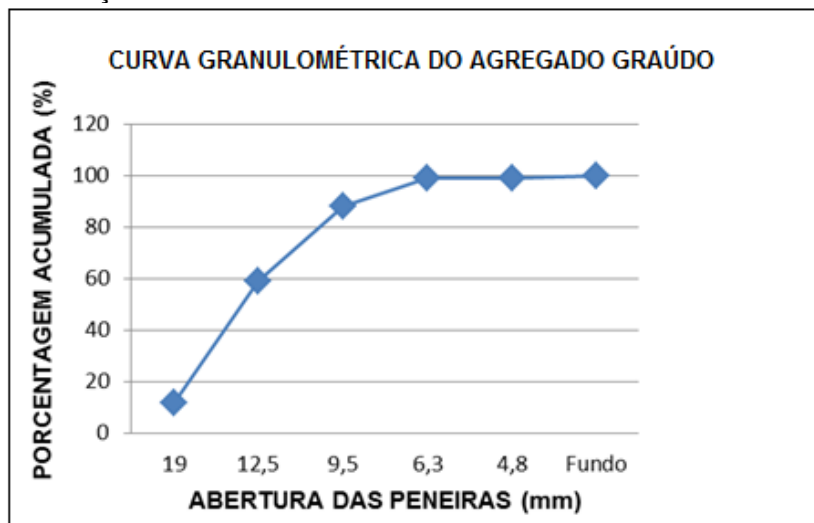
FONTE: FABRICANTE (2014)

QUADRO 13 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO

CARACTERIZAÇÃO AGREGADO GRAÚDO		
MASSA ESPECÍFICA - NBR NM 53:2009 (Kg/dm <sup>3</sup> )	MASSA UNITÁRIA - NBR NM 45:2006 (Kg/dm <sup>3</sup> )	MATERIAL PULVERULENTO - NBR NM 46:2003(%)
2,81	1,45	1,3

FONTE: FABRICANTE (2014)

FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA BRITA



FONTE: FABRICANTE (2014)

#### 4.2.4. Pó de pedra

O pó de pedra empregado é oriundo da britagem de rochas para fabricação de areia artificial, material este proveniente do calcário em suspensão na água, que após decantação, é raspado e descartado, conforme apresentado na FIGURA 10.

O QUADRO 14 apresenta a caracterização do pó e a massa específica deste material. Para a utilização, este material foi seco em estufa a 60°, destorroado manualmente por cerca de 5 horas, e posterior utilização.

FIGURA 10 - PÓ DE PEDRA COLETADO EM PEDREIRA



FONTE: A AUTORA (2015)

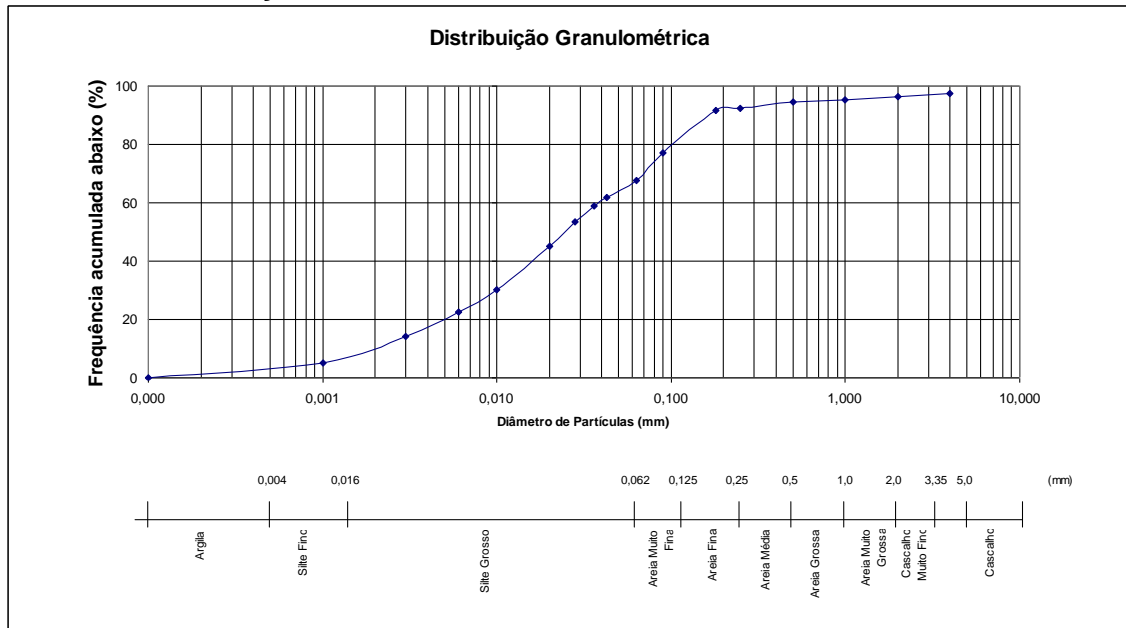
QUADRO 14 - CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE PEDRA

PÓ DE PEDRA SEM PENEIRAR					
MASSA ESPECÍFICA	2,67 kg/dm³				
MASSA INICIAL	80g			DATA	10/10/2014
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACUMULADA ACIMA	% ACUMULADA ABAIXO
5	4	1,94	2,43	2,43	97,58
9	2	1,03	1,29	3,71	96,29
16	1	0,68	0,85	4,56	95,44
32	0,5	0,71	0,89	5,45	94,55
60	0,25	1,73	2,16	7,61	92,39
Laser	0,18	0,46	0,57	8,19	91,81
Laser	0,09	11,87	14,84	23,02	76,98
Laser	0,063	7,38	9,22	32,24	67,76
Laser	0,043	4,72	5,89	38,14	61,86
Laser	0,036	2,44	3,05	41,19	58,81
Laser	0,028	4,41	5,51	46,69	53,31
Laser	0,02	6,59	8,24	54,93	45,07
Laser	0,01	11,8	14,75	69,68	30,32
Laser	0,006	6,33	7,91	77,59	22,41
Laser	0,003	6,58	8,22	85,81	14,19
Laser	0,001	7,23	9,04	94,84	5,16
Laser	0	4,12	5,16	100	0
MASSA FINAL (g)	80	FINOS ABAIXO #60 - MICRÔMETROS			
		Diâmetro 10%		1,81	
		Diâmetro 50%		20,98	
		Diâmetro 90%		110,31	
		Diâmetro médio		40,43	

FONTE: CAMPOS (2015)

A curva granulométrica é apresentada graficamente na FIGURA 11.

FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PÓ DE PEDRA



FONTE: CAMPOS (2015)

#### 4.2.5. Aditivos

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram utilizados dois tipos de aditivos: plastificantes e superplastificante, ambos do fabricante Grace.

O aditivo plastificante utilizado é da linha Mira, sendo este um aditivo polifuncional desenvolvido como redutor de água de alta eficiência.

O aditivo superplastificante utilizado é da linha Tec-Flow, a base de policarboxilatos, usados como redutores de água de alta eficiência.

Os aditivos utilizados atendem aos requisitos da NBR 11768:2011 e são compatíveis com todos os tipos de cimento Portland.

#### 4.2.6. Sílica Ativa

A sílica ativa vem sendo empregada para melhorar as propriedades dos concretos, quando comparadas aos concretos convencionais. Vem sendo utilizada no concreto como adição pozolânica em razão de se produzir concretos com propriedades bastante melhoradas, principalmente resistências elevadas e baixa permeabilidade. É

um subproduto industrial da produção de silício metálico, ligas de ferro-silício ou outros produtos silicosos a partir do quartzo de elevada pureza e carvão em fornos elétricos à arco, a temperaturas da ordem de 2000°C (DAL MOLIN, apud MAAGE e SALLEVOLD, 1987; MALHOTRA, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 1997; AİTCIN, 2000). O QUADRO 15 apresenta os principais dados de caracterização da sílica ativa.

QUADRO 15 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - SÍLICA ATIVA

<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA UTILIZADA</b>	
Massa específica	2,2 kg/dm <sup>3</sup>
Superfície específica	20000 m <sup>2</sup> /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio	0,2 µm
Teor de SiO <sub>2</sub>	Mínimo 85%
Umidade	Máximo 3%

FONTE: FABRICANTE (2015)

#### 4.3. SELEÇÃO DA AMOSTRA

Esta dissertação, por ser uma extensão das pesquisas de Campos (2015) e Hoffmann (2015), selecionou dados dos autores que forneceram resultados satisfatórios, e preocupou-se em analisar quanto à durabilidade.

As amostras para os ensaios foram: Concretos convencionais e de alta resistência confeccionados em laboratório com areia 100% artificial e com adição de diferentes teores de pó de pedra, vindo da Região Metropolitana de Curitiba. Os fatores que serão utilizados nas amostras são:

- Relação água/aglomerante, com três níveis (0,28; 0,35 e 0,55);
- Teor de pó de pedra com três níveis (0%, 6% e 12%);
- Areia natural substituída pela artificial em 100%.

Para o presente trabalho, as resistências esperadas estão apresentadas no QUADRO 16:

QUADRO 16 - FAIXAS DE RESISTÊNCIAS ESPERADAS

CLASSE	FAIXA DE RESISTÊNCIA ESPERADA (Mpa)	RELAÇÃO A/A
1	30	0,55
2	50	0,35
3	80	0,28

FONTE: A AUTORA (2015)

O traço base para o concreto de alta resistência, sem adição de pó de pedra, foi o mesmo utilizado por Mendes (2000) e ajustado por Campos (2015), e para o concreto convencional foi o traço fornecido pela concreteira (QUADRO 17). Foram adotados os traços com teores de pó de pedra de 6% (QUADRO 18) e 12% (QUADRO 19), devido aos resultados satisfatórios obtidos por Campos (2015) e Hoffmann (2015).

QUADRO 17 - TRAÇO BASE SEM ADIÇÃO DE PÓ DE PEDRA

<b>TRAÇO COM 0% DE PÓ</b>			
<b>TRAÇO</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>NÍVEL DE RESISTÊNCIA</b>	<b>30MPa</b>	<b>50 MPa</b>	<b>80 MPa</b>
Cimento (Kg)	280,00	362,00	452,00
Sílica Ativa (Kg)	0,00	31,00	39,00
Areia (Kg)	887,00	900,00	815,00
Pó de pedra (Kg)	0,00	0,00	0,00
Brita (Kg)	1065,00	1053,00	1053,00
Água (l)	154,00	137,00	137,00
Água/aglomerante	0,55	0,35	0,28
Aditivo (kg)	2,24	4,72	5,89

FONTE: A AUTORA (2015)

QUADRO 18 - TRAÇO COM 6% DE PÓ DE PEDRA

<b>TRAÇO COM 6% DE PÓ</b>			
<b>TRAÇO</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>NÍVEL DE RESISTÊNCIA</b>	<b>30MPa</b>	<b>50 MPa</b>	<b>80 MPa</b>
Cimento (Kg)	280,00	312,27	407,24
Sílica Ativa (Kg)	0,00	26,73	34,86
Areia (Kg)	833,78	900,00	815,00
Pó de pedra (Kg)	53,22	54,00	48,90
Brita (Kg)	1065,00	1053,00	1053,00
Água (l)	154,00	118,65	123,79
Água/aglomerante	0,00	0,35	0,28
Aditivo (kg)	2,24	4,72	5,89

FONTE: A AUTORA (2015)

QUADRO 19 - TRAÇO COM 12% DE PÓ DE PEDRA

<b>TRAÇO COM 12% DE PÓ</b>			
<b>TRAÇO</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>NÍVEL DE RESISTÊNCIA</b>	<b>30MPa</b>	<b>50 MPa</b>	<b>80 MPa</b>
Cimento (Kg)	280,00	262,53	317,15
Sílica Ativa (Kg)	0,00	22,47	31,00
Areia (Kg)	780,56	900,00	815,00
Pó de pedra (Kg)	106,44	108,00	97,80
Brita (Kg)	0,00	1053,00	1053,00
Água (l)	154,00	99,75	110,10
Água/aglomerante	0,00	0,35	0,28
Aditivo (kg)	2,24	4,72	7,37

FONTE: A AUTORA (2015)

As misturas dos concretos dos experimentos foram feitas com o uso de uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 150 litros.

A determinação da sequência da mistura dos materiais na betoneira foi definida de acordo com Campos (2015). A sequência foi constante em todos os traços, sendo:

1. 100% de brita e 50% da água, misturada por 30 segundos;
2. 100% da areia e do pó e 25% da água, mistura por 30 segundos;
3. 100% dos aglomerantes (cimento e sílica ativa), mistura por 1 minuto;
4. 100% do aditivo e restante da água, mistura por 10 minutos.

Após mistura, os moldes foram lubrificados com desmoldante, e preenchidos em duas camadas, adensados em mesa vibratória com tempos de vibração fixados previamente: Cada camada foi vibrada por dois períodos de oito segundos, sendo que entre eles houve um período de repouso de dez segundos, para que as bolhas de ar do material pudessem chegar à superfície. A mesa vibratória (FIGURA 12) empregada possui área de 3,36 cm<sup>2</sup>, motor de 3/4cv e 3500rpm.

FIGURA 12 - MESA VIBRATÓRIA EMPREGADA NOS ENSAIOS



FONTE: A AUTORA (2016)

Após adensamento, a superfície das amostras foi regularizada com uma desempenadeira de aço, retirando-se o material excedente. Em seguida as amostras foram seladas com plástico-filme para evitar perda de umidade (FIGURA 13). Após dois dias, as amostras foram desmoldadas e levadas à cura submersa, em caixas d'água saturadas de cal, permanecendo até o período especificado de cura.



FIGURA 13 - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO APÓS MOLDAGEM



FONTE: A AUTORA (2016).

#### 4.4. MATRIZ EXPERIMENTAL

A metodologia de Projeto de Experimentos é fundamentada em conceitos estatísticos e destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. Seu uso permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador. Assim, ocorre inferência estatística que tem como objetivo fazer afirmações a partir de um conjunto de valores independentes (amostras dos concretos) sobre o universo.

O objetivo geral da utilização da metodologia é fornecer parâmetros confiáveis e bem estruturados, através da escala de importância QUADRO 20, características de qualidade QUADRO 21, variáveis de resposta QUADRO 22 parâmetros de processo QUADRO 23, níveis de fatores QUADRO 24, e fatores de ruído QUADRO 25. Deste modo, afim de minimizar custos e tornar o desempenho do sistema pouco sensível ao efeito dos fatores de ruído. O objetivo é alcançado a partir de uma sequência econômica e eficiente de ensaios, procedendo a uma avaliação estatística dos resultados, a fim de assegurar respaldo científico e maximizar as informações obtidas.



QUADRO 20 - ESCALA DE IMPORTANCIA

<b>ESCALA DE IMPORTÂNCIA</b>	<b>SIGNIFICÂNCIA</b>
1	Muito pouco importante
2	Pouco importante
3	Importância moderada
4	Importante
5	Muito importante

FONTE: A AUTORA (2016)

QUADRO 21 - CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE

<b>CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE</b>		
<b>DESIGNAÇÃO</b>	<b>TIPO</b>	<b>IMPORTÂNCIA RELATIVA</b>
Durabilidade	Maior-é-melhor	5
Emissão de CO2	Menor-é-melhor	4

FONTE: A AUTORA (2016)

QUADRO 22 - VARIÁVEIS DE RESPOSTA

<b>VARIÁVEIS DE RESPOSTA</b>		
<b>DESIGNAÇÃO</b>	<b>TIPO</b>	<b>IMPORTÂNCIA RELATIVA</b>
Carbonatação	Menor-é-melhor	5
Migração de íons cloreto	Menor-é-melhor	5
Permeabilidade	Menor-é-melhor	5
Resistividade elétrica	Maior-é-melhor	5
Resistência à compressão	Maior-é-melhor	4

FONTE: A AUTORA (2016)

QUADRO 23 - PARÂMETROS DO PROCESSO

<b>PARÂMETRO DO PROCESSO</b>		
<b>DESIGNAÇÃO</b>	<b>INTERVALO DE VARIAÇÃO</b>	<b>UNIDADE</b>
Quantidade de cimento	280 a 450	Kg/m <sup>3</sup>
Teor de pó de pedra	0% a 12%	Peso do cimento e da areia
Aditivos	0% a 1,3%	Peso do cimento
Agregado artificial	100%	Peso do cimento
Outros finos	0% a 30%	Peso do cimento
Água	90 a 160	Kg

FONTE: A AUTORA (2016)

QUADRO 24 - DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES

<b>DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES</b>			
<b>FATOR</b>	<b>No. NÍVEIS</b>	<b>NÍVEIS</b>	<b>UNIDADE</b>
a/a	5	0,28; 0,35 e 0,55	-
Agregado artificial	3	100%	Peso do cimento
Pó de pedra	3	0%, 6% e 12%	Peso do cimento e da areia

FONTE: A AUTORA (2016)

QUADRO 25 - FATORES DE RUÍDO

<b>FATORES DE RUÍDO</b>	
Z1	Erro do profissional que executará o ensaio
Z2	Condições do ambiente e dos equipamentos
Z3	Tempo para execução do ensaio após a moldagem

FONTE: A AUTORA (2016)

Após a realização dos ensaios, foi feita uma análise estatísticas dos dados e foi verificada, em termos durabilidade e de consumo de cimento, a influência da aplicação de agregado artificial e pó de pedra nos concretos convencionais e de alta resistência, comparando com os produzidos com areia natural. A análise dos resultados avalia a diminuição da pressão sobre mananciais de água junto a jazidas de areia natural, devido à utilização de areia artificial, com a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, devido à diminuição do consumo de cimento no concreto.

#### 4.5. MÉTODOS

Para a caracterização o concreto em relação às propriedades de durabilidade, foram realizados os seguintes ensaios nos corpos de prova de concreto:

- Carbonatação: Kulakowski (2002); Pauletti (2004) e PCP-18 RILEM;
- Migração de íons cloreto: ASTM C-1202/05 e Medeiros (2008);
- Permeabilidade: ensaio de Torrent (Permeability Tester Torrent – Proceq);
- Resistividade elétrica: ensaio através do Resipod – Proceq (princípio do dispositivo Wenner) e TC-154 RILEM;
- Resistência à compressão: NBR-5739:2007.

As idades definidas para os ensaios à compressão foram de: 28, 91 e 182 dias, para analisar a evolução da mesma e relacioná-la aos ensaios de: migração de íons cloreto, carbonatação, permeabilidade e resistividade elétrica. Para cada betonada foram moldados 17 CPs cilíndricos em formas metálicas 100mm x 200mm, de acordo com a NBR 5738:2003.

As idades de cura e quantidades de corpos de prova moldados são apresentados na QUADRO 26.

QUADRO 26 - DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Ensaio	Idade de Cura	0% pó			6% de pó			12% de pó		
		30 Mpa	50 MPa	80 MPa	30 Mpa	50 MPa	80 MPa	30 MPa	50 MPa	80 MPa
Carbonatação	28	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps
	91	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps
Resistividade Elétrica	28	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp
	91	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp
Permeabilidade	28	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp
	91	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp
	182	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp	1 Cp
Migração cloretos	91	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps
Resistência à compressão	28	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps
	91	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps
	182	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps	2 Cps
TOTAL DE CORPOS DE PROVA: 153 UNIDADES										

FONTE: A AUTORA (2015)

Foram adotadas, para cada ensaio, determinadas quantidades de corpos de provas para cada tempo de cura (28, 91 e 182 dias) e idades de ensaios. Para carbonatação segue o QUADRO 27, para o ensaio de migração de íons cloreto o QUADRO 28 e para permeabilidade e resistividade elétrica o QUADRO 29.

QUADRO 27 - ENSAIO DE CARBONATAÇÃO E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

CARBONATAÇÃO			
Tempo de cura	Pré-cond.	Tempo de exposição	Idade moldagem
28 dias	28 dias	0 dias	56 dias
		14 dias	70 dias
		35 dias	91 dias
		63 dias	119 dias
91 dias	28 dias	0 dias	119 dias
		14 dias	133 dias
		35 dias	154 dias
		63 dias	182 dias

FONTE: A AUTORA (2016)

QUADRO 28 - ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO	
Idade de cura	Idade de moldagem
91 dias	91 dias

FONTE: A AUTORA (2016)

QUADRO 29 - ENSAIO DE PERMEABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

PERMEABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA					
Idade de cura	Leitura 1 - Cp saturado/cura	Leit.2 - Câmara pré-cond.	Leit. 3 - Cp câmara carb. 14 dias	Leitura 4 - Cp câmara carb. 35 dias	Leitura 5 - Cp câmara carb. 63 dias
28	28 dias moldagem	56 dias moldagem	70 dias moldagem	91 dias moldagem	119 dias moldagem
91	91 dias moldagem	119 dias moldagem	133 dias moldagem	154 dias moldagem	182 dias moldagem
182	182 dias moldagem	-	-	-	-

FONTE: A AUTORA (2015)

#### 4.5.1. Ensaio de carbonatação acelerada

Após a cura de 28 e 91 dias, os corpos de prova foram pesados e dispostos em câmara seca para sazonalamento por 28 dias, com objetivo de que a umidade dos corpos de prova entrassem em equilíbrio com a umidade ambiente ideal para que ocorra a carbonatação.

O processo de sazonalamento constitui a etapa de cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação, a fim de que as amostras alcancem as condições ideais para o ensaio acelerado, quando os corpos de prova são submetidos à ação do CO<sub>2</sub>.

A Câmara seca ou câmara de sazonalamento é apresentada na FIGURA 14, com as condições descritas abaixo:

- Umidade relativa: 60%;
- Temperatura: 23°C.

FIGURA 14 - CÂMARA SECA OU CÂMARA DE SAZONAMENTO



FONTE: A AUTORA (2016).

Após esta etapa os corpos de prova foram encaminhados para a câmara de carbonatação, apresentada na FIGURA 15.

FIGURA 15 – CAMARA DE CARBONATAÇÃO PARA ENSAIO ACELERADO



FONTE: A AUTORA (2016).

Como não foram encontrados parâmetros predominantes em relação às diversas pesquisas, e devido a peculiaridades da câmara, foram adotados os seguintes padrões:

- Concentração de CO<sub>2</sub> controlada e regulada para 5,0% ± 1%;
- Umidade relativa: 60% ± 5%;
- Temperatura: 40°C ± 0,1°C.

Foram empregados corpos de prova cilíndricos (100mmx 200mm), permitindo obter fatias 35mm para cada idade medida, conforme apresentado na

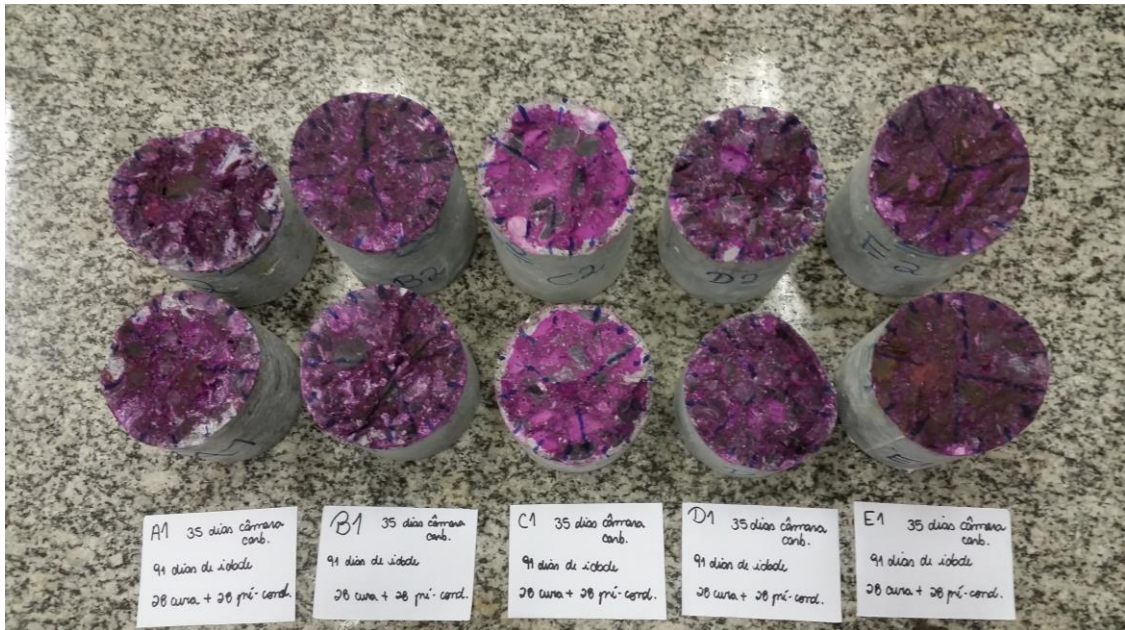
FIGURA 16 e FIGURA 17.

FIGURA 16 – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA



FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 17 – CORPOS DE PROVA EMPREGADOS NO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACCELERADA



FONTE: A AUTORA (2016)

Foram realizadas as medidas de carbonatação em quatro idades de exposição ao  $\text{CO}_2$  : 0, 14, 35 e 63 dias, através do emprego do indicador químico fenolftaleína e paquímetro. Efetuaram-se 15 medidas realizadas com paquímetro na área carbonatada, a partir da aspensão fenolftaleína (FIGURA 18 e FIGURA 19).

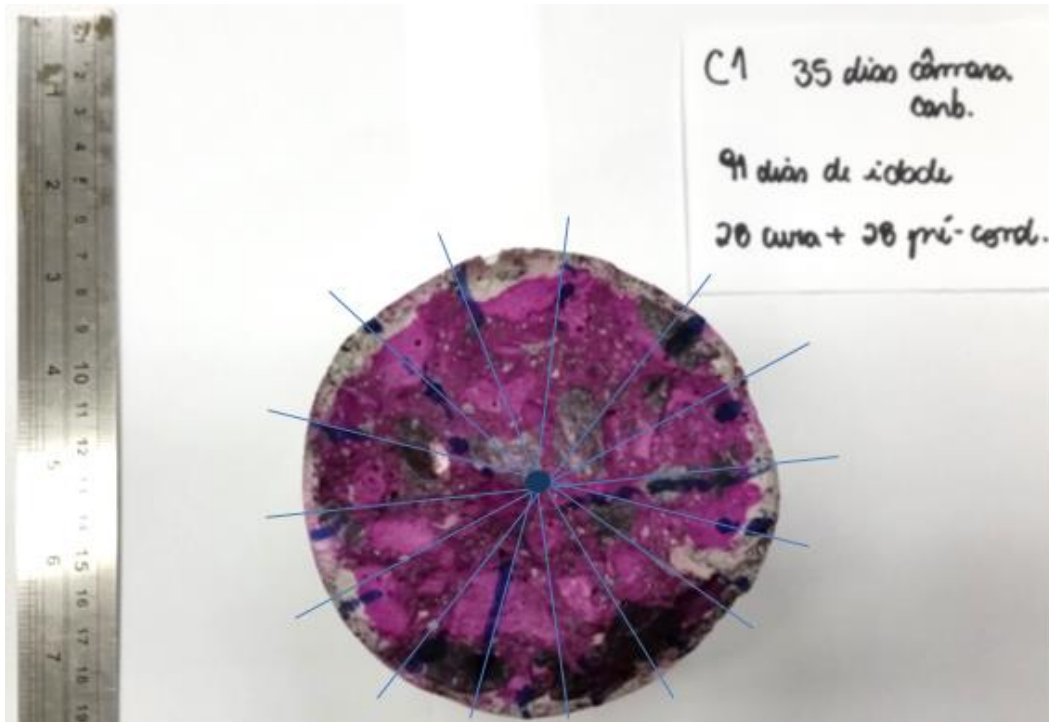
FIGURA 18 – MEDIDAS REALIZADAS DO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016)



FIGURA 19 - ENSAIO DE CARBONATAÇÃO 91 DIAS DE CURA, 28 SAZONAMENTO E 35 CAMARA CARBONATAÇÃO.



FONTE: A AUTORA (2016).

Para preparar o indicador de fenolftaleína foram utilizados um grama de reagente à 70ml de etanol e 30ml de água destilada, conforme recomendações da 1988 – CPC-18.

Considerando os modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação encontrados na bibliográfica, segue que as velocidades de carbonatação acelerada e natural podem ser relacionadas por meio da raiz quadrada da razão entre as respectivas concentrações de  $\text{CO}_2$ , conforme modelo de Tuuti (1982) apud Perim (2013), baseado nas leis de Fick. Após a coleta de dados, foram analisados parâmetros de vida útil a partir do tempo de exposição equivalente à carbonatação natural.

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

(3)

Onde:

$t$  = tempo efetivo de exposição para atingir a espessura de cobrimento;

$e_c$  = espessura do cobrimento = profundidade carbonatada = 25mm (NBR 6118);

$k$  = coeficiente de carbonatação acelerada ( $mm\sqrt{semanas}$ ).

Segundo a NBR 15575-2: 2013, discorre sobre durabilidade e menciona que o sistema estrutural deve conservar a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil, que conforme cita Perim (2013), diz respeito ao tempo compreendido entre o início de operações ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário pré-estabelecidas. A norma usa como critério, a vida útil de projeto dos sistemas estruturais, e recomenda que para um edifício estrutural e para cada um dos sistemas que o compõem, a vida útil de projeto não seja inferior a 50 anos.

Considerando as condições de exposição e clima característicos da região de Goiânia, conforme Perim (2013), é possível correlacionar outras regiões para análise comparativa de carbonatação ao natural e acelerada, através do modelo proposto por Ferreira (2013), que comparou a carbonatação ao natural após 10 anos de exposição e a carbonatação acelerada, de diversos concretos, e encontrou uma correlação dada conforme:

$$K = 7,3836.k_n \quad (4)$$

Onde:

$K$  = coeficiente de carbonatação acelerada ( $mm\sqrt{ano}$ );

$K_n$  = coeficiente de carbonatação natural ( $mm\sqrt{ano}$ ).

#### 4.5.2. Ensaio de migração de íons cloreto

O ensaio foi baseado na norma americana ASTM C-1202/05 e na tese de Medeiros (2008). A norma prescreve que seja cortada uma fatia central de cada corpo de prova ensaiado, porém Medeiros (2008) destaca que não há influência na profundidade de penetração de cloretos ao se ensaiar até três fatias de cada corpo de prova. Deste modo, foram utilizadas duas fatias centrais de um mesmo corpo de prova.

Para realização do ensaio foram utilizados corpos de prova cilíndricos de  $\phi$  100mm x 200mm. Os corpos de prova foram mantidos em cura submersa por 90 dias, após retirada da cura, os cps foram cortados em 4 partes, sendo as 3 centrais de altura 50mm retiradas para realização do ensaio. Após o corte das fatias, elas foram encaminhadas para a estufa a 100°C de temperatura até a constância de massa, e acondicionadas em ambiente de laboratório por 12 horas para esfriarem.

Finalizado o período de resfriamento das amostras, estas foram seladas com uma camada de silicone em todo em toda sua lateral, conforme FIGURA 20.

FIGURA 20 – AMOSTRAS SELADAS COM SILICONE PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016)

Após a secagem do silicone, os corpos de prova foram colocados em um dessecador com aplicação de vácuo por 3 horas, apresentados na FIGURA 21 e FIGURA 22, com o objetivo de estabilizar as amostras.

FIGURA 21 – CORPOS DE PROVA ENCAMINHADOS AO DESSECADOR PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 22 – CORPOS DE PROVA APENAS À VACULO POR 3 HORAS PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016)

Logo após, colocou-se água destilada (FIGURA 23) até cobrir todas as amostras (FIGURA 24), aplicando vácuo por mais uma hora (FIGURA 25). Finalizado este processo, desligou-se a bomba de vácuo, e deixou-se os corpos de prova permanecerem submersos na água destilada por 18 horas.

FIGURA 23 – INCREMENTO DE ÁGUA DESTILADA AO DESSECADOR PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 24 – CORPOS DE PROVA SUBMERSOS AO DESSECADOR PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016)



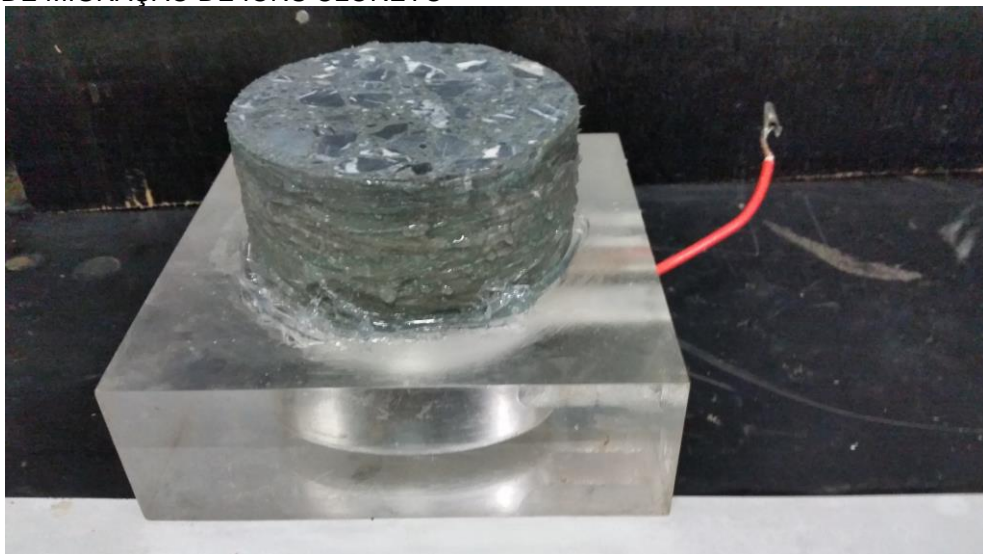
FIGURA 25 – APLICAÇÃO DE VÁCUO COM ÁGUA DESTILADA E IMERSÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016)

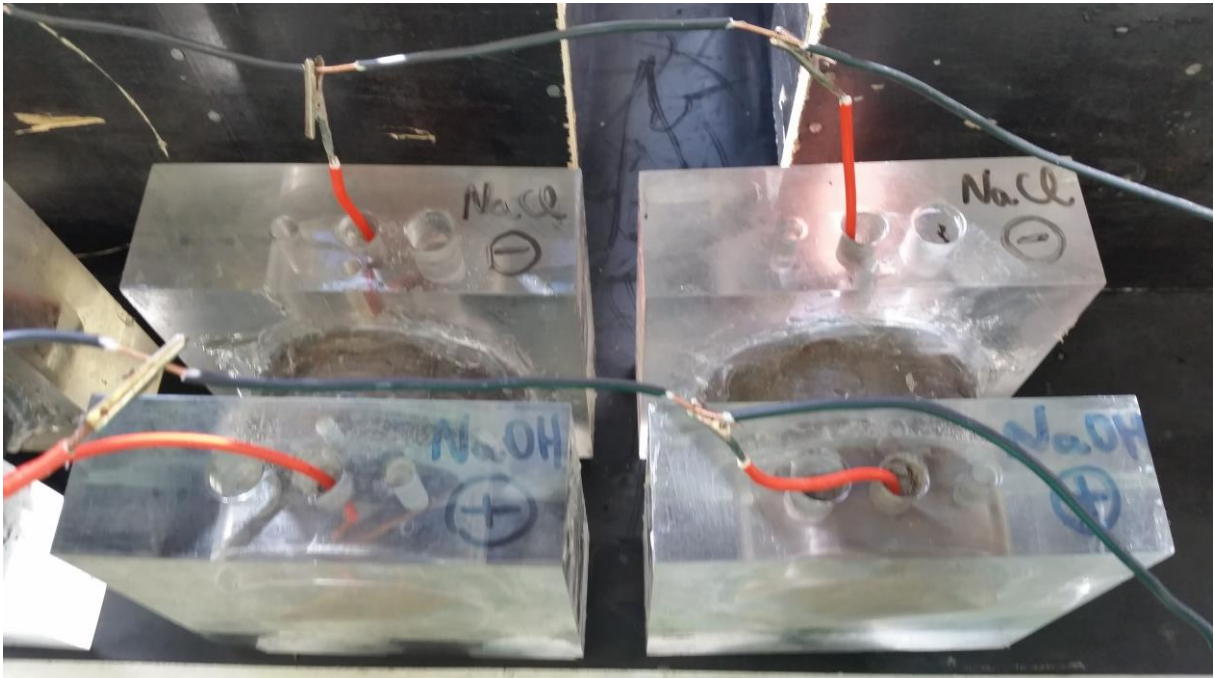
Por fim, segundo a norma ASTM C-1202/05, o ensaio prossegue com a instalação de cada corpo de prova entre as células de acrílico, seladas com silicone (FIGURA 26), coloca-se então uma com solução de 3% de NaCl em uma célula e em outra a solução NaOH 0,3N (ambas soluções a base de água deionizada) apresentadas na FIGURA 27 e esquema detalhado da célula de migração empregada segundo FIGURA 28.

FIGURA 26 – MONTAGEM DAS CÉLULAS PARA ENSAIO DE PENETRABILIDADE PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



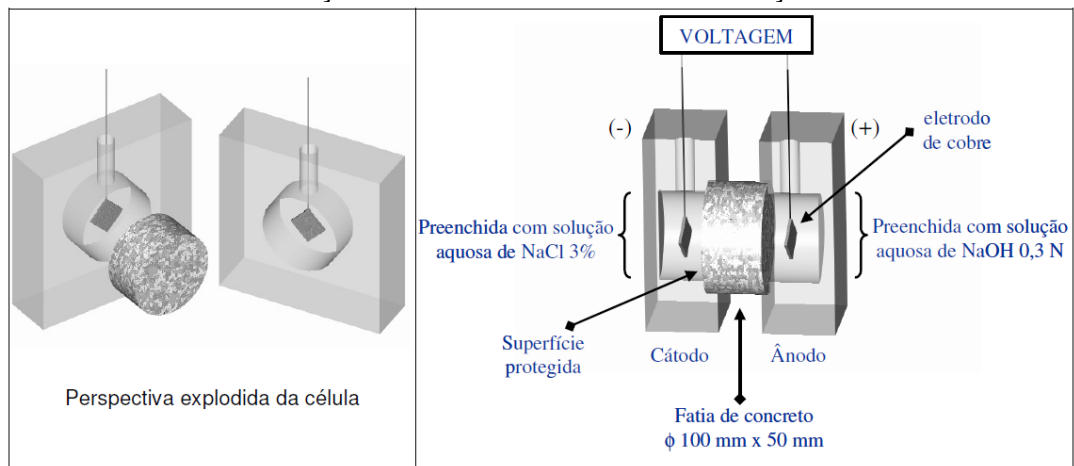
FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 27 - SOLUÇÕES DE NaCl E NaOH NAS CÉLULAS DE ACRÍLICO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 28 - CÉLULA DE MIGRAÇÃO USADA NO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: MEDEIROS (2008).

Fez-se então, passar entre as células, uma corrente de 60V para acelerar a migração de íons (FIGURA 29 e FIGURA 30).

FIGURA 29 – APLICAÇÃO DE CARGA PASSANTE DE 60V NA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016).

FIGURA 30 - ENSAIO DE ÍONS CLORETO



FONTE: A AUTORA (2016).

A corrente passante é medida em intervalos regulares de tempo correspondentes a 30 minutos, durante 6 horas ininterruptas, conforme FIGURA 31. A integração da curva: Tempo x Corrente, fornece a carga passante, sendo



proporcional a penetrabilidade dos íons. Quanto maior esse valor, maior a penetrabilidade do concreto.

FIGURA 31 - VOLTAGEM APLICADA PARA ENSAIO DE PENETRABILIDADE



FONTE: A AUTORA (2016).

De acordo com a norma ASTM-1202, é possível verificar uma correlação do risco de penetrabilidade de íons cloreto no concreto através da carga elétrica passante no QUADRO 30.

QUADRO 30 - PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETO BASEADO NA CARGA PASSANTE

CARGA PASSANTE (Coulombs)	PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETO
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Negligenciável

FONTE: ASTM C 1202/97 *apud* Rubin et al, 2006

O cálculo das cargas passantes em Coulombs, é feito a partir da corrente passante em miliamperes, dada por:

$$Q_i = \frac{L_i + L_{i+1}}{2} \cdot (T_{i+1} - T_i) \cdot \frac{3600}{1000}$$
(5)

Onde:

$Q_i$  = carga passante no tempo  $i$  (Coulombs);

$L_i$  = leitura da corrente passante no tempo  $i$  (Miliamperes);

$T_i$  = Tempo em que a carga passante foi lida (horas).

Para comparar os resultados com valores prescritos pela norma, foi necessário calcular a carga passante em Coulombs acumulada, conforme:

$$Q = \sum Q_i$$
(6)

Onde:

$Q$  = carga passante (Coulombs);

$Q_i$  = carga passante no tempo  $i$  (Coulombs).

#### 4.5.3. Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi verificado pelo método Torrent (1992), que consiste na verificação da permeabilidade das amostras ao ar, com o uso do equipamento *Torrent Permeability Tester*. Para realização do ensaio os corpos devem estar com as superfícies lisas, livres de quebras e sem selar.

Por este motivo, os corpos de prova foram capeados na sua base superior e inferior de modo a garantir que as superfícies ficassem regulares, e posteriormente divididos em três partes iguais, de modo que fossem estudados corpos de prova cilíndricos de  $\phi$  100mm x 60mm, conforme FIGURA 32.

FIGURA 32 – CAPEAMENTO E CORTE DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE



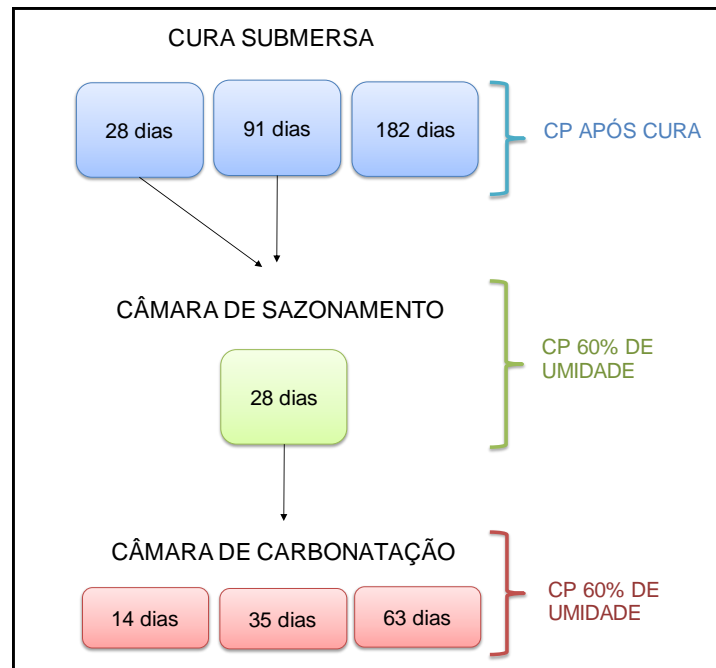
FONTE: A AUTORA (2016).

As leituras seguiram o mesmo padrão tanto para permeabilidade, como para resistividade, de acordo como esquema de fluxo apresentado na FIGURA 33:

- Leitura após cura úmida (corpos de prova saturados) - 3 corpos de provas, com 3 leituras em cada, nas idades de 28, 91 e 182 dias;
- Leitura após câmara de sazonalamento (corpos de prova com 60% de umidade, temperatura de 23°C) - 3 corpos de provas, com 3 leituras em cada, nas idades de 28 e 91;
- Leitura em câmara de carbonatação (corpos de prova com 60% de umidade, temperatura de 40°C e 5% de CO<sub>2</sub>). Fez-se 3 leituras em 3 corpos de provas para cada tipo de concreto, nas idades de carbonatação de 14, 35 e 63 dias, ambas para concretos com cura submersa de 28 dias e cura de 91 dias.

Para o ensaio saturado, após a retirada dos corpos de prova da cura, estes foram encaminhados para a estufa à 60°C para secagem por 48 horas. Logo após, fez-se o ensaio à permeabilidade, visto a necessidade de retirar a água dos poros para análise do concreto.

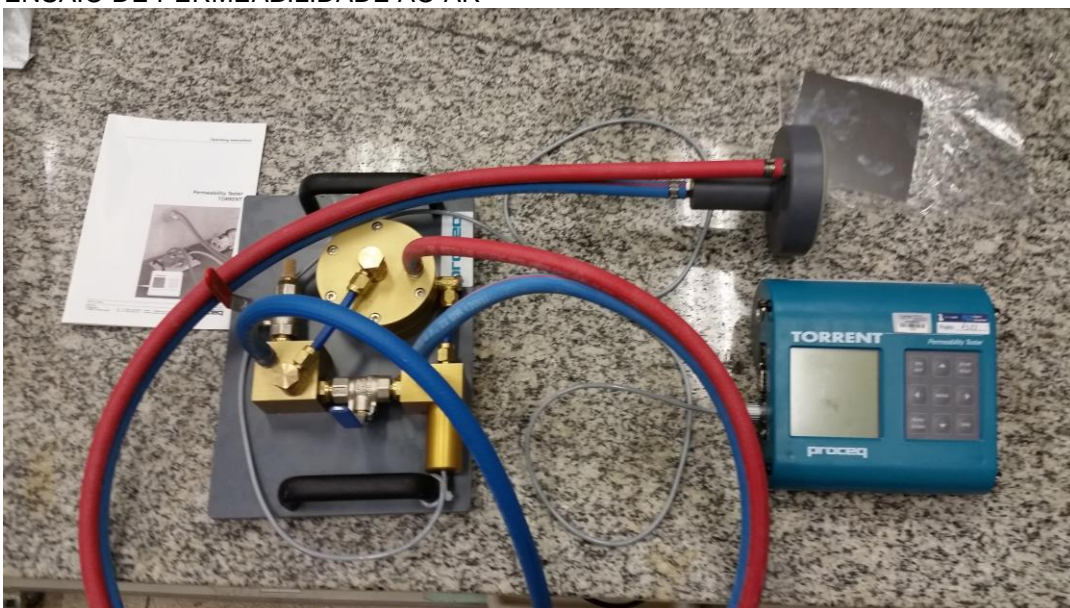
FIGURA 33 - ESQUEMA DE ENSAIOS DE PERMEABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA



FONTE: A AUTORA (2016).

O equipamento fornece uma medição rápida e não destrutiva da qualidade do concreto com relação a sua durabilidade. É composto por uma célula de câmara dupla, um regulador de pressão que balanceia a pressão das câmaras interna e externa, e uma bomba à vácuo, conforme FIGURA 34.

FIGURA 34 – EQUIPAMENTO TORRENT PERMEABILITY TESTER PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR



FONTE: A AUTORA (2016).



O método consiste em aplicar vácuo dentro desta célula previamente acoplada a superfície do concreto, conforme FIGURA 35, e medir o grau em que a pressão no interior da célula aumenta.

FIGURA 35 – MEDIÇÃO DE  $K_T$  (COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO CONCRETO) ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR



FONTE: A AUTORA (2016).

Os procedimentos para ensaios são apresentados abaixo, segundo manual do equipamento:

- As duas válvulas da unidade de controle devem estar abertas (posição horizontal);
- Conectar o tubo de borracha da unidade de controle na bomba de vácuo, utilizando a presilha. A ligação deve estar bem vedada;
- Ligar o fio da unidade de controle (sensor de pressão) ao "Input A" do painel.
- Ligar a bomba de vácuo;
- Colocar a célula de vácuo na superfície do concreto a ser ensaiado.
- Pressionar "start" no painel;
- Fechar a válvula vermelha (posição vertical);
- Aguardar 30 segundos e fechar a válvula azul;
- Aguardar 5 segundos e abrir a válvula azul;
- Aguardar 25 segundos e fechar a válvula azul;

- Quando o tempo decorrido atingir 720 segundos ou a variação de pressão do sistema atingir 20 mbar, o ensaio finaliza e fornece o resultado de Kt (constante de permeabilidade que será correlacionado com QUADRO 31) e L (profundidade de penetração);

QUADRO 31 – PARAMETRO DE VERIFICAÇÃO DE PERMEABILIDADE AO AR

QUALIDADE DO CONCRETO	NÍVEL	KT ( $10^{-16} \text{ m}^2$ )
MUITO RUIM	5	> 10
RUIM	4	1.0 - 10
NORMAL	3	0.1 - 1.0
BOM	2	0.01 - 0.1
MUITO BOM	1	< 0.01

FONTE: MANUAL TORRENT PROCEQ (2013)

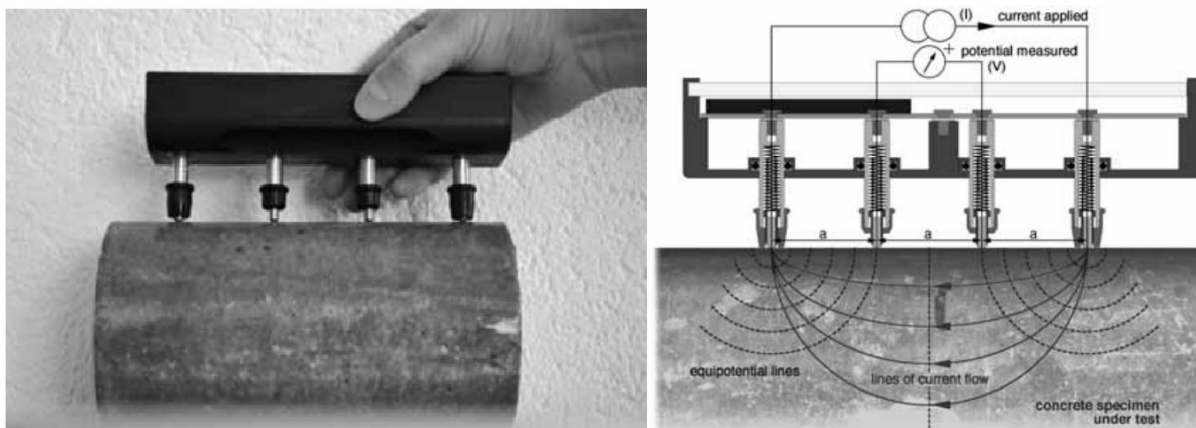
Como o ar dentro dos poros do concreto está submetido à pressão atmosférica, ele fluirá para a célula de vácuo na intensidade indicada por sua permeabilidade. Desta forma, quanto maior o aumento de pressão no interior da célula, maior será a permeabilidade ao ar deste concreto.

#### 4.5.4. Ensaio de resistividade Elétrica

Para realização dos ensaios de Resistividade Elétrica, utilizou-se o equipamento modelo “Resipod” marca “Proceq”, conforme padrão AASHTO e método Wenner, proposto para o teste de resistividade de superfície para estimar a permeabilidade de concretos curados.

O Resipod contém uma sonda Wenner de 4 pontos que aplica uma corrente elétrica pelos eletrodos externos, enquanto os eletrodos internos realizam uma leitura de diferença de potencial para estimar a resistividade do material, conforme FIGURA 36.

FIGURA 36 – EQUIPAMENTO RESIPOD SEGUNDO MÉTODO WENNER PARA ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA



FONTE: MANUAL PROCEQ (2013)

Para realização do ensaio foram utilizados corpos de prova cilíndricos de  $\phi$  100mm x 200mm. No equipamento utilizado, o espaçamento padrão entre os eletrodos é de 50mm e a corrente aplicada varia de 10 a 200  $\mu$ A.

A resistividade elétrica foi verificada nas mesmas condições que o ensaio de permeabilidade, seguindo o mesmo padrão de ensaio.

Este ensaio consiste em pressionar o aparelho contra a superfície longitudinal do concreto (200mm). Esta superfície deve estar limpa e sem qualquer tipo de revestimento ou de isolamento elétrico. Os valores apresentados no display do aparelho já estão calibrados para o fator de forma de 100mm x 200mm – cilíndricos conforme FIGURA 37.

FIGURA 37 – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA



FONTE: A AUTORA (2016)

Na etapa após o sazonalamento, e durante as leituras de carbonatação, não era possível realizar a saturação dos corpos de prova visto a interferência quanto à frente de carbonatação dos corpos de prova, devido à saturação dos poros. Deste modo, utilizou-se nos contatos as espojas saturadas, fornecidas pelos fabricantes, de maneira que a umidade que penetrasse no corpo de prova fosse a mínima possível.

#### 4.5.5. Ensaio de resistência à compressão

A ruptura dos corpos de prova realizadas a fim de determinar a resistência a compressão desses cps para comparação com os ensaios de durabilidade de mesmas idades, foi realizado segundo a norma NBR-5739:2007 (FIGURA 38). Para cada idade de ensaio 28, 91 e 182 dias, foram rompidos dois corpos de prova.

FIGURA 38 – PRENSA UTILIZADA PARA O ENSAIO A COMPRESSÃO



FONTE: A AUTORA (2016)



## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Após a execução dos ensaios preconizados na matriz experimental propostas, os resultados foram tabulados nesse capítulo, bem como foram efetuadas observações através de análises estatísticas dos diversos projetos de experimentos.

Para todas as análises, o concreto de 50Mpa sem ações, será desconsiderado, visto a incoerência dos resultados devido à erros inconsistentes com demais resultados, possivelmente oriundos na moldagem dos corpos de prova, no momento da vibração ou problemas na preparação das amostras.

### 5.1. CARBONATAÇÃO ACELERADA

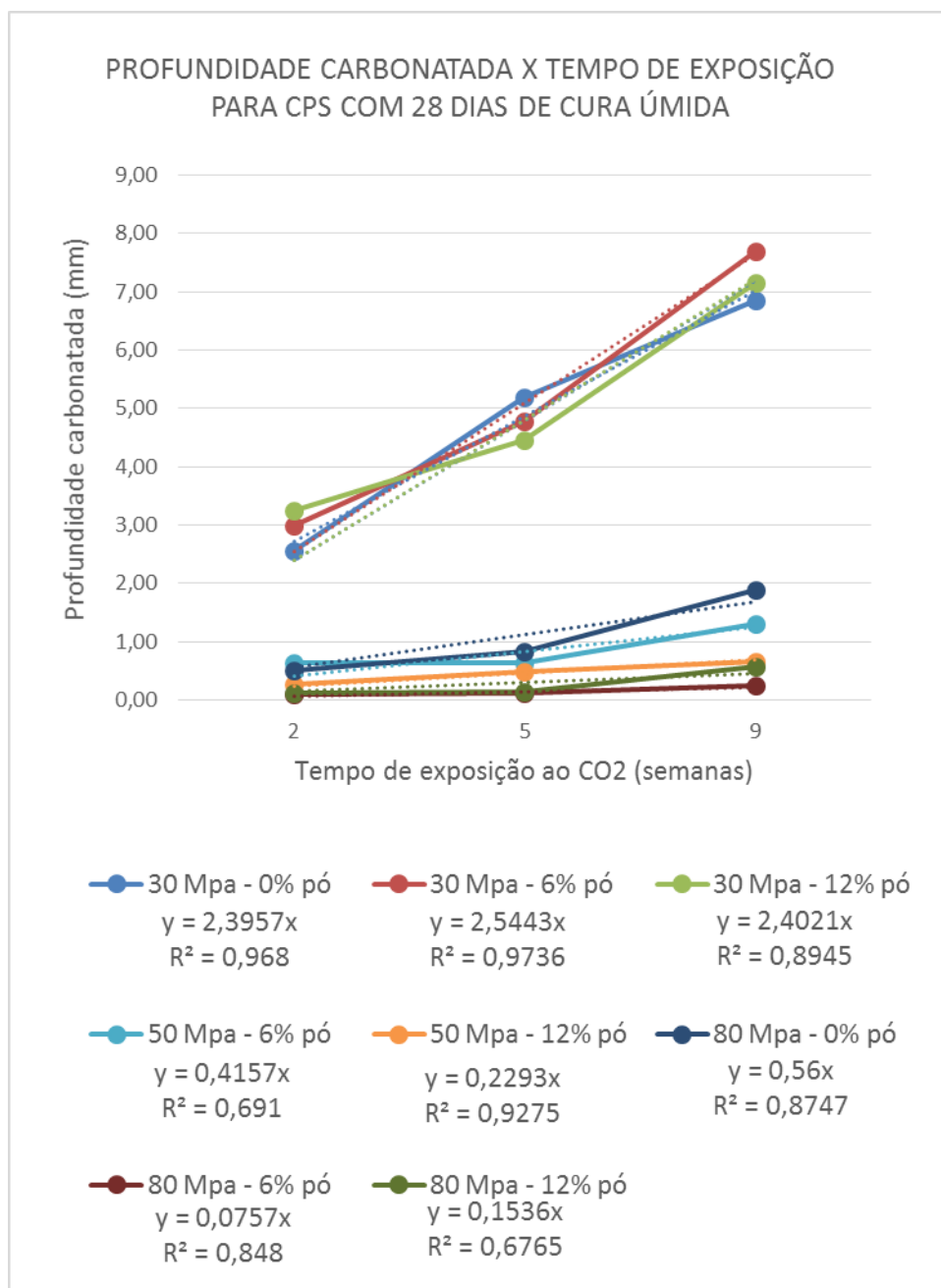
Serão apresentados os resultados das profundidades carbonatadas segundo procedimento experimental da pesquisa.

Os dados obtidos para carbonatação com cura úmida de 28 e 91 dias, através levantamento das profundidades carbonatadas com a utilização de paquímetro são apresentados nos itens 5.1.1. e 5.1.2.

#### 5.1.1. Avaliação estatística da carbonatação acelerada aos 28 dias de cura submersa

Na FIGURA 39, é apresentado o modelo de regressão linear para análise da profundidade de carbonatação ao longo do tempo para concretos com cura submersa de 28 dias. O coeficiente de determinação, também chamado de  $R^2$ , é uma medida de ajuste do modelo estatístico linear generalizado em relação aos valores observados, para os concretos sem adição de pó, seu valor é 0,968, o que indica que o modelo explicar em 97% o comportamento do material exposto ao ensaio acelerado. O coeficiente de carbonatação que caracteriza este concreto é de  $2,4\text{mm.semana}^{-0,5}$ , determinando a linha de tendência linear aplicada sobre os resultados experimentais.

FIGURA 39 – REGRESSÃO LINEAR PARA ENSAIO ACELERADO DE CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016)

Observa-se que os resultados mais satisfatórios foram para concretos com resistências de 50 Mpa com adição de 12% de pó de pedra, onde o coeficiente de carbonatação que caracteriza o concreto foi  $0,23\text{mm.semana}^{-0,5}$  e para as resistências de 80 MPa com adições de 6% de pó de pedra o coeficiente obtido foi  $0,07\text{mm.semana}^{-0,5}$ .

Além disso, possível também verificar a coerência dos resultados utilizando o modelo de Tuuti (1982) para cálculo do coeficiente de carbonatação acelerada “k”, que expressa a mesma velocidade da frente de carbonatação para cada uma das amostras, conforme QUADRO 32. Os resultados oferecem uma perspectiva de avanço da frente de carbonatação proporcional à raiz quadrada do tempo e uma constante k própria de cada material e a condição de exposição, quanto menor k, menor a probabilidade de carbonatação.

QUADRO 32 - PROFUNDIDADE CARBONATADA MÉDIA E COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO AOS 28 DIAS DE CURA SUBMERSA E 28 DIAS DE CÂMARA DE SECA.

28 dias de cura submersa e 28 dias de câmara seca				
Concreto (Mpa)	a/c	Teor de pó	Profundidade de Carbonatação	Coeficiente de carbonatação acelerada k (mm/√semana)
			63 dias = 9 semanas	
30	0,55	0%	6,86	2,3
		6%	7,69	2,6
		12%	7,16	2,4
50	0,35	0%	4,51	1,5
		6%	1,30	0,4
		12%	0,65	0,2
80	0,28	0%	1,89	0,6
		6%	0,24	0,1
		12%	0,58	0,2

FONTE: A AUTORA (2016)

Observa-se que tanto pelo modelo linear de regressão, quanto pelo cálculo do coeficiente de carbonatação acelerada, os resultados são muito próximos, ou seja, o ensaio acelerado é adequadamente representado pelos métodos.

A partir desta análise, verifica-se que o concreto de 50 MPa sem adições, apresenta resultado incoerente, devido ao fato de ser o concreto que obteve resíduo, sendo este desconsiderado.

Os concretos de 50 MPa com 6% de adição de pó de pedra e os concretos de 80 Mpa com adição de 12% de pó, foram os únicos que apresentaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) inferior a 0,8. Esta dispersão pode ser explicada por características do ambiente, pela confecção dos corpos de prova ou por inversões de comportamento da carbonatação para os dois casos.

Embora Neville (1997) sugira que a concentração de dióxido de carbono no ar para ambiente rural é próxima a 0,03%, para ambiente de laboratório 0,10% e de 0,3 à 1% em grandes cidades, as variações cíclicas ainda podem alterar a umidade em ambientes naturais influenciando na penetrabilidade do CO<sub>2</sub>. Deste modo, este estudo buscou analisar a vida útil através dos níveis de CO<sub>2</sub> mensurados por Neville (1997) e verificar a coerência dos resultados através do estudo de Ferreira (2013), que analisou por 10 anos a carbonatação no ambiente natural e obteve como fator de conversão o valor de 7,3836. Para ambas as análises, correlacionou-se o coeficiente de carbonatação acelerado “k” com o natural “k<sub>n</sub>”, e verificou-se através dos índices indicados por Neville (1997) no QUADRO 33 e por Ferreira (2013) no QUADRO 34, de modo a estimar a vida útil de projeto das estruturas para os concretos estudados.

QUADRO 33 - PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS PARA OS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA (NEVILLE, 1997) – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

28 dias de cura submersa e 28 dias de câmara seca						
Concreto (Mpa)	a/c	Teor de pó	Coeficiente de carbonatação acelerada k (mm/√semana) Câmara Carb. CO <sub>2</sub> = 6%	Coeficiente de carbonatação natural (CO <sub>2</sub> ) e Vida útil de projeto		
				Rural CO <sub>2</sub> = 0,03%	Laboratório CO <sub>2</sub> = 0,10%	Urbano CO <sub>2</sub> = 0,30%
30	0,55	0%	2,29	0,16	0,30	0,51
			Vida útil (anos)	459	138	46
		6%	2,56	0,18	0,33	0,57
			Vida útil (anos)	366	110	37
		12%	2,39	0,17	0,31	0,53
			Vida útil (anos)	420	126	42
50	0,35	0%	1,50	0,11	0,19	0,34
			Vida útil (anos)	1065	320	107
		6%	0,43	0,03	0,06	0,10
			Vida útil (anos)	12965	3890	1297
		12%	0,22	0,02	0,03	0,05
			Vida útil (anos)	49530	14859	4953
80	0,28	0%	0,63	0,04	0,08	0,14
			Vida útil (anos)	6040	1812	604
		6%	0,08	0,01	0,01	0,02
			Vida útil (anos)	374572	112372	37457
		12%	0,19	0,01	0,02	0,04
			Vida útil (anos)	66406	19922	6641

FONTE: A AUTORA (2016).

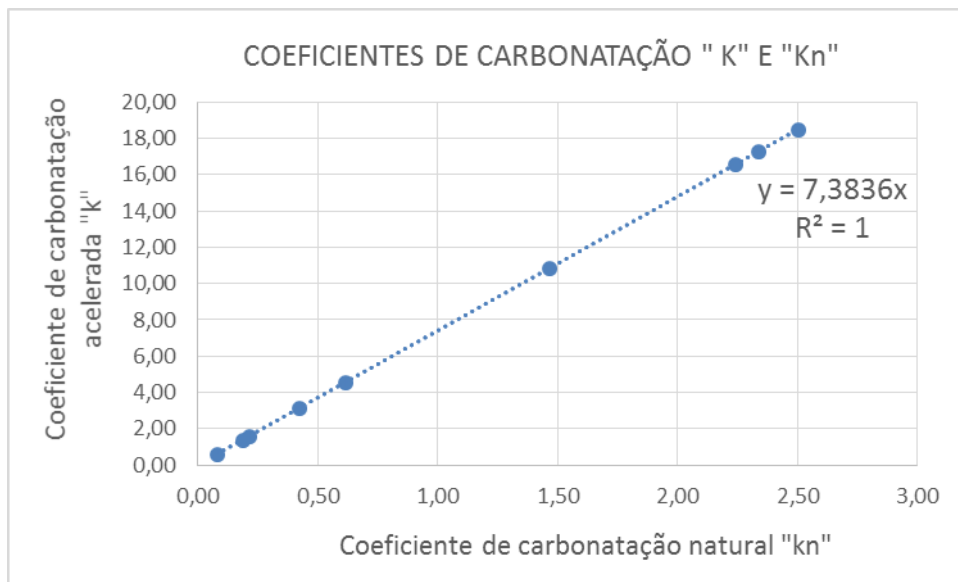
QUADRO 34 – PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS PARA OS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA (FERREIRA, 2013) - – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Coeficientes de carbonatação acelerada e natural para concretos com 28 dias de cura submersa						
Concreto (Mpa)	a/c	Teor de pó	Coeficiente de carbonatação acelerada k (mm/√semana)	Coeficiente de carbonatação acelerada k (mm/√ano)	Coeficiente de carbonatação natural kn (mm/√ano)	Vida útil pre projeto (anos)
30	0,55	0%	2,3	16,53	2,24	124,64
		6%	2,6	18,48	2,50	99,74
		12%	2,4	17,26	2,34	114,43
50	0,35	0%	1,5	10,83	1,47	290,51
		6%	0,4	3,10	0,42	3535,13
		12%	0,2	1,59	0,22	13505,06
80	0,28	0%	0,6	4,55	0,62	1646,88
		6%	0,1	0,58	0,08	102132,03
		12%	0,2	1,37	0,19	18106,51

FONTE: A AUTORA (2016)

O fator de conversão foi obtido por Ferreira (2013) através da análise de regressão linear dos coeficientes “K” e “Kn”, apresentados na FIGURA 40.

FIGURA 40 – CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA E NATURAL



FONTE: FERREIRA (2013) MODIFICIADO PELA AUTORA (2016)

Observa-se que o tempo de vida útil de Ferreira (2013) são próximos aos valores obtidos em condições de laboratório com CO<sub>2</sub> de 0,10%, ou seja, a correlação do

tempo de carbonatação natural em ambiente de laboratório com tempo de carbonatação acelerada é cerca de 60 vezes a concentração do ambiente natural.

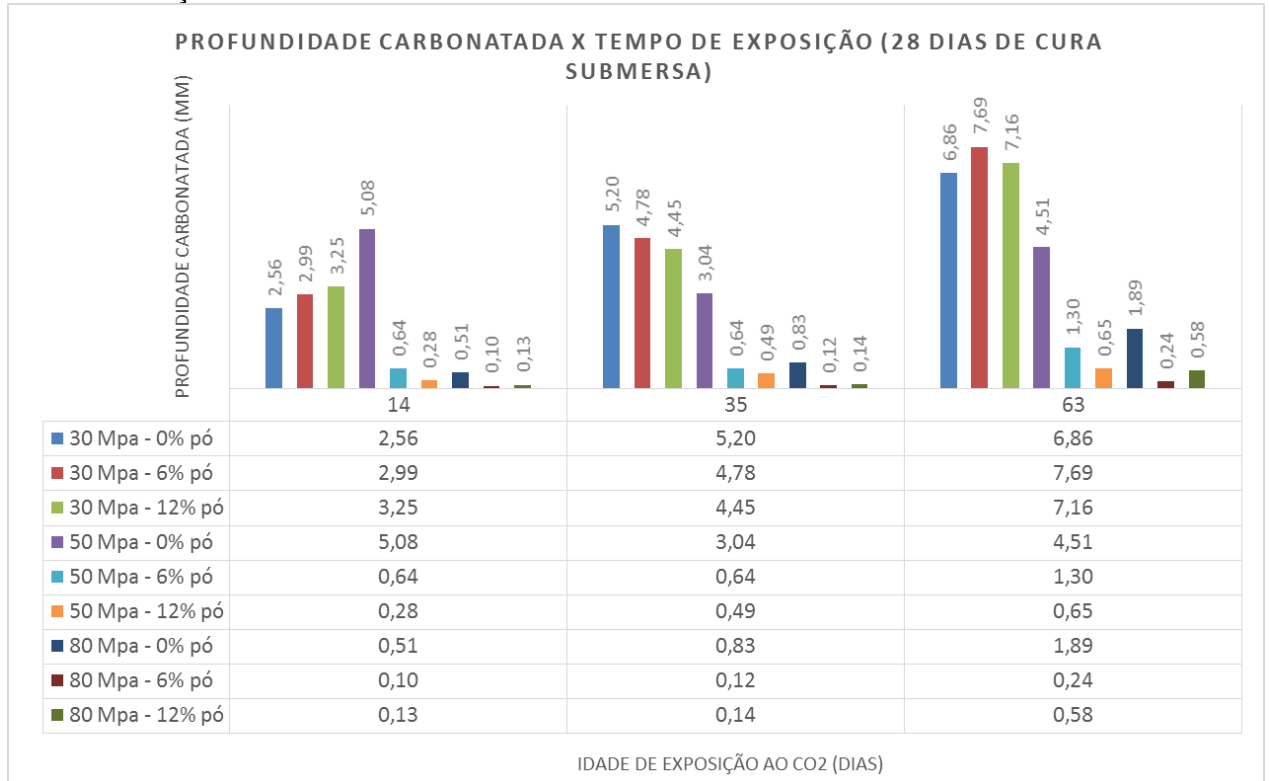
De modo geral, pode-se dizer que a velocidade do processo de carbonatação acelerada para concretos com cura submersa de 28 dias, foi cerca de 7,4 vezes a velocidade do processo natural.

Para avaliação da vida útil das estruturas de concreto armado é necessário o conhecimento da composição da mistura, tipos de materiais e proporções, bem como conhecer o meio em que será inserido. Utilizando-se a avaliação proposta por Neville diretamente, para os concretos de 30 Mpa com 0%, 6% e 12% de teores de pó de pedra, verifica-se que não atende à norma de desempenho, por exemplo, se as estruturas fossem instaladas em ambiente de concentrações de CO<sub>2</sub> da ordem de 0,30%, ou superior, porém para outros ambientes como rural e laboratório, esse critério já é atendido. É possível verificar melhores resultados para concretos o restante das amostras.

Apesar dos resultados, seria necessário um tempo maior de análises e ensaios frente à carbonatação para verificação das idades de vida útil, portanto, a elaboração desses estudos não pretende fornecer resultados precisos de previsão de vida útil, apenas mostrar a importância dos critérios de produção dos concretos, considerando os materiais empregados, métodos utilizados, meio em que as estruturas serão inseridas, visando o desempenho da estrutura como um todo.

Os resultados individuais de profundidades carbonatadas podem ser observados também nas FIGURA 41. Através de condições controladas de umidade, temperatura e exposição ao CO<sub>2</sub> chegou-se a evolução da profundidade carbonatada em relação ao tempo de exposição.

FIGURA 41 – PROFUNDIDADE CARBONATADA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA CORPOS DE PROVA COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

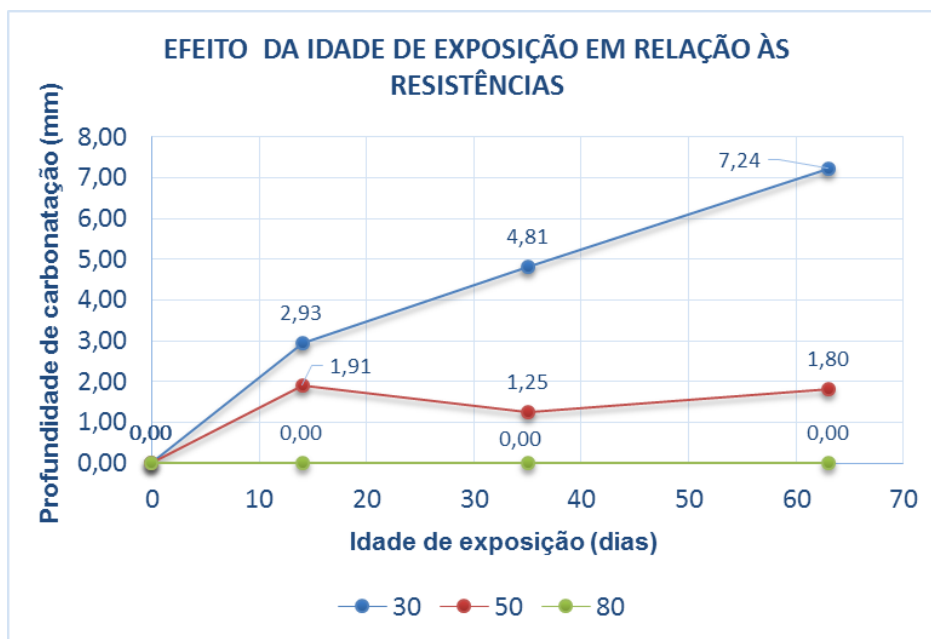


FONTE: A AUTORA (2016).

Ao comparar os teores de pó de pedra, na maioria das amostras, as profundidades carbonatadas diminuíram com o aumento do teor de pó. A utilização do pó de pedra levou a um fechamento granular adequado do concreto, reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, a penetração de CO<sub>2</sub>.

Os resultados obtidos com a carbonatação acelerada aos 28 dias de cura submersa e 28 dias em câmara de sazramento estão apresentados nas figuras abaixo. Para verificar a influência do efeito da idade de exposição dos corpos de prova em relação às resistências na FIGURA 42, para teores de pó de pedra na FIGURA 43, bem como o efeito da resistência em relação aos teores de pó de pedra na FIGURA 44.

FIGURA 42 - EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016).

Na FIGURA 42 são analisados somente as resistências e idades de exposição para resultados de profundidade de carbonatação. Observa-se que para todos os corpos de prova com resistência de 50 MPa, do início do ensaio aos 14 dias, a profundidade de carbonatação aumentou, e dos 14 aos 35 dias houve queda da profundidade de carbonatação e, posteriormente voltou a crescer. Isso se deve possivelmente ao fato de que o concreto de 50 Mpa com 0% de adição é o concreto que possui erro, acarretando em toda a análise de resultados. Apesar do pico de profundidade de carbonatação observado aos 14 dias, as amostras dos concretos com resistência de 50 Mpa tenderam ao comportamento esperado, ou seja, níveis de profundidade de carbonatação para esses concretos foram abaixo dos concretos de 30 Mpa e acima dos concretos de 80 Mpa, provavelmente devido às diferenças das características da microestrutura.

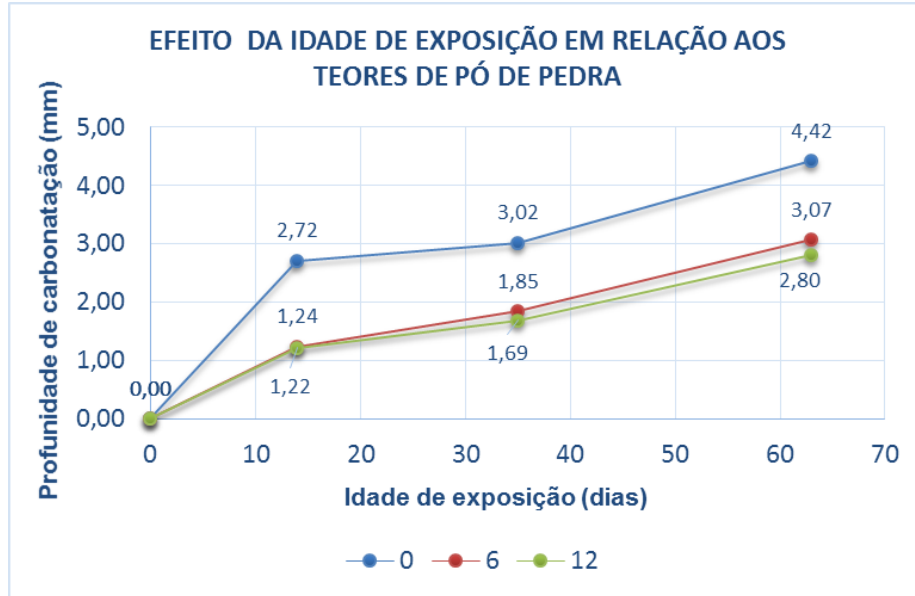
Para os concretos de 50 MPa e 30 MPa, há um acréscimo linear de profundidade de carbonatação conforme a idade de exposição avança, e notar que há uma redução considerável da profundidade carbonatada com o aumento da resistência.

A FIGURA 43 apresenta o efeito apenas da idade de exposição em relação aos teores de pó de pedra, não sendo levado em consideração as resistências, o que permitiu verificar que ao adicionar teores de pó há melhora considerável em relação



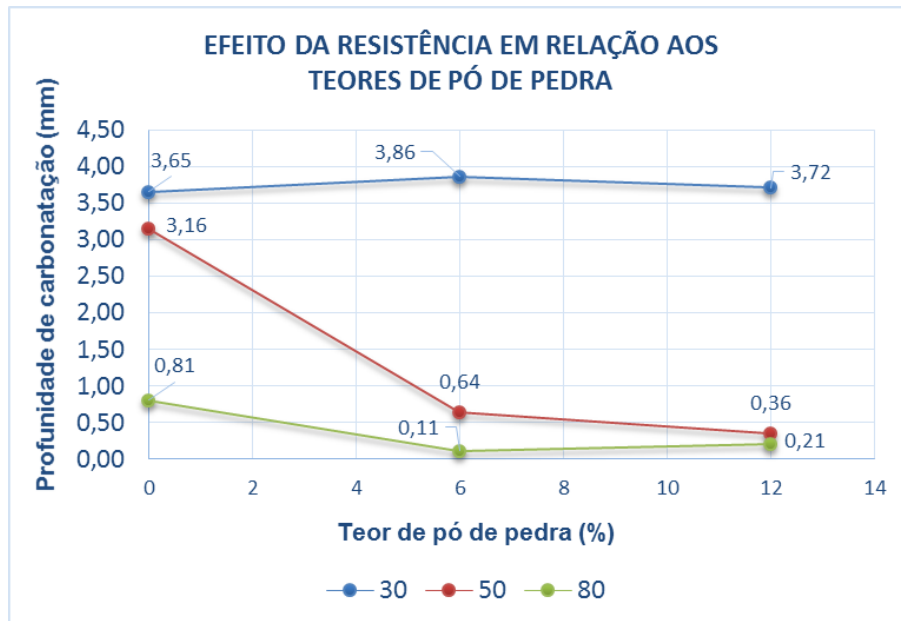
ao incremento da frente de carbonatação. Também é possível verificar que para teores de 6% e 12% a diferença em relação à profundidade carbonatada não é considerável.

FIGURA 43 - EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ DE PEDRA PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016).

FIGURA 44 - EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ DE PEDRA PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016).

A FIGURA 44 não leva em consideração as idades de exposição, apenas estudada a influência das resistências em relação aos teores de pó de pedra.

Nota-se que conforme avança o teor de pó de pedra empregado na mistura, tem-se um decréscimo da profundidade carbonatada. Essa diferença não se torna muito significativa em relação ao concreto de 30 MPa devido a particularidades do material como: maior índice de vazios, tornado as resistências inferiores quando comparadas às demais amostras. Em relação aos concretos de 50 MPa e 80 MPa, verifica-se que o teor ótimo de calcário pulverizado adicionados à mistura gira em torno de 12%, visto a proximidade dos resultados obtidos para a frente de carbonatação para esses concretos.

QUADRO 35 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA CARBONATAÇÃO ACELERADA PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.	COMPARAÇÃO
<b>IDADES DE EXPOSIÇÃO (A)</b>	1633,10	3	544,37	193,55	2,61	Efeito correspondente é significativo
<b>RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM MPa (B)</b>	2151,16	2	1075,58	382,43	3,00	Efeito correspondente é significativo
<b>% PÓ DE PEDRA (C)</b>	269,18	2	134,59	47,85	3,00	Efeito correspondente é significativo
<b>AB</b>	1186,00	6	197,67	70,28	2,11	Efeito correspondente é significativo
<b>AC</b>	93,33	6	15,56	5,53	2,11	Efeito correspondente é significativo
<b>BC</b>	336,79	4	84,20	29,94	2,38	Efeito correspondente é significativo
<b>ABC</b>	192,59	12	16,05	5,71	1,76	Efeito correspondente é significativo
<b>Erro</b>	2936,24	1044	2,81			
<b>Total</b>	8798,39	1079				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)

A ANOVA, com nível de significância de 95%, realizada com base nos dados de carbonatação apresentada no

QUADRO 35 comprova, estatisticamente, que há influência da idade de exposição e da resistência do concreto frente à profundidade de carbonatação. Esse nível de significância já era esperado e observado na bibliografia. Quanto mais tempo o concreto estiver exposto ao CO<sub>2</sub>, maiores serão as profundidades carbonatadas. A difusão do CO<sub>2</sub> da atmosfera na fase gasosa é o ponto inicial para que ocorra a carbonatação, quanto maior for o tempo de exposição, maior será essa difusão. Quanto à resistência, a estrutura e tamanho dos poros determina a qualidade potencial do material, dentre os parâmetros considerados no proporcionamento do concreto, o efeito da relação a/c na profundidade de carbonatação é o mais pronunciado (BAKKER, 1988, apud KULAKOWSKI 2002). Assim, era esperado que concretos de alta resistência apresentassem menores profundidades de carbonatação.

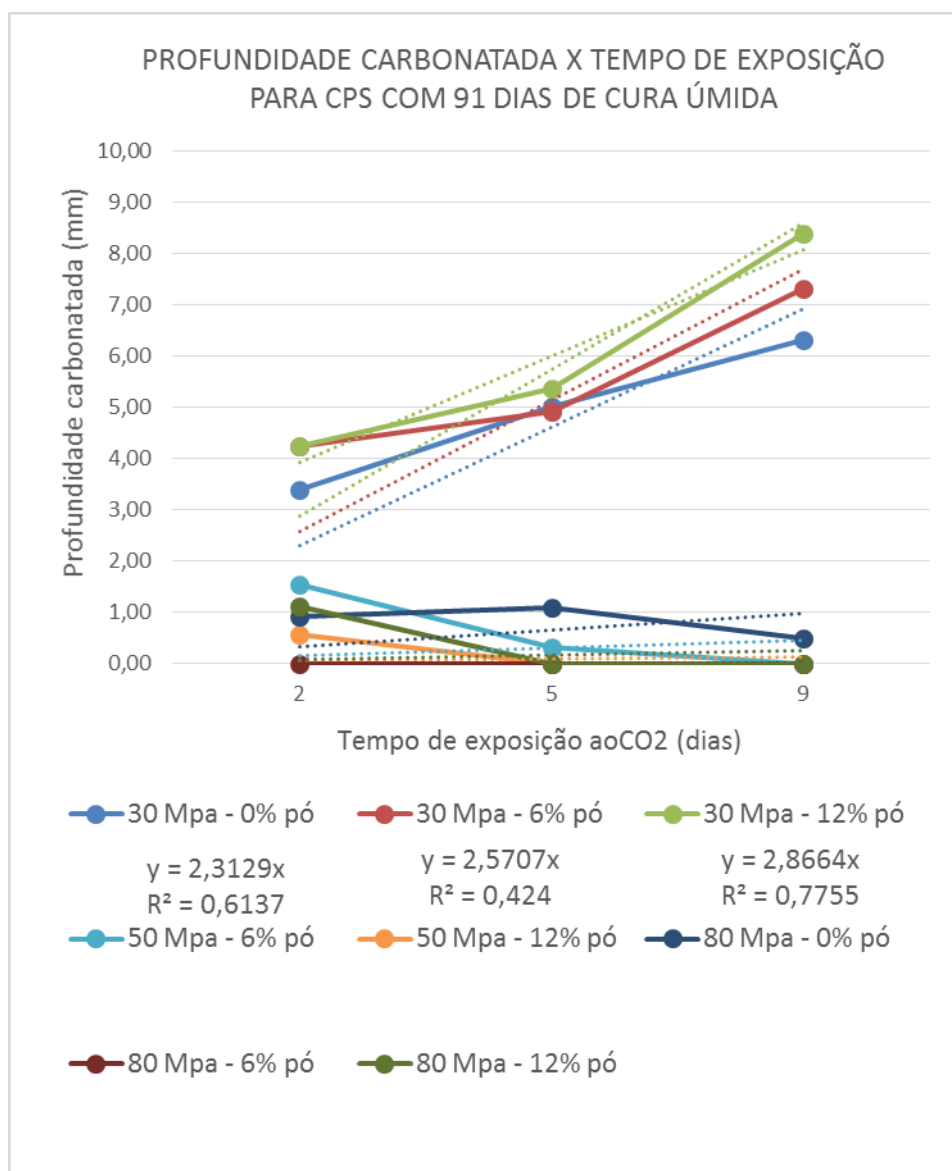
A terceira variável analisada, o teor de pó de pedra, também apresentou efeito significativo. Conforme apresentado anteriormente, os concretos com pó de pedra apresentaram profundidades de carbonatação inferiores. Isso ocorreu devido ao fechamento granular obtido com a utilização do pó, devido a curva granulométrica diferente dos outros materiais. O empacotamento de partículas consiste na utilização de materiais com diferentes tamanhos, assim, o menor preencherá os vazios deixados pelo maior, sucessivamente. É importante ressaltar, que a substituição do cimento pelo pó de pedra em teores elevados pode levar a redução do pH do concreto.

#### **5.1.2. Avaliação estatística da carbonatação acelerada aos 91 dias de cura submersa**

As análises de profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias de cura submersa segue o mesmo padrão das análises aos 28 dias de cura submersa. Na FIGURA 45 é apresentado o modelo de regressão linear para as análises da profundidade de carbonatação ao longo do tempo. O coeficiente R<sup>2</sup> para concretos sem adição de pó apresentou resultados relativamente baixos. Os corpos de prova de 50 MPa e 80 MPa obtiveram valores muito baixos, próximo a zero para a análise, não

sendo possível formar uma regressão linear clara. Desta maneira os resultados serão analisados através do modelo de Tuutti (1982) para o cálculo do coeficiente de carbonatação acelerada “k” conforme o QUADRO 36.

FIGURA 45 – REGRESSÃO LINEAR PARA ENSAIO ACELERADO DE CONCRETOS COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016)

Observa-se que para os concretos com resistência de 30 MPa, no início do ensaio de carbonatação as amostras sem adição possuem profundidades de carbonatação

menos acentuadas e prosseguem desta maneira, sendo para esses concretos o teor de pó não significativo.

Já para os concretos de elevada resistência com adição de pó de pedra, a profundidade de carbonatação inicial são superiores aos sem adição, porém no decorrer do tempo de exposição, tendem a progredir mais lentamente, aproximando-se de nulas, quando comparado às amostras sem adição.

QUADRO 36 - PROFUNDIDADE CARBONATADA E COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO AOS 91 DIAS DE CURA SUBMERSA E 28 DIAS DE CÂMARA DE SECA

91 dias de cura submersa e 28 dias de câmara seca				
Concreto (Mpa)	a/c	Teor de pó	Profundidade de Carbonatação	Coeficiente de carbonatação acelerada k (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ )
			63 dias = 9 semanas	
30	0,55	0%	6,32	2,1
		6%	7,31	2,4
		12%	8,39	2,8
50	0,35	0%	1,64	0,5
		6%	0,00	0,0
		12%	0,00	0,0
80	0,28	0%	0,48	0,2
		6%	0,00	0,0
		12%	0,00	0,0

FONTE: A AUTORA (2016)

Conforme já mencionado, para os concretos de 50 MPa e 80 MPa, com cura submersa de 91 dias, os resultados frente à carbonatação são melhores, visto um tempo maior para hidratação dos componentes do concreto, obtendo-se resultados menores quanto maior for o tempo em imersão. Para os concretos de 30 MPa, os ciclos de cura não parecem ter influenciado a profundidade de carbonatação.

A partir dos resultados obtidos para o coeficiente “k”, é possível prever a vida útil das estruturas compostas desses concretos através dos índices mencionados por Neville (1997), no QUADRO 37 e pelo resultado obtido no trabalho de Ferreira (2013), QUADRO 38.

QUADRO 37 - PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS PARA OS CONCRETOS COM 91 DIAS DE CURA (NEVILLE, 1997) – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

91 dias de cura submersa e 28 dias de câmara seca						
Concreto (Mpa)	a/c	Teor de pó	Coeficiente de carbonatação acelerada k (mm/√semana) Câmara Carb. CO <sub>2</sub> = 6%	Coeficiente de carbonatação natural (CO <sub>2</sub> ) e Vida útil de projeto		
				Rural CO <sub>2</sub> = 0,03%	Laboratório CO <sub>2</sub> = 0,10%	Urbano CO <sub>2</sub> = 0,30%
30	0,55	0%	2,11	0,15	0,27	0,47
			Vida útil (anos)	538	162	54
		6%	2,44	0,17	0,32	0,55
			Vida útil (anos)	403	121	40
		12%	2,80	0,20	0,36	0,63
			Vida útil (anos)	306	92	31
50	0,35	0%	0,55	0,04	0,07	0,12
			Vida útil (anos)	7925	2377	792
		6%	0,00	0,00	0,00	0,00
			Vida útil (anos)	-	-	-
		12%	0,00	0,00	0,00	0,00
			Vida útil (anos)	-	-	-
80	0,28	0%	0,16	0,01	0,02	0,04
			Vida útil (anos)	93643	28093	9364
		6%	0,00	0,00	0,00	0,00
			Vida útil (anos)	-	-	-
		12%	0,00	0,00	0,00	0,00
			Vida útil (anos)	-	-	-

FONTE: A AUTORA (2016).

QUADRO 38 - PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS PARA OS CONCRETOS COM 91 DIAS DE CURA (FERREIRA, 2013) – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Coeficientes de carbonatação acelerada e natural para concretos com 91 dias de cura submersa						
Concreto (Mpa)	a/c	Teor de pó	Coeficiente de carbonatação acelerada k (mm/√semana)	Coeficiente de carbonatação acelerada k (mm/√ano)	Coeficiente de carbonatação natural kn (mm/√ano)	Vida útil pre projeto (anos)
30	0,55	0%	2,1	15,23	2,06	146,82
		6%	2,4	17,62	2,39	109,79
		12%	2,8	20,22	2,74	83,37
50	0,35	0%	0,6	3,97	0,54	2160,81
		6%	0,0	0,00	0,00	imensurável
		12%	0,0	0,00	0,00	imensurável
80	0,28	0%	0,2	1,16	0,16	25533,01
		6%	0,0	0,00	0,00	imensurável
		12%	0,0	0,00	0,00	imensurável

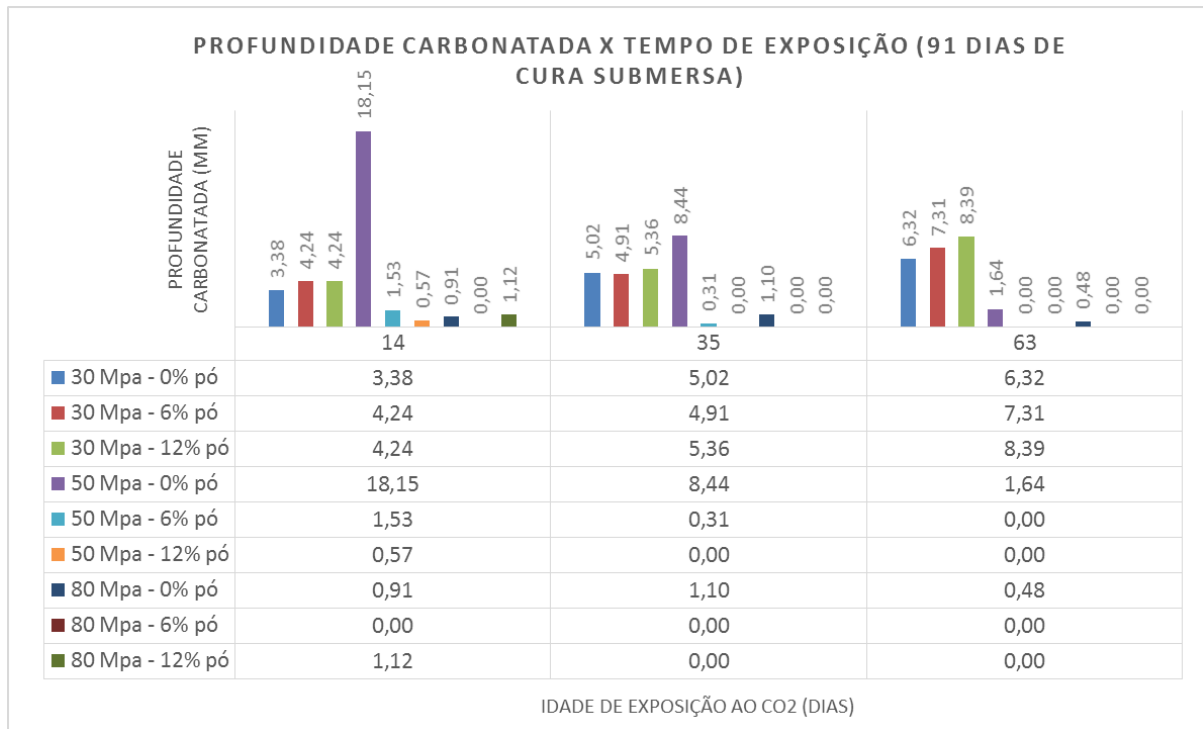
FONTE: A AUTORA (2016).

Como era de se esperar, a previsão de vida útil de Ferreira (2013) é próxima aos valores de laboratório de Neville (1997), desta forma a correlação entre os ambientes permanece a mesma dos concretos de 28 dias de cura submersa, sendo 60 vezes a concentração ao ambiente natural.

Observa-se que para concretos de 30 Mpa em ambiente urbano, ainda não se obtém resultados abrangidos pela norma, como é o caso dos concretos com teores de 6% e 12% de pó, que respectivamente atingiram 40 e 31 anos, não sendo viável sua utilização na prática.

É possível verificar na FIGURA 46, a profundidade e evolução da carbonatação em relação aos concretos com cura de 91 dias submersa.

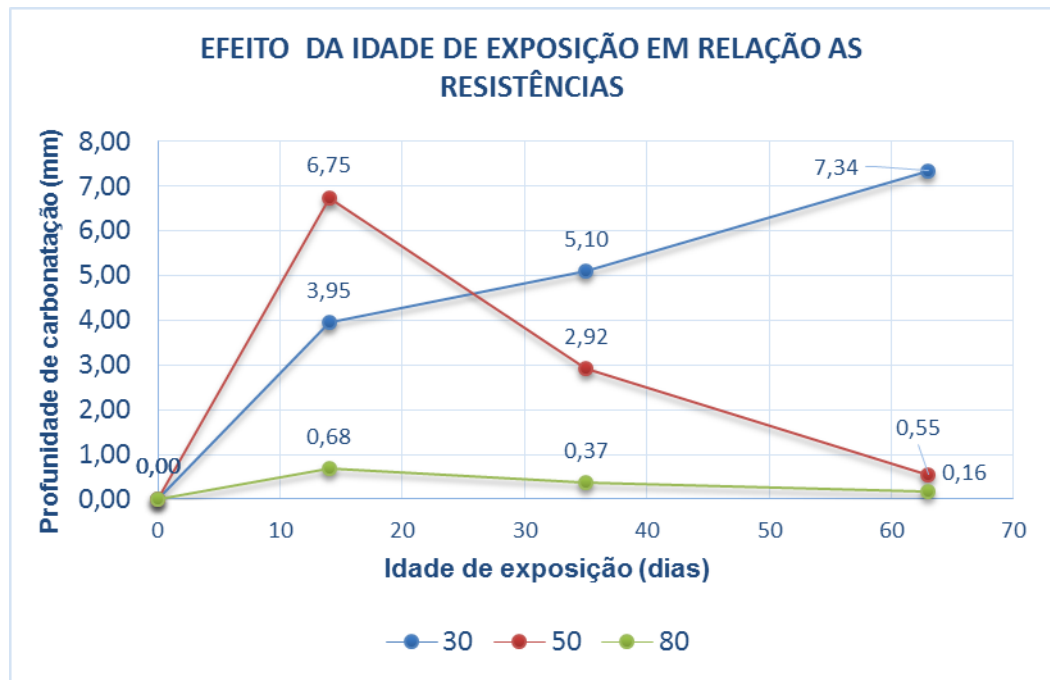
FIGURA 46 - PROFUNDIDADE CARBONATADA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA CORPOS DE PROVA COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016)

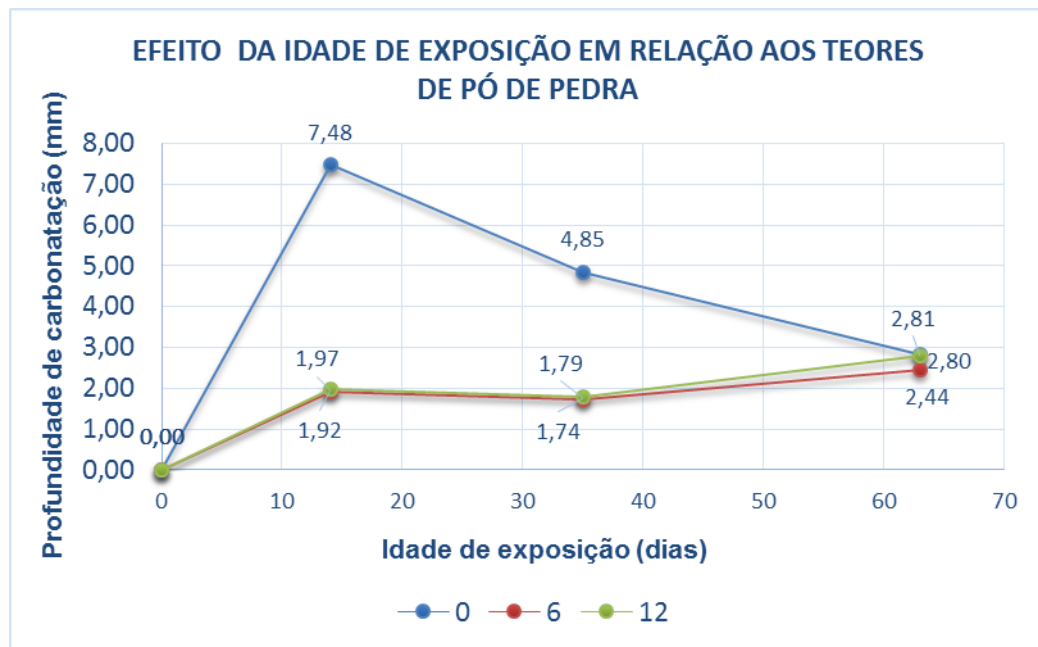
Observa-se que comparando as classes de resistência, percebe-se a redução da profundidade carbonatada com o aumento da resistência, conforme era esperado. Com o aumento da resistência, menos poros estarão presentes na microestrutura do concreto, conseqüentemente mais difícil será a penetração do CO<sub>2</sub>. Também tem-se que o erro obtido para o concreto de 50 Mpa com 0% de teor de pó, prossegue.

QUADRO 39 – EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 91 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016).

QUADRO 40 – EFEITO DOS TEORES DE PÓ EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 91 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016)

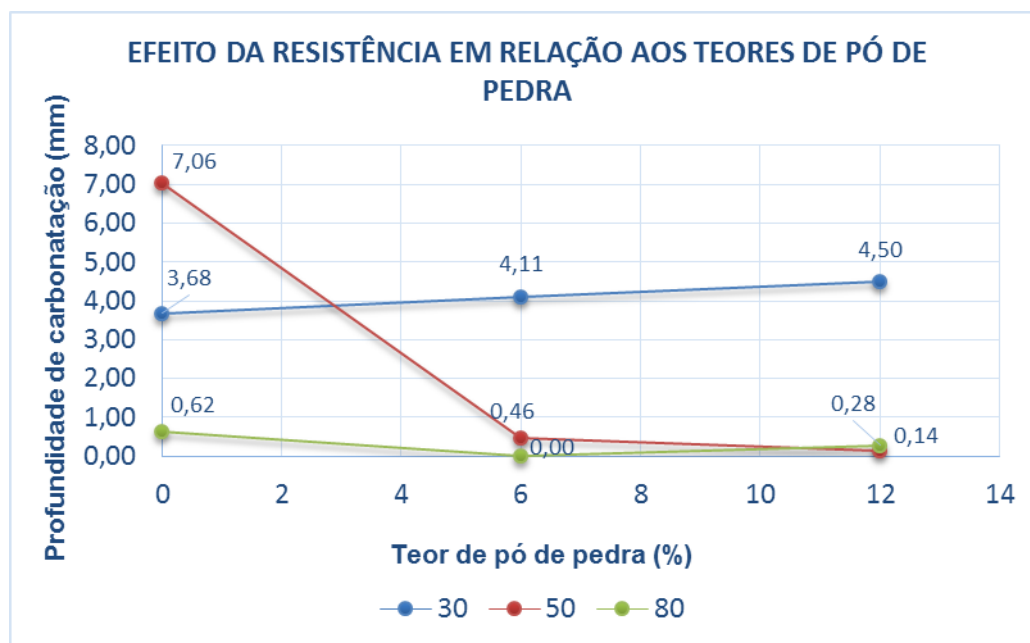
De acordo com o QUADRO 39, é possível notar que nos primeiros dias de exposição houve um acréscimo de profundidade de carbonatação, porém no decorrer



do ensaio, observa-se que para os concretos de 50 Mpa e 80 Mpa, houve uma redução considerável da profundidade de carbonatação conforme o ensaio foi avançando. Apenas para os concretos de 30 Mpa essa profundidade avançou, o que pode-se dizer que a resistência tem efeito significativo em relação às idades de exposição.

Levando-se em consideração apenas a idade de exposição e as adições, verificou-se a profundidade de carbonatação das amostras. Notou-se que ambos os concretos com teores de pó variados, para os últimos dias de ensaio, tenderam a se aproximar, obtendo-se valores bem parecidos de profundidade de carbonatação. Também se verifica que os concretos com 0% de pó foram os que obtiveram maiores valores para a frente de carbonatação, já para 6% e 12% de teores de pó, tenderam a registrar valores próximos, significando que com a adição de pó de pedra às amostras de concreto é possível reduzir significativamente a profundidade de carbonatação. No QUADRO 41, verifica-se que concretos com teores de 0% de pó tendem a fornecer resultados mais críticos em relação à carbonatação, exceto para os concretos de 30 Mpa.

QUADRO 41 – EFEITO DAS RESISTÊNCIAS EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ PARA CONCRETOS COM CURA SUBMERSA DE 91 DIAS – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO



FONTE: A AUTORA (2016).

No QUADRO 42 é apresentada a análise de variância, com nível de significância de 95%, realizada com base nos dados de carbonatação.

QUADRO 42 – ANOVA PARA CONCRETOS COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.	COMPARAÇÃO
<b>IDADES DE EXPOSIÇÃO (A)</b>	2133,58	3	711,19	146,45	2,61	Efeito correspondente é significativo
<b>RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM MPa (B)</b>	2623,40	2	1311,70	270,11	3,00	Efeito correspondente é significativo
<b>% PÓ DE PEDRA (C)</b>	1168,88	2	584,44	120,35	3,00	Efeito correspondente é significativo
<b>AB</b>	2981,20	6	496,87	102,32	2,11	Efeito correspondente é significativo
<b>AC</b>	1247,38	6	207,90	42,81	2,11	Efeito correspondente é significativo
<b>BC</b>	2552,66	4	638,17	131,41	2,38	Efeito correspondente é significativo
<b>ABC</b>	2452,47	12	204,37	42,09	1,76	Efeito correspondente é significativo
<b>Erro</b>	5069,81	1044	4,86			
<b>Total</b>	20229,39	1079				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)

Através da análise da anova, verificou-se que há significância entre os fatores analisados para os concretos com 91 dias de cura, como era esperado, nas análises para concretos com 28 dias de cura. Observa-se que há uma correlação entre as análises.

De modo geral, é possível observar que para os concretos com resistência de 30 MPa, houve uma tendência de piora do desempenho global no tocante à carbonatação com a incorporação de pó. Porém quando se agrega teores de pó de 6% e 12% aos

concretos com resistência maiores, 50 MPa e 80 MPa, há significativa melhora no desempenho desses corpos de prova frente à carbonatação, visto que para esses concretos alguns valores foram nulos. Também se chega à conclusão de que os resultados obtidos foram melhores para os concretos de maiores resistências com cura submersa aos 91 dias, visto a hidratação dos componentes do concreto. Já para os concretos de 30 MPa o tempo de cura pouco influenciou em relação à 28 ou 91 dias.

Acrescenta-se ainda que, a variabilidade das medidas das profundidades de carbonatação em concreto, realizadas no ensaio, pode ser atribuída à dificuldade de realizar-se as leituras nos corpos de prova, em função da presença do agregado graúdo, e conseqüentemente à zona de transição pasta/agregado graúdo, levando a um comportamento diferenciado quanto a penetração de CO<sub>2</sub> na microestrutura do concreto.

## 5.2. MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

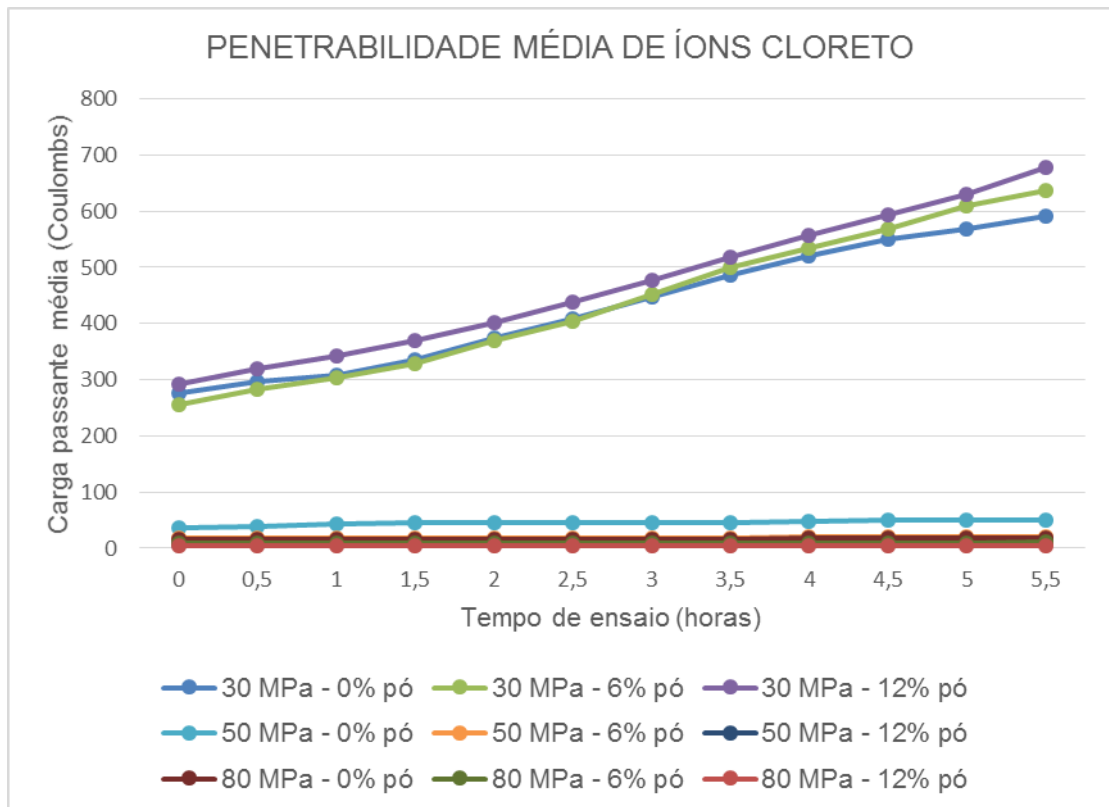
Os resultados de penetrabilidade de íons cloretos obtidos no ensaio de migração de íons cloreto aos 91 dias de cura submersa, submetidos aos procedimentos de ensaios de laboratório, são apresentados no QUADRO 43 e FIGURA 47.

QUADRO 43 – PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETO VERIFICADOS PELA CARGA PASSANTE ACUMULADA

CARGA PASSANTE ACUMULADA (Coulombs)									
IDADE	0% pó			6% pó			12% pó		
	30 MPa	50 MPa	80 MPa	30 MPa	50 MPa	80 MPa	30 MPa	50 MPa	80 MPa
91 dias	1511,55	537,75	37,52	1329,75	225,43	21,25	1210,50	31,75	15,09
	Baixa	Muito baixa	Negligenciável	Baixa	Muito Baixa	Negligenciável	Baixa	Negligenciável	Negligenciável

FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 47 – PENETRABILIDADE MÉDIA DE ÍONS CLORETO AOS 91 DIAS



FONTE: A AUTORA (2016)

Os resultados indicam que quanto maior é o período de ensaio, menor é a resistência à penetração de íons cloreto no concreto, isto é, maior a carga passante. Nos concretos de 0% de adição de pó para 50 MPa e 80 MPa, a penetrabilidade média dos íons foi significativamente maior, deste modo, pode-se dizer que a adição de pó às amostras reduz a penetrabilidade e o efeito dos mecanismos de transporte, mas não apenas dos cloretos, mas de outras substâncias dissolvidas, como líquidos em geral e de gases, através estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. Embora nem todos os íons cloreto que penetram no concreto permanecem livres na solução dos poros, alguns reagem com os produtos hidratados e formam cloroaluminato hidratado, outros são absorvidos por vários hidratos do cimento, sendo que a porção que permanece livre que causa danos às estruturas de concreto.

Para análise da comparativa dos fatores de ensaio, realizou-se estudo da ANOVA apresentada no QUADRO 44, com nível de significância de 95%.

QUADRO 44 – ANOVA PARA MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
Teores de Pó (A)	5515,38	2	2757,69	0,37	3,02	Não há diferenças significativas
Resistências (B)	17615544,02	2	8807772,01	1176,82	3,02	Há diferenças significativas
AB	71735,78	4	17933,95	2,40	2,39	Há diferenças significativas
Erro	3165894,71	423	7484,38			
Total	20858689,90	431				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)

De acordo com a anova, para o ensaio de migração de íons cloreto o efeito do pó de pedra não foi significativo, ou seja, a avaliação da durabilidade com o emprego do pó de pedra em substituição aos finos, não se apresenta como fator relevante na análise. Já a análise em relação às resistências do concreto apresentou-se significativa, ou seja, demonstra uma tendência de diminuição da influência da migração de íons cloreto para concretos com relação água/aglomerante maiores.

### 5.3. PERMEABILIDADE

A partir dos resultados obtidos, foi possível realizar a análise estatística através da análise de variância, apresentadas nos itens 5.3.1. e 5.3.2. As avaliações foram feitas para concretos retirados da cura, apresentados no QUADRO 45, para concretos que passaram pela câmara de sazonalização e acompanharam o ensaio de carbonatação, para concretos com cura aos 28 dias, QUADRO 46, e 91 dias, QUADRO 47.

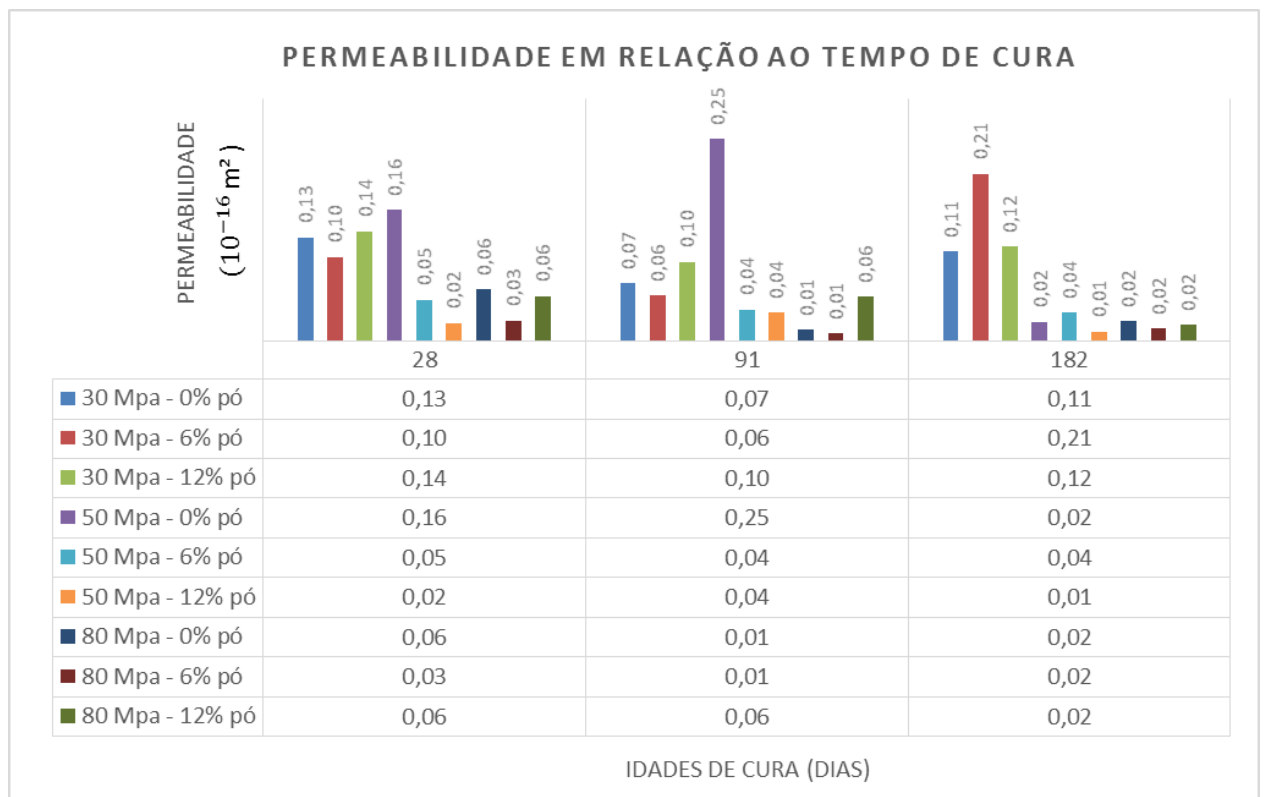
O que se espera no geral, é a redução da porosidade dos concretos, por ser fator importante para a durabilidade, já que os mecanismos de transportes de massa associados à entrada de agentes agressivos no concreto são afetados por essa

propriedade, porém dependem também do tamanho, distribuição, forma, tortuosidade e conectividades dos poros presentes na microestrutura do concreto, podendo ser observados nas análises que seguem.

### 5.3.1. Avaliação estatística da permeabilidade dos corpos de prova logo após a cura

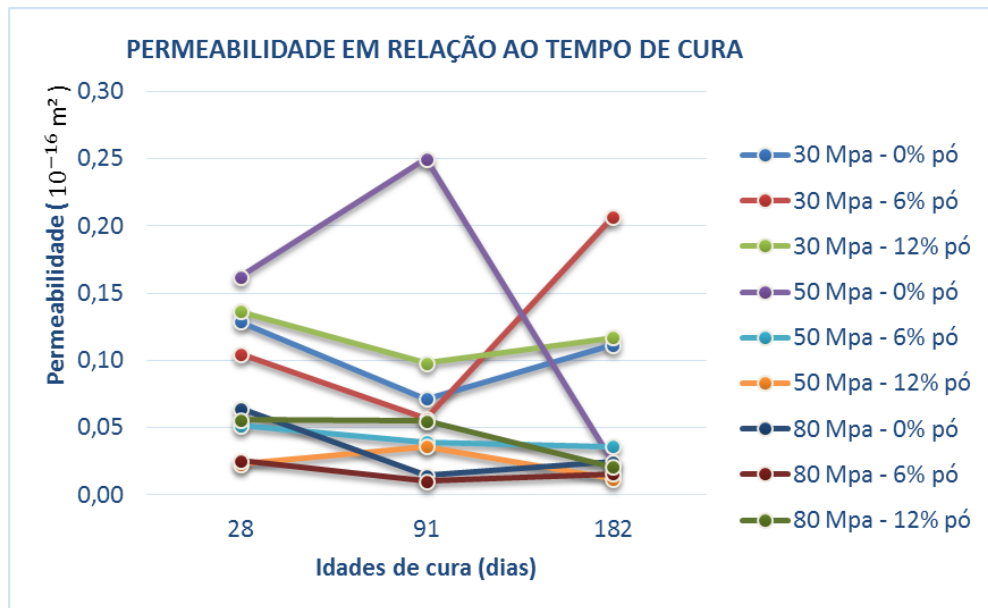
A FIGURA 48 apresenta os resultados de permeabilidade das amostras de concreto logo após a cura. Assim que as amostras atingiram o tempo de cura desejado (28, 91 e 182 dias), estas foram retiradas do recipiente onde estavam armazenadas e foram encaminhadas para estufas à 60°C por 48 horas, para secagem, de modo que o ensaio de permeabilidade ao ar pudesse ser realizado.

FIGURA 48 – PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA



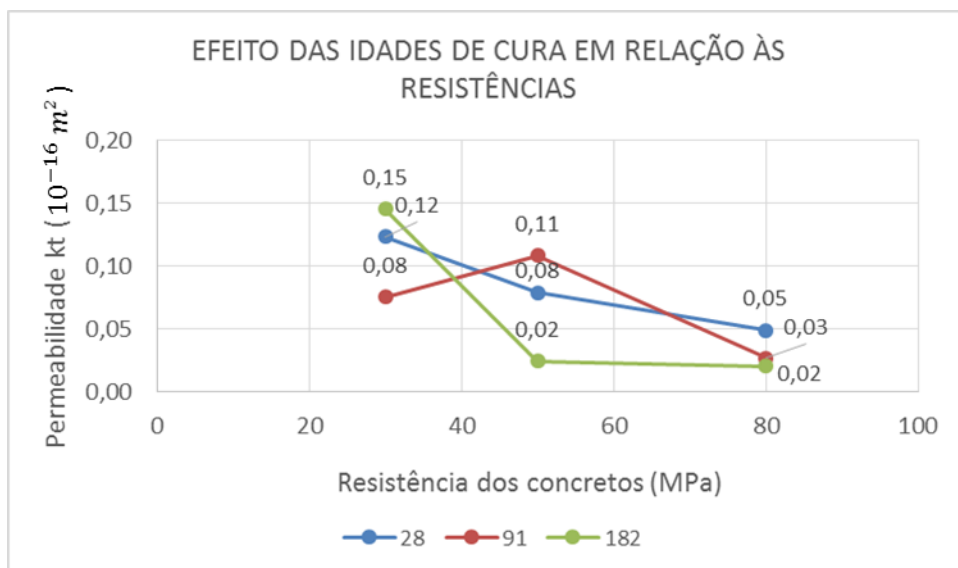
FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 49 – EVOLUÇÃO DA PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA



FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 50 – EFEITO DAS IDADES DE CURA EM RELAÇÃO ÀS RESISTÊNCIAS – ENSAIO DE PERMEABILIDADE

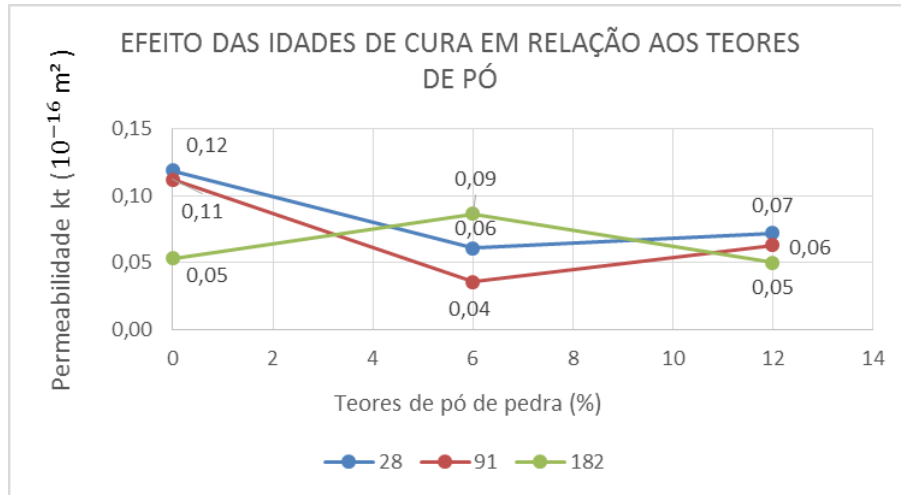


FONTE: A AUTORA (2016)

É possível observar na FIGURA 49 e na FIGURA 50, que tanto a resistência do concreto quanto o tempo de cura, influenciam na porosidade. Quanto maior a resistência, menor a influência da permeabilidade do concreto ao ar. Porém, o tempo de cura de 28 e 91 dias foram mais significativos para o estudo que o tempo de cura de 182 dias, que obteve um pico de permeabilidade quando se empregou teor de pó

6%, já para as amostras sem adição e as com emprego de 12% de pó de pedra os valores forma os mais significativos de todos os traços, apresentados na FIGURA 51.

FIGURA 51 – EFEITO DAS IDADES DE CURA EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ – ENSAIO DE PERMEABILIDADE



FONTE: A AUTORA (2016)

QUADRO 45 – ANOVA PARA PERMEABILIDADE LOGO APÓS A CURA

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.	COMPARAÇÃO
<b>IDADES DE CURA (A)</b>	0,01	2,00	0,00	0,76	3,17	Não há diferenças significativas
<b>RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM Mpa (B)</b>	0,09	2,00	0,05	12,02	3,17	Há diferenças significativas
<b>% PÓ DE PEDRA (C)</b>	0,02	2,00	0,01	2,61	3,17	Não há diferenças significativas
<b>AB</b>	0,05	4,00	0,01	3,51	2,54	Há diferenças significativas
<b>AC</b>	0,03	4,00	0,01	2,03	2,54	Não há diferenças significativas
<b>BC</b>	0,06	4,00	0,02	4,05	2,54	Há diferenças significativas
<b>ABC</b>	0,04	8,00	0,00	1,23	2,12	Não há diferenças significativas
<b>Erro</b>	0,21	54,00	0,00			
<b>Total</b>	0,51	80,00				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)



A análise de variância (QUADRO 45) da permeabilidade, como já esperado, apresentou valores significativos em relação às resistências do concreto com variação do tempo de cura e teores de pó de pedra, como analisado. Com a redução do diâmetro dos poros e sua interconectividade no interior do concreto, as partículas finas diminuem a exsudação interna e superficial da mistura, gerando zonas de transição com porosidade reduzida (AITCIN, 2000).

De modo geral, é possível verificar que com a relação água/aglomerante mais baixa, há uma redução significativa da permeabilidade, bem como para tempos de cura maiores, isto se deve ao fato de que a quantidade de poros capilares na pasta de concreto é reduzida, devido à realização de cura adequada, visto os poros serem resultantes da evaporação da água capilar.

### **5.3.2. Avaliação estatística da permeabilidade dos corpos de prova com 60% de umidade**

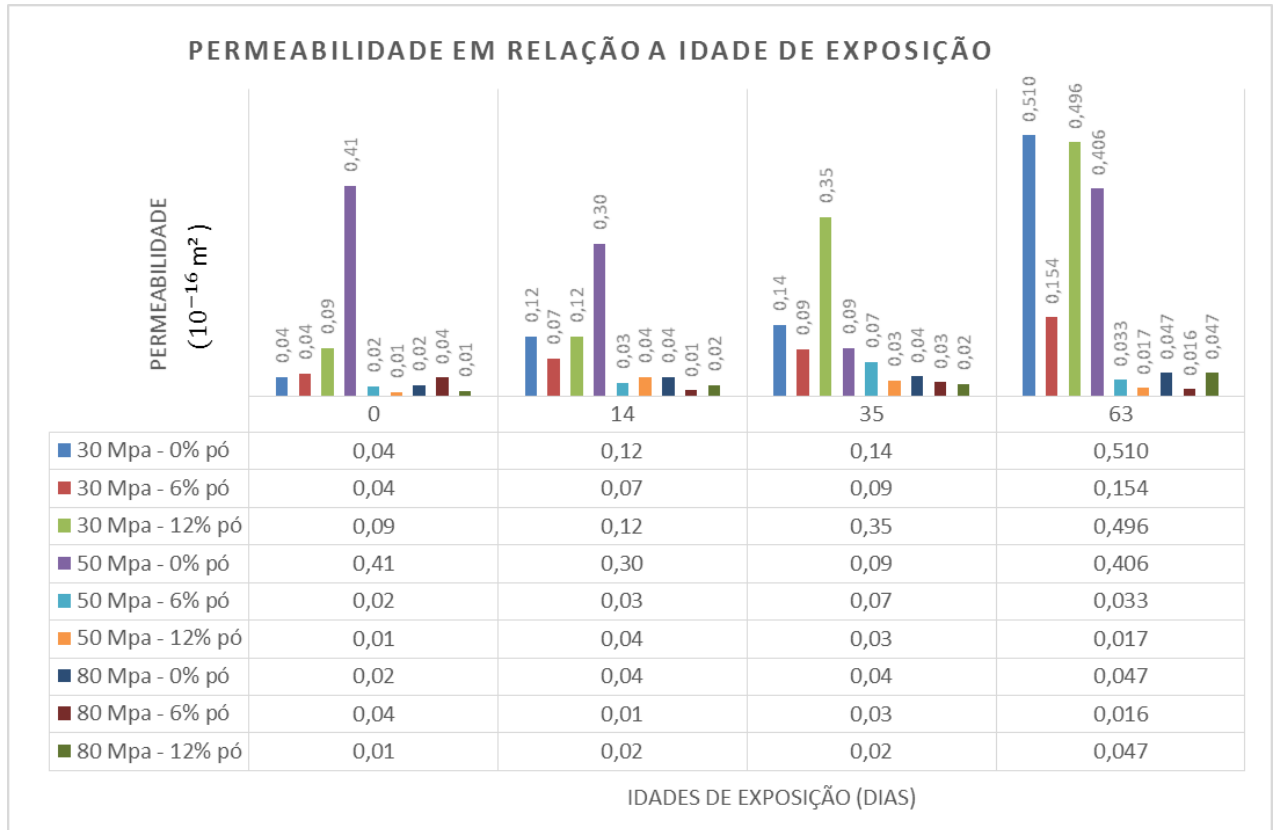
- **Corpos de prova com cura aos 28 dias**

A FIGURA 52 apresenta os resultados do ensaio à permeabilidade ao ar, onde é possível verificar a influência das resistências do concreto e teores de adição de pó de pedra em relação à permeabilidade.

Observa-se que a relação água/aglomerante influenciou nos resultados da permeabilidade das amostras estudadas. Para os concretos de 30 MPa com adições de 6% de adição de pó os resultados foram mais significantes que para os teores de 12% de pó. Já para os concretos de 50 MPa e 80 MPa as substituições de 6% e 12% de pó ao cimento ofereceram bons resultados.

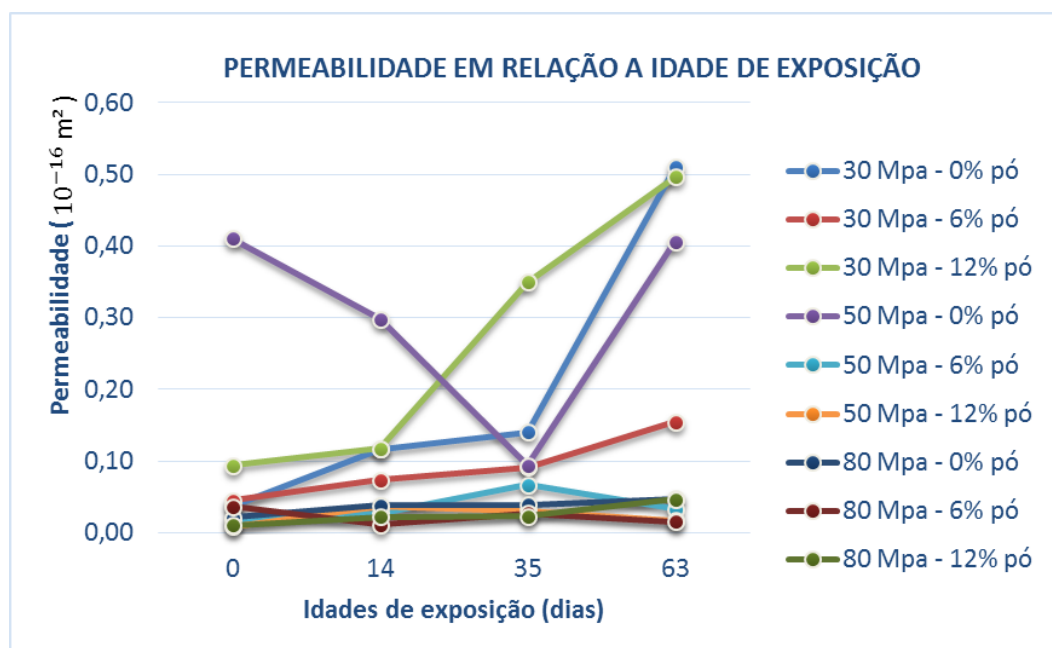
Pode-se dizer que as menores relações de a/a obtiveram menores resultados de penetração ao ar. Também é possível verificar que para as amostras aos 63 dias em exposição ao CO<sub>2</sub> a permeabilidade aumentou, isso devido ao processo de carbonatação em desenvolvimento, conforme apresenta FIGURA 53, onde a permeabilidade aumentou consideravelmente conforme a idade de exposição aumentava.

FIGURA 52 – PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO A IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA



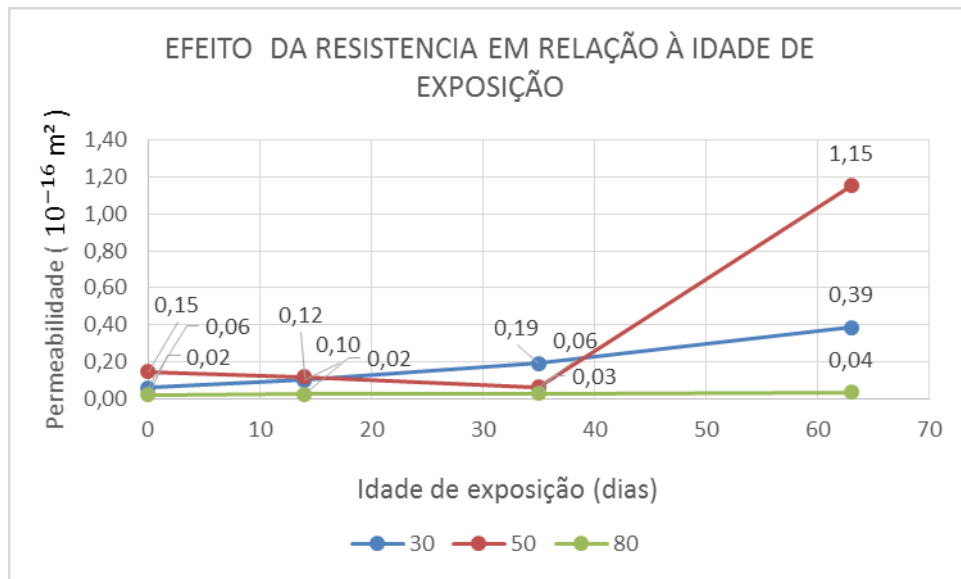
FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 53 – EVOLUÇÃO DA PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO A PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA



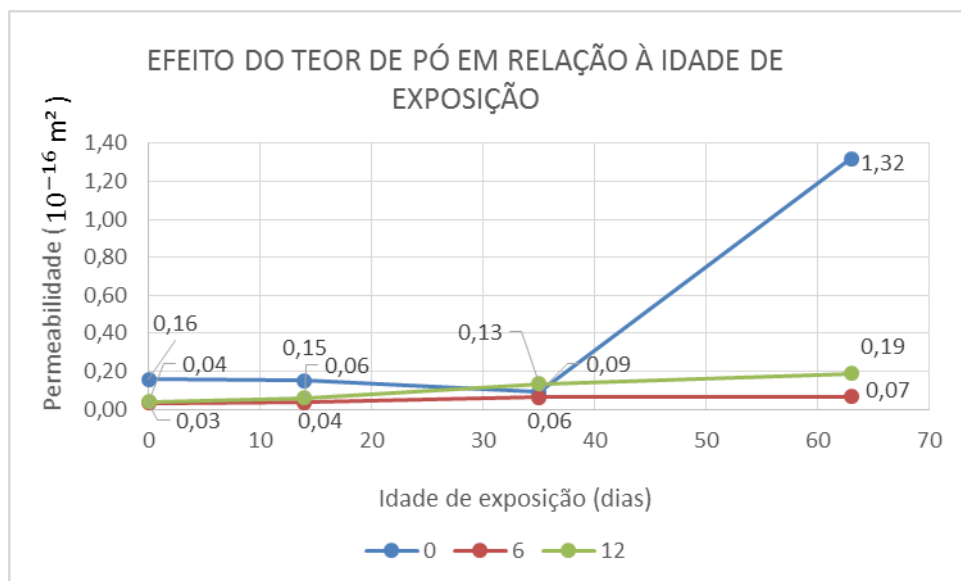
FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 54 – EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE PERMEABILIDADE



FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 55 – EFEITO DA PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ DE PEDRA COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA



FONTE: A AUTORA (2016)

Ao analisarmos as FIGURA 54 observamos uma discrepância de valores em relação ao concreto de 50 MPa, que obteve um ganho relativamente grande ao se aproximar da idade de 63 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>, fato este que remete-se a permeabilidade elevado das amostras de 50 MPa com 0% de pó, que apresentaram resíduos, e foram desconsideradas. O comportamento dos concretos com resistência

de 50 MPa tende a ser similar aos de 80 MPa, desta forma, as relações água/aglomerante desses concretos o tornam menos permeáveis, aos concretos de 30 MPa, que apresentam relação a/a superior.

Já na FIGURA 55, verifica-se um aumento considerável da permeabilidade aos 63 dias para os concretos com 0% de pó, porém, para os concretos com 6% e 12% esse ganho não foi significativo, conforme apresenta o QUADRO 46.

QUADRO 46 – ANOVA PARA PERMEABILIDADE DE CONCRETOS COM CURA AOS 28 DIAS

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.	COMPARAÇÃO
IDADES DE EXPOSIÇÃO (A)	3,94	3,00	1,31	1,77	2,73	Não há diferenças significativas
RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM Mpa (B)	2,11	2,00	1,06	1,43	3,12	Não há diferenças significativas
% PÓ DE PEDRA (C)	3,04	2,00	1,52	2,05	3,12	Não há diferenças significativas
AB	4,00	6,00	0,67	0,90	2,23	Não há diferenças significativas
AC	5,75	6,00	0,96	1,29	2,23	Não há diferenças significativas
BC	5,50	4,00	1,38	1,86	2,50	Não há diferenças significativas
ABC	9,39	12,00	0,78	1,06	1,89	Não há diferenças significativas
Erro	53,40	72,00	0,74			
Total	87,13	107,00				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

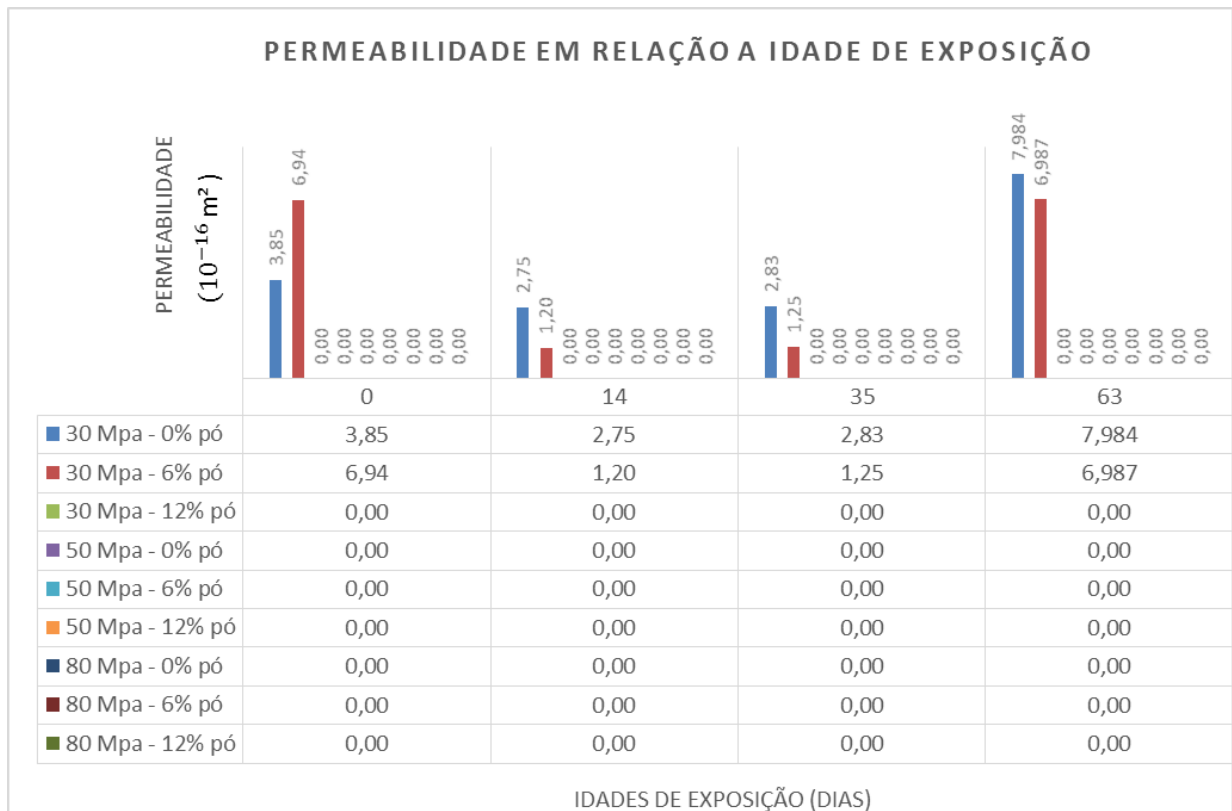
FONTE: A AUTORA (2016)

Para análise de variância à permeabilidade das amostras com cura submersa de 28 dias, nenhum dos fatores estudados são significativos em relação ao estudo.

- **Corpos de prova com cura aos 91 dias**

Para os corpos de prova submetidos à cura submersa até 91 dias de idade, os resultados quanto à permeabilidade em relação à profundidade de carbonatação são apresentados na FIGURA 56.

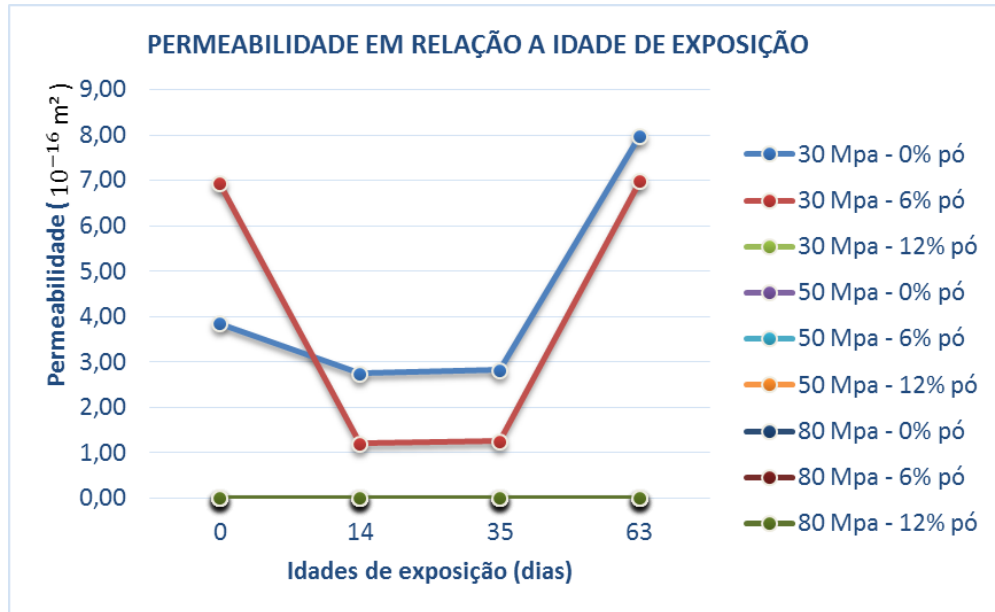
FIGURA 56 – PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO A PROFUNDIDADE DE CARBONTAÇÃO COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA



FONTE: A AUTORA (2016)

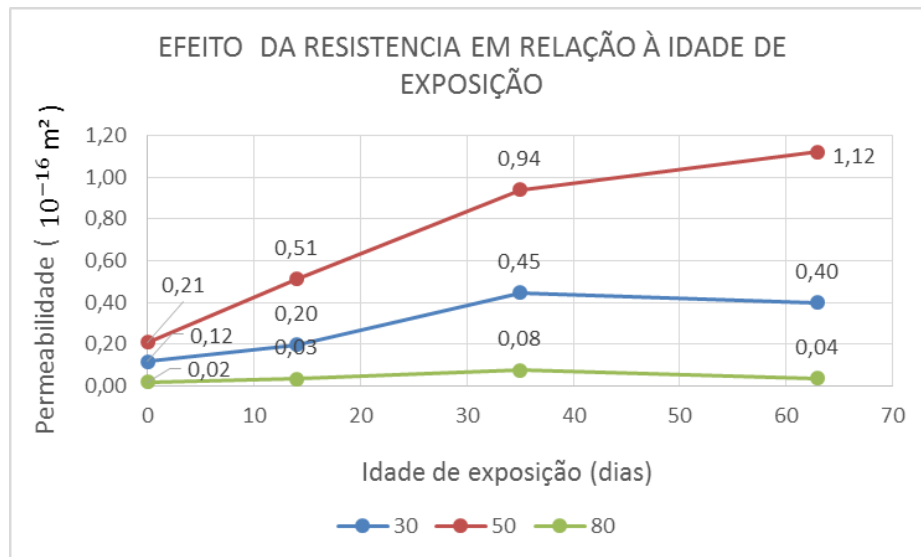
Nota-se que para os concretos de 30 MPa a permeabilidade tende a reduzir com a adição de teores de pó, a partir dos concretos de alta resistência (50 MPa e 80 MPa) a permeabilidade tanto para as amostras sem adição quanto para as com adição, são nulas. Fato que demonstra que quanto maior o tempo de cura, menores são os poros capilares no concreto, fazendo com que a penetrabilidade reduza.

FIGURA 57 – EVOLUÇÃO DA PERMEABILIDADE EM RELAÇÃO A IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA



FONTE: A AUTORA (2016)

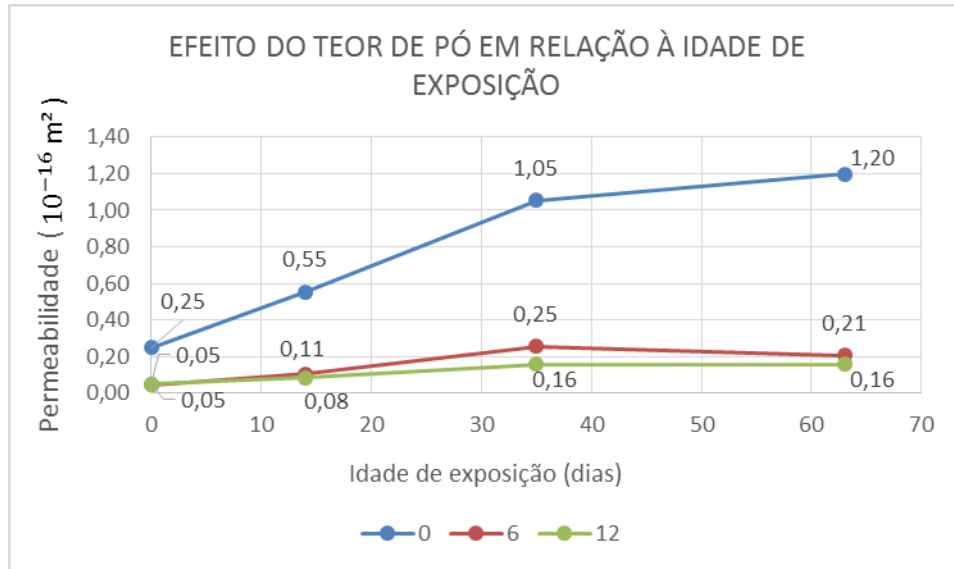
FIGURA 58 – EFEITO DA RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE PERMEABILIDADE



FONTE: A AUTORA (2016)

Verifica-se a disparidade dos resultados do concreto com resistência de 50 MPa, visto ao erro já mencionado. Como esperado, os corpos de prova de 80 Mpa apresentaram melhores resultados em relação aos concretos de 30 MPa, visto a baixa relação água/aglomerante.

FIGURA 59 – EFEITO DO TEOR DE PÓ EM RELAÇÃO À IDADE DE EXPOSIÇÃO COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE PERMEABILIDADE



FONTE: A AUTORA (2016)

Quando são analisados apenas os teores de pó em relação à idade de exposição, no que se refere à permeabilidade, quando se substitui o pó pelo cimento, melhores resultados são obtidos, sendo o teor de 12% o que maior tem significância quanto a substituição.

Observa-se pelo QUADRO 47 que, no geral, com o incremento do pó de pedra ao concreto, foi possível obter resultados melhores quando comparado aos concretos sem adição, provavelmente devido a conexão dos poros distribuídos em sua microestrutura, o que determina a menor facilidade com que os agentes deletérios podem percolar no seu interior, podendo comprometer a sua estabilidade química e física (REGATTIERI e HELEN, 1999).

QUADRO 47 - ANOVA PARA PERMEABILIDADE DE CONCRETOS COM CURA AOS 91 DIAS

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.	COMPARAÇÃO
IDADES DE EXPOSIÇÃO (A)	3,06	3,00	1,02	2,76	2,73	Há diferenças significativas
RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM Mpa (B)	7,85	2,00	3,92	10,60	3,12	Há diferenças significativas
% PÓ DE PEDRA (C)	9,56	2,00	4,78	12,91	3,12	Há diferenças significativas
AB	2,24	6,00	0,37	1,01	2,23	Não há diferenças significativas
AC	2,49	6,00	0,42	1,12	2,23	Não há diferenças significativas
BC	19,95	4,00	4,99	13,47	2,50	Há diferenças significativas
ABC	5,20	12,00	0,43	1,17	1,89	Não há diferenças significativas
Erro	26,65	72,00	0,37			
Total	77,02	107,00				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)

O tamanho dos poros interfere na velocidade do transporte, assim sendo, caso o volume de poros seja grande os poros estejam interligados, a permeabilidade e a difusividade para o deslocamento de fluidos através do concreto também passam a ser altas. Deste modo, concretos com reduzida relação água/aglomerante além de terem capilares de menor diâmetro, os mesmos se apresentam menos intercomunicáveis, resultando em menor massa de água absorvida (CASCUDO, 2000; HELENE, 1993; NEVILLE, 1997).

Desta forma, é importante utilizar concretos menos permeáveis para se garantir maior durabilidade das estruturas de concreto.



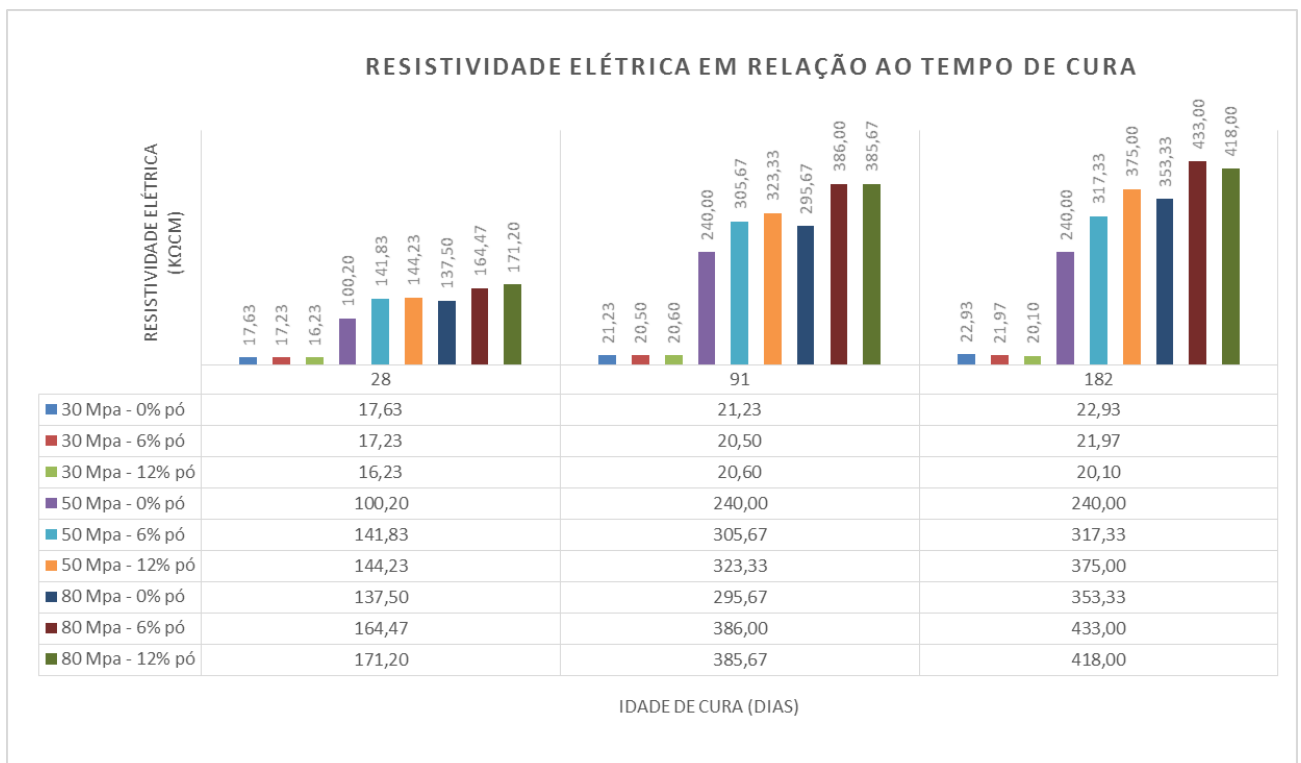
### 5.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade do concreto é diretamente dependente do concreto estar saturado ou seco, desta maneira não podem ser correlacionados, por isso foram separados em dois itens, os com medição logo após a saída da cura, ainda saturados, e os submetidos ao processo de carbonatação, contemplando a câmara seca (sazonamento) e posteriormente a medição de concretos submetidos à câmara de carbonatação.

#### 5.4.1. Avaliação estatística da resistividade elétrica dos corpos de prova logo após a cura

Através da FIGURA 60 é possível verificar a relação da resistividade elétrica com as amostras saturadas, logo após a cura.

FIGURA 60 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA

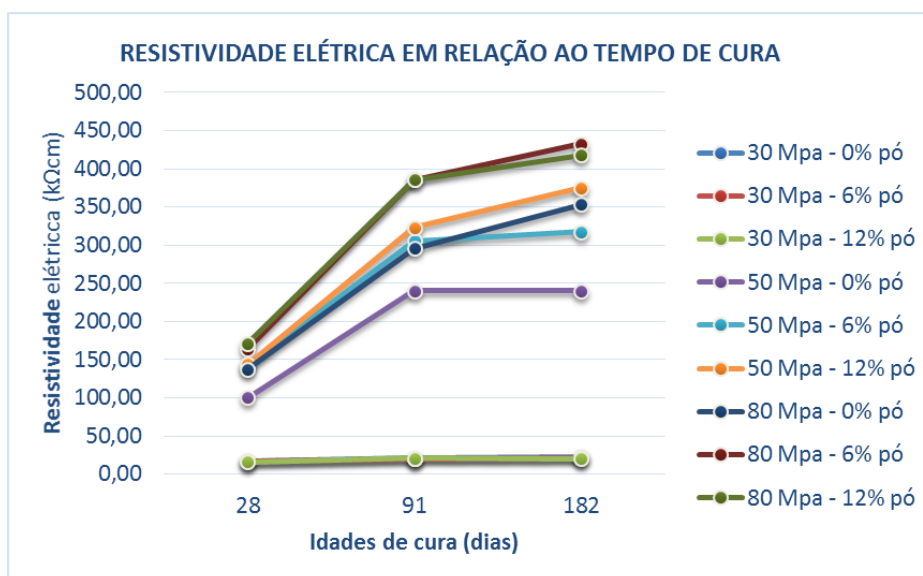


FONTE: A AUTORA (2016)

Percebe-se que para os concretos de 30 MPa os incrementos com teores de pó não fornecem resultados significativos às amostras, propiciando menor resistividade elétrica, ou seja, menor a dificuldade dos íons em atravessar o concreto, tendendo à corrosão. Uma vez destruída a camada passivadora do concreto, serão a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio no ambiente, que controlará a taxa de corrosão (HOPPE, 2005).

Para os concretos de alta resistência (50 MPa e 80 MPa) com adição de pó de pedra em substituição ao cimento, forneceram bons resultados, ou seja, retardando os processos corrosivos devido à baixa mobilidade iônica, a FIGURA 61 apresenta os mesmos resultados, porém de maneira que seja possível verificar a evolução da resistividade elétrica em relação ao tempo.

FIGURA 61 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA

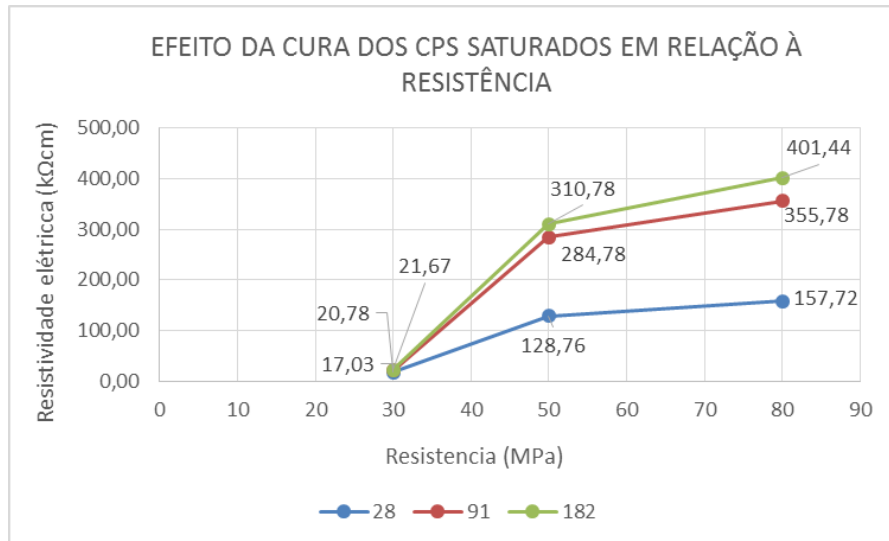


FONTE: A AUTORA (2016)

Observa-se que a resistência do concreto é fator determinante para as variações da resistividade elétrica, visto a disparidade das amostras de 30 MPa e dos concretos de alta resistência. Isso deve-se ao fato de que a resistividade elétrica apresenta como característica a alta sensibilidade a fatores intrínsecos como: relação água/aglomerante, consumo e tipo de cimento, agregados, adições e aditivos. Tais fatores resultam em alterações no tamanho e distribuição dos poros, teor de umidade interna, pH, sensibilidade à cura, entre outros fatores. Deste modo, acontecem

alterações nas propriedades físico-químicas do concreto, alterando sua condutividade elétrica e, conseqüentemente, a resistividade elétrica (HOPPE, 2005).

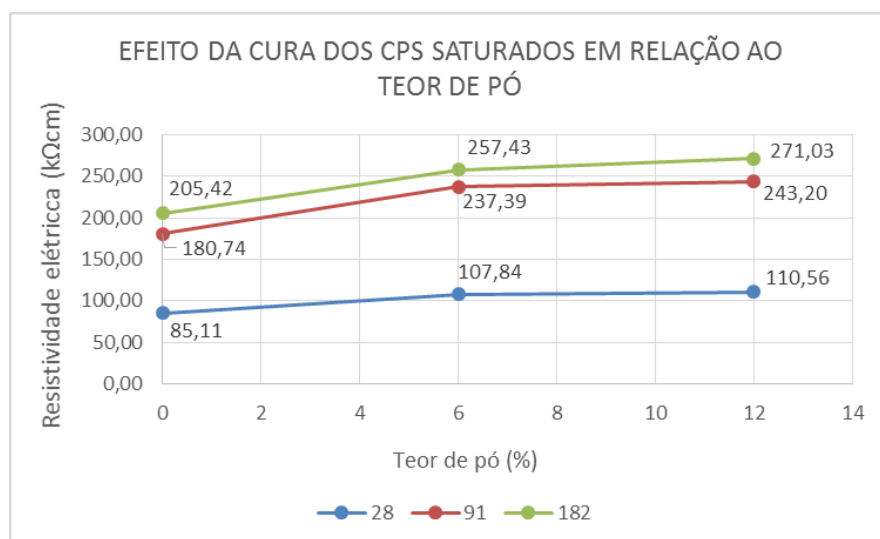
FIGURA 62 – EFEITO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA LOGO APÓS A CURA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA



FONTE: A AUTORA (2016)

Verifica-se na FIGURA 62 que o tempo de cura é fator determinante para a maior resistividade elétrica, contribuindo positivamente à pesquisa, bem como a resistividade elétrica é mais elevada tanto quanto maior a resistência dos concretos, devido à hidratação das amostras nos períodos de cura.

FIGURA 63 - EFEITO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA LOGO APÓS A CURA EM RELAÇÃO AO TEOR DE PÓ



FONTE: A AUTORA (2016)

Neville (1997) afirma que o aumento no teor de cimento resulta na diminuição da resistividade, função da maior quantidade de eletrólito e maior concentração de íons. Sendo possível esta verificação através da FIGURA 63, onde para substituição de 0% a resistividade elétrica fornece valores mais baixos, quando comparados aos concretos com substituição ao cimento em 6% e 12%, apresentando valores mais elevados.

QUADRO 48 – ANOVA PARA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA LOGO APÓS A CURA

FORTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.	COMPARAÇÃO
<b>IDADES DE CURA (A)</b>	318526,08	2,00	159263,04	821,89	3,17	Há diferenças significativas
<b>RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM Mpa (B)</b>	1210167,65	2,00	605083,82	3122,57	3,17	Há diferenças significativas
<b>% PÓ DE PEDRA (C)</b>	41318,09	2,00	20659,05	106,61	3,17	Há diferenças significativas
<b>AB</b>	158171,73	4,00	39542,93	204,06	2,54	Há diferenças significativas
<b>AC</b>	5210,61	4,00	1302,65	6,72	2,54	Há diferenças significativas
<b>BC</b>	24314,57	4,00	6078,64	31,37	2,54	Há diferenças significativas
<b>ABC</b>	5673,72	8,00	709,22	3,66	2,12	Há diferenças significativas
<b>Erro</b>	10463,99	54,00	193,78			
<b>Total</b>	1773846,44	80,00				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)

Verifica-se que para todos os fatores, apresentados no QUADRO 48, os resultados apresentaram diferenças significativas, ou seja, tanto os teores de pó, as idades de cura e as resistências, são fatores que influenciam nas medidas de resistividade

elétrica. De acordo com Castellote et al. (2002), a resistividade elétrica pode ser usada para caracterizar a conectividade dos poros e dar uma ideia do teor de umidade do concreto. Consideram eles que a resistividade elétrica é um parâmetro interessante de estimativa da durabilidade do concreto principalmente sob o aspecto de impedir o transporte de íons.

#### **5.4.1. Avaliação estatística da resistividade elétrica dos corpos de prova com 60% de umidade**

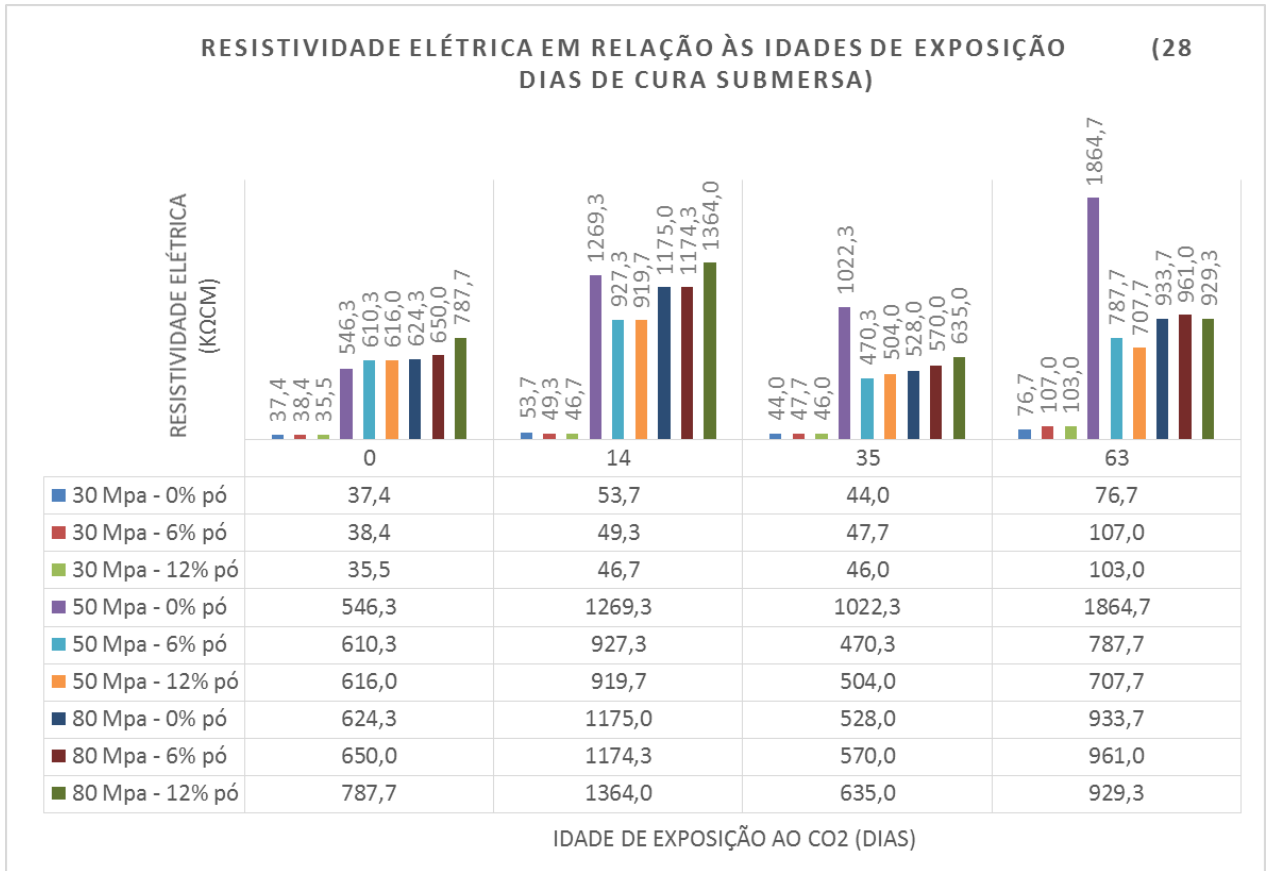
Os corpos de prova foram retirados da cura submersa nas idades de 28 e 91 dias, encaminhados para a câmara de sazonalização por 28 dias em condições de umidade relativa de 60%, logo após foram ensaiados à resistividade na saída da câmara de sazonalização e nas idades de carbonatação de 14, 35 e 63 dias, conforme apresentado abaixo.

- **Corpos de prova com cura aos 28 dias**

Na FIGURA 64 são apresentados os valores obtidos para o ensaio de resistividade elétrica em relação às idades de exposição após 28 dias de cura submersa. Onde a resistividade elétrica tendeu a reduzir para os concretos de 30 MPa com adições de pó nas idades de 0, 14 e 35 dias de exposição, tendo aumento somente aos 63 dias. Para os concretos de 50 MPa em todas as idades as amostras sem adição obtiveram maiores resultados, ou seja, as adições de pó para ambas as relações de a/a não foram significativas ao estudo.

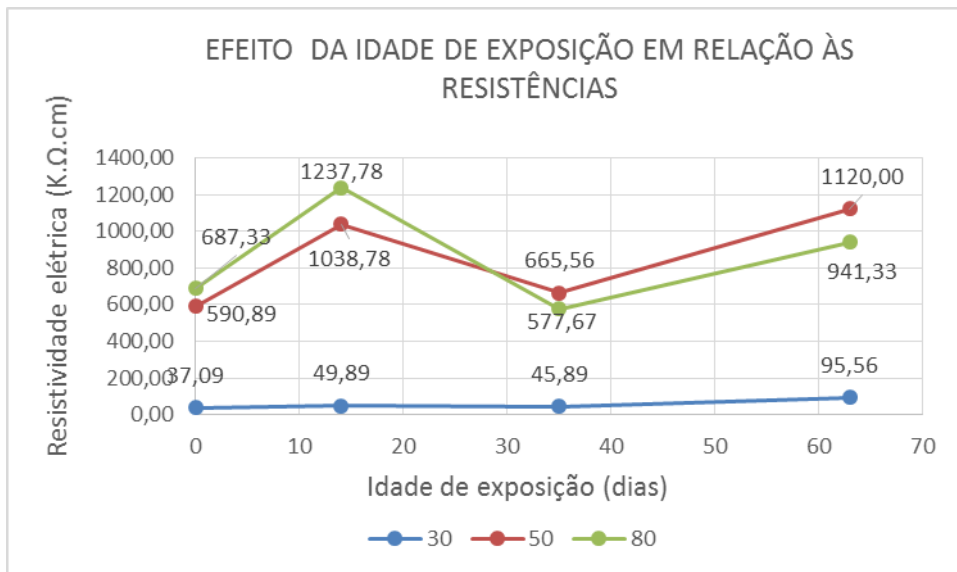
Já para os concretos de 80 MPa as adições se mostraram significativas, ou seja, houve maiores resultados em relação a resistividade elétrica foram obtidos a partir das adições.

FIGURA 64 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM RELAÇÃO ÀS IDADES DE EXPOSIÇÃO COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS



FONTE: A AUTORA (2016)

FIGURA 65 – EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

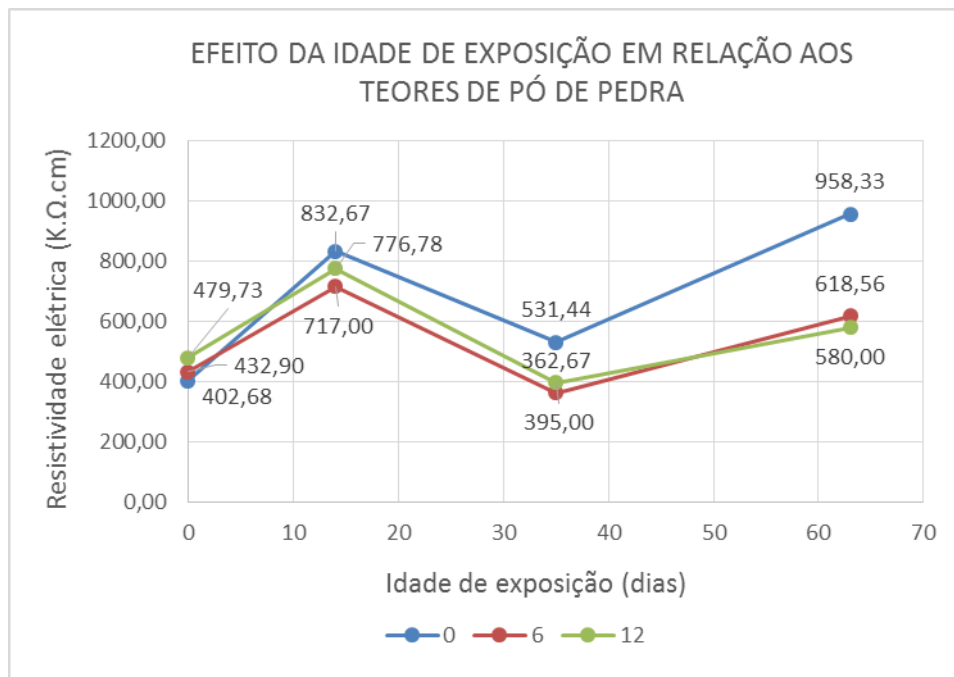


FONTE: A AUTORA (2016)

Através da FIGURA 65, é possível observar que a relação a/a é fator importante ao ensaio, visto a expressiva diferença entre os concretos de 80 MPa (a/a: 0,28) e 50 MPa (a/a: 0,35) em comparação ao concreto de 30 MPa (a/a: 0,55).

Observa-se também que aos 35 dias houve uma queda brusca para os concretos de 80 MPa e 50 MPa, possivelmente devido a composição do concreto, a situação de exposição ou cura.

FIGURA 66 - EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO RELAÇÃO AO TEOR DE PÓ COM 28 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA



FONTE: A AUTORA (2016)

É possível observar na FIGURA 66, que ao adicionar pó ao traço, obteve-se uma piora dos resultados em relação à resistividade elétrica. Verifica-se que a diferença mais expressiva foi na idade mais avançada de carbonatação, ou seja, aos 63 dias.

QUADRO 49 - ANOVA PARA RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA CURA SUBMERSA AOS 28 DIAS

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.	COMPARAÇÃO
<b>IDADES DE EXPOSIÇÃO (A)</b>	2691883,51	3,00	897294,50	12462,42	2,73	Há diferenças significativas
<b>RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM Mpa (B)</b>	15372887,88	2,00	7686443,94	106756,17	3,12	Há diferenças significativas
<b>% PÓ DE PEDRA (C)</b>	454924,39	2,00	227462,20	3159,20	3,12	Há diferenças significativas
<b>AB</b>	1543041,55	6,00	257173,59	3571,86	2,23	Há diferenças significativas
<b>AC</b>	557095,85	6,00	92849,31	1289,57	2,23	Há diferenças significativas
<b>BC</b>	1497516,40	4,00	374379,10	5199,71	2,50	Há diferenças significativas
<b>ABC</b>	957146,64	12,00	79762,22	1107,81	1,89	Há diferenças significativas
<b>Erro</b>	270980,19	72,00	3763,61			
<b>Total</b>	23345476,41	107,00				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)

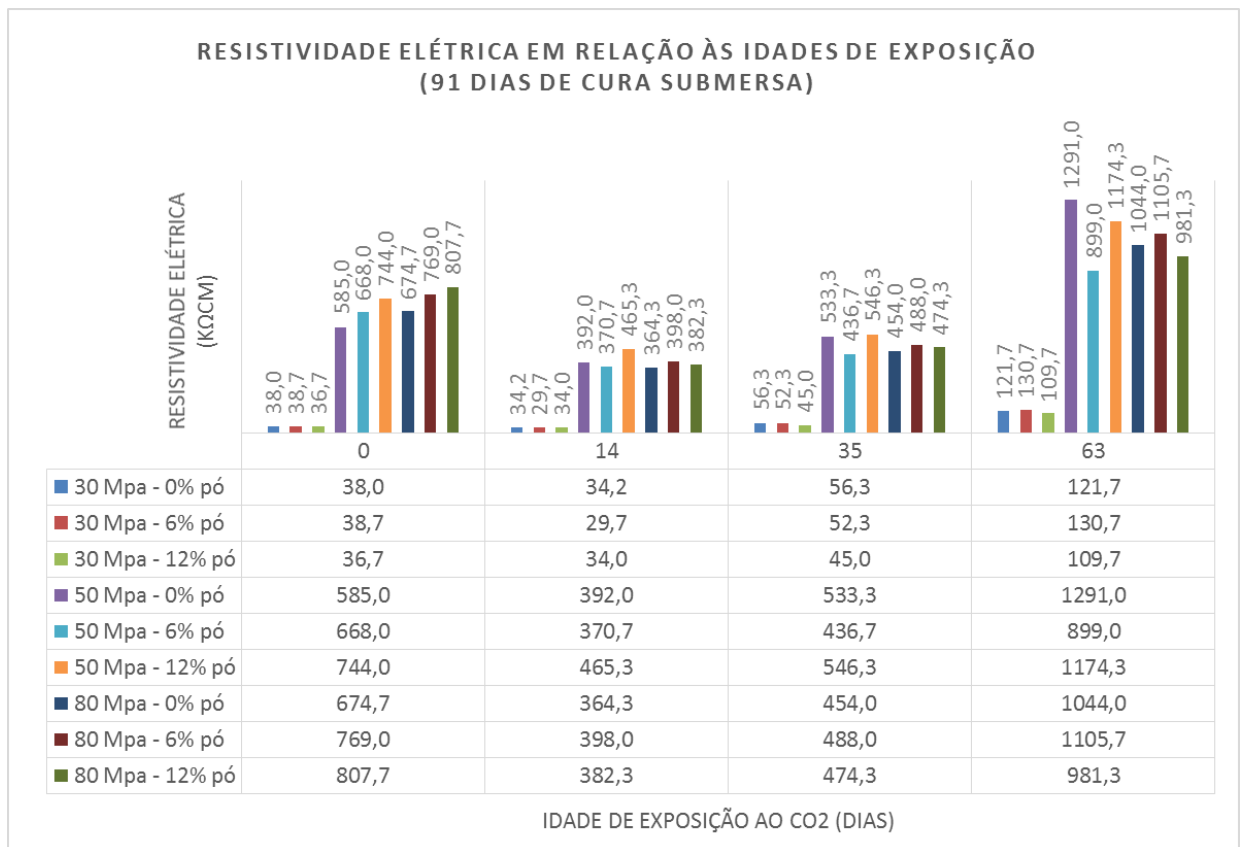
A partir da ANOVA, QUADRO 49, verifica-se que todos os parâmetros analisados são significativos para verificação da resistividade elétrica, assim como afirma Hoppe (2005) quando fala que a relação água/aglomerante e a utilização de adições e aditivos influenciam resistividade, por alteraram a microestrutura da matriz quanto as características da solução no poro. Sendo estas as propriedades que tem influência direta nas propriedades de durabilidade dos concretos.



- **Corpos de prova com cura aos 91 dias**

A partir dos resultados obtidos para o ensaio de resistividade elétrica aos 91 dias de cura submersa com 28 dias de sazonalamento e idades de exposição ao CO<sub>2</sub> controladas, obteve-se a FIGURA 67.

FIGURA 67 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM RELAÇÃO ÀS IDADES DE EXPOSIÇÃO COM CURA SUBMERSA DE 28 DIAS



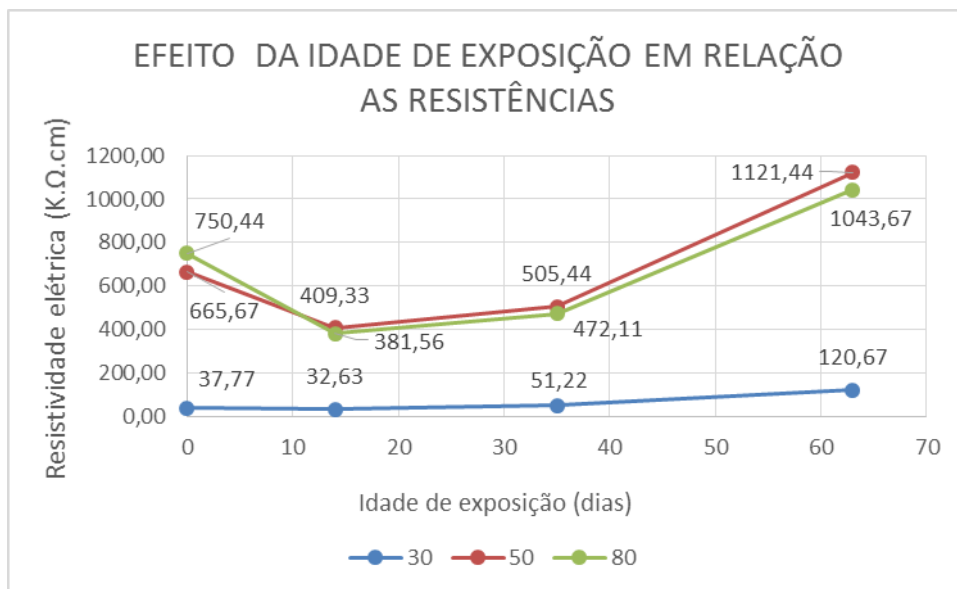
FONTE: A AUTORA (2016)

Verifica-se que para os corpos de prova com relação a/a de 0,55, a adição de pó não foi significativa para nenhuma das idades de exposição, bem como para os concretos com relação a/a de 0,35, a adição de 6% de pó nas idades de 14, 35 e 63 dias, e a adição de 12% de pó na idade de 63 dias, também apresentaram aumento

da condutividade no interior do concreto, propiciando condições à penetração de agentes agressivos ao concreto.

Para os concretos com a/a de 0,28, a adição de pó mostrou-se relevante para todas as idades. Sendo a adição de 6% de pó a que obteve maiores resultados nas idades de 14, 35 e 63 dias, e para a adição de 12% de pó o maior resultado encontrado foi na idade de 0 dias, ou seja, logo após o sazramento.

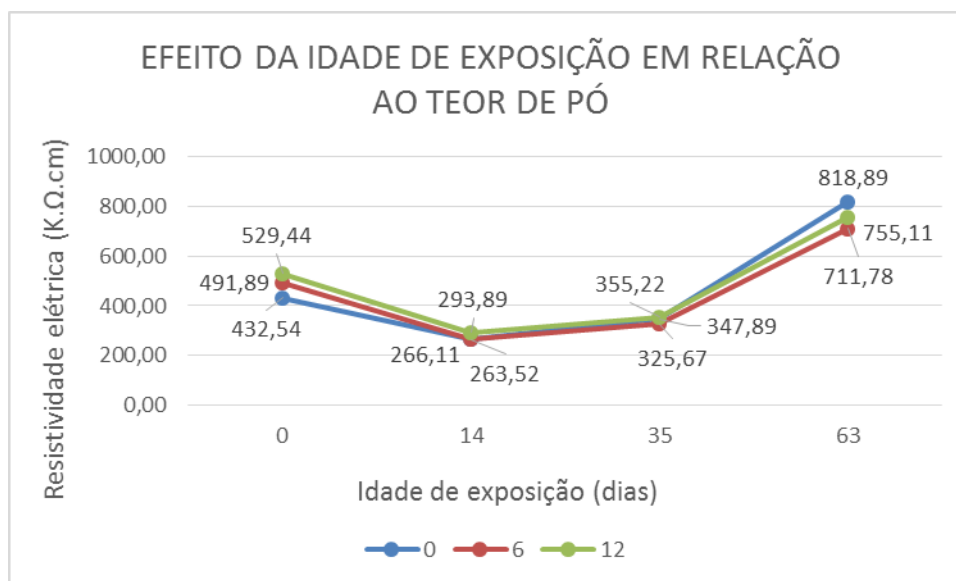
FIGURA 68 – EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA



FONTE: A AUTORA (2016)

Levando-se apenas em consideração o efeito da idade de exposição em relação à resistência, na FIGURA 68, verifica-se que quanto para os concretos de alta resistência foram obtidos os maiores resultados em relação a resistividade elétrica, como era esperado, devido as menores relações de água/aglomerante, e maiores teores de finos, melhorando o empacotamento, e aumentando a condutividade elétrica.

FIGURA 69 – EFEITO DA IDADE DE EXPOSIÇÃO EM RELAÇÃO AO TEOR DE PÓ COM 91 DIAS DE CURA SUBMERSA – ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA



FONTE: A AUTORA (2016)

Percebe-se através da FIGURA 69, que para a adição de 12% de pó de pedra ao traço do concreto, obtém-se no geral, melhores resultados quanto à resistividade elétrica. Para os concretos sem adição de pó, nas primeiras idades os valores não são significativos para o estudo, porém no decorrer do ensaio à carbonatação a resistividade elétrica aumenta, tornando os resultados relevantes. Desta forma, a adição de pó para os concretos retirados da cura submersa aos 91 dias, expostos à câmara de sazonalização por 28 dias e ensaiados nas idades de 14, 35 e 63 dias de exposição, não apresentaram significância com a adição de fíler calcário.

De acordo com a ANOVA, apresentada no QUADRO 50, tanto a relação água/aglomerante, as adições de pó de pedra e as idades de exposição, são fatores importantes ao processo de resistividade elétrica, pois esta controla o fluxo de íons que difundem no concreto através da solução aquosa presente nos poros do concreto, diante disso, todos os fatores que influenciam na estrutura de poros, como a relação a/c, tipo de cimento, adições e grau de hidratação, também afetam a resistividade elétrica do concreto (NEVILLE, 1997).

QUADRO 50 – ANOVA PARA RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA CURA SUBMERSA AOS 91 DIAS

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.	COMPARAÇÃO
<b>IDADES DE EXPOSIÇÃO (A)</b>	3772864,42	3,00	1257621,47	3699,97	2,63	Há diferenças significativas
<b>RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM Mpa (B)</b>	8879202,73	2,00	4439601,36	13061,49	3,02	Há diferenças significativas
<b>% PÓ DE PEDRA (C)</b>	21497,95	2,00	10748,97	31,62	3,02	Há diferenças significativas
<b>AB</b>	1374459,62	6,00	229076,60	673,95	2,13	Há diferenças significativas
<b>AC</b>	83086,68	6,00	13847,78	40,74	2,13	Há diferenças significativas
<b>BC</b>	124503,41	4,00	31125,85	91,57	2,40	Há diferenças significativas
<b>ABC</b>	143917,16	12,00	11993,10	35,28	1,78	Há diferenças significativas
<b>Erro</b>	250194,77	72,00	3474,93			
<b>Total</b>	14649726,74	107,00				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)

## 5.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os dados obtidos através do ensaio de resistência à compressão normalizado estão apresentados no QUADRO 51, com idades, porcentagens de pó e resistências esperadas, correspondentes.

QUADRO 51 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)

% PÓ DE PEDRA	30 Mpa			50 Mpa			80 Mpa			
	IDADES (DIAS)			IDADES (DIAS)			IDADES (DIAS)			
	28	91	182	28	91	182	28	91	182	
0	48,25	49,73	56,76	32,98	41,05	45,79	74,00	72,41	82,79	
	48,13	50,24	58,41	32,98	36,40	47,82	65,29	70,46	80,38	
	MÉDIA	48,19	49,99	57,59	32,98	38,73	46,80	69,65	71,43	81,59
	DP	0,06	0,26	0,82	0,00	2,33	1,02	4,36	0,97	1,20
	CV (%)	0,12%	0,51%	1,43%	0,00%	6,01%	2,17%	6,26%	1,36%	1,48%
6	48,41	51,80	56,76	64,74	61,93	75,23	83,92	93,67	95,87	
	47,47	52,24	58,41	55,40	64,91	82,77	81,85	91,30	95,62	
	MÉDIA	47,94	52,02	57,59	60,07	63,42	79,00	82,88	92,48	95,74
	DP	0,47	0,22	0,82	4,67	1,49	3,77	1,04	1,19	0,12
	CV (%)	0,98%	0,42%	1,43%	7,77%	2,35%	4,77%	1,25%	1,28%	0,13%
12	44,40	45,81	54,01	72,58	87,51	91,26	76,55	82,58	100,04	
	46,01	43,89	49,96	75,50	83,19	91,06	67,61	90,30	91,17	
	MÉDIA	45,21	44,85	51,99	74,04	85,35	91,16	72,08	86,44	95,61
	DP	0,81	0,96	2,03	1,46	2,16	0,10	4,47	3,86	4,43
	CV (%)	1,78%	2,14%	3,90%	1,97%	2,53%	0,11%	6,20%	4,46%	4,64%

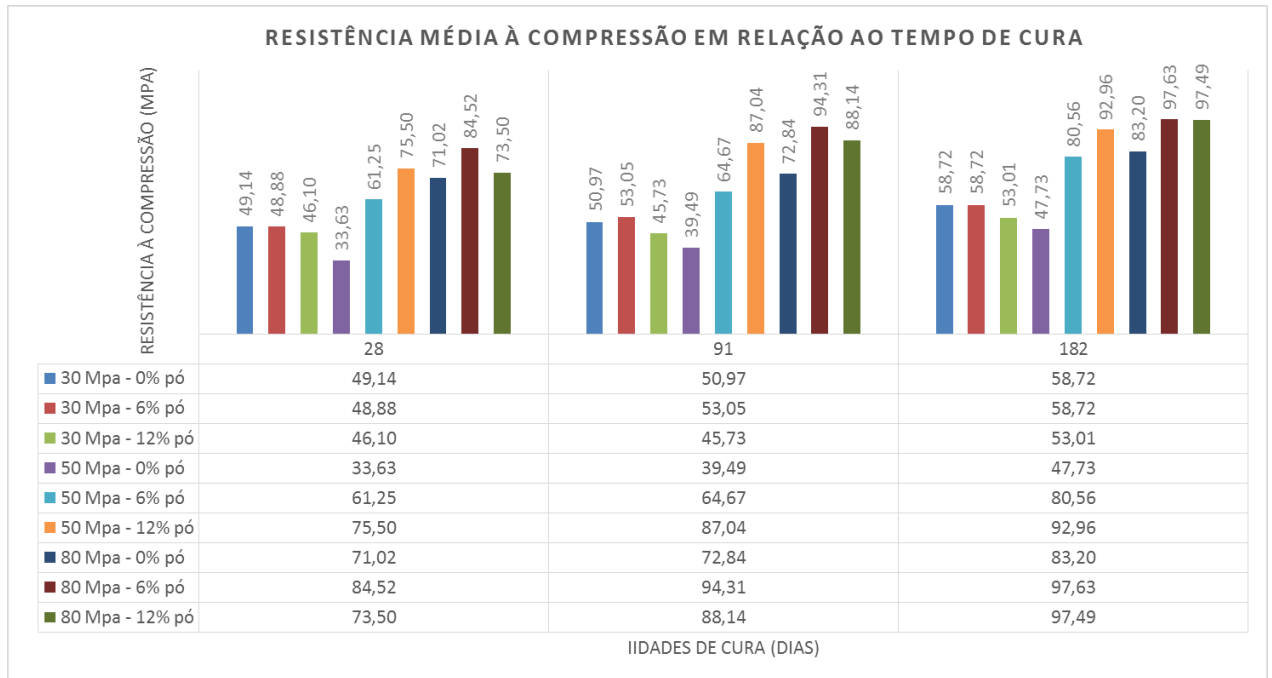
DP: DESVIO PADRÃO

CV: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2016)

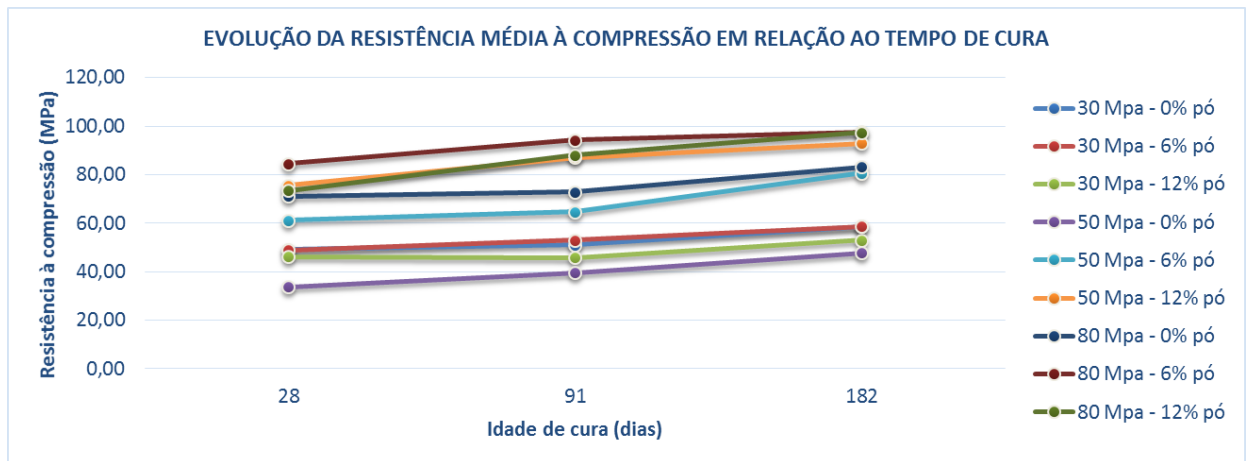
Observa-se que os concretos de 30 MPa com adições de 0%, 6% e 12% a resistências aos 28 dias já superavam os valores esperados seguiram o mesmo padrão os concretos de 50 MPa com adição de 6% e 12% de pó e de 80 MPa com 6% de pó. Já para os concretos de 50 MPa e 80 MPa sem adição de pó, os resultados foram insatisfatórios aos 28 dias, e 80 MPa com adição de 12% de pó, deste modo cabe observar que cabe a erros de ensaio, conforme mencionado em relação ao concreto de 50 MPa com 0% de adição de pó, podendo ser constatado pelo QUADRO 52.

QUADRO 52 – RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA



FONTE: A AUTORA (2016)

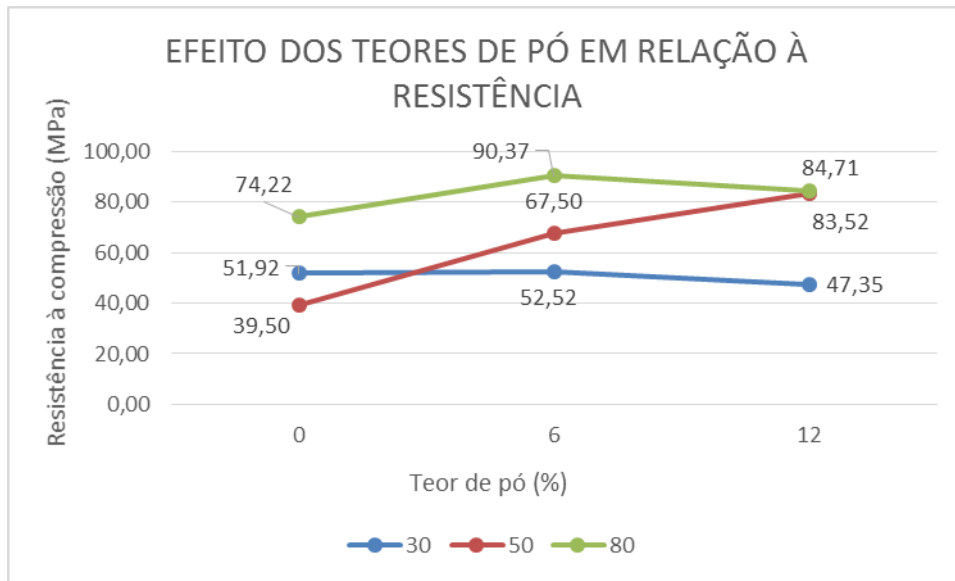
FIGURA 70 – EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AS IDADES DE CURA



FONTE: A AUTORA (2016)

De modo geral, na FIGURA 70 que, como esperado, a resistência à compressão do concreto evoluiu com o tempo. A tendência é que com o aumento da idade, as partículas não hidratadas de cimento continuem a formar produtos de hidratação, que tendem a reduzir o tamanho e o volume total de vazios, ou seja, a hidratação do cimento é basicamente uma sequência de reações químicas entre este componente e a água (AITCIN, 2000; CAMPOS, 2015; NEVILLE, 1997)

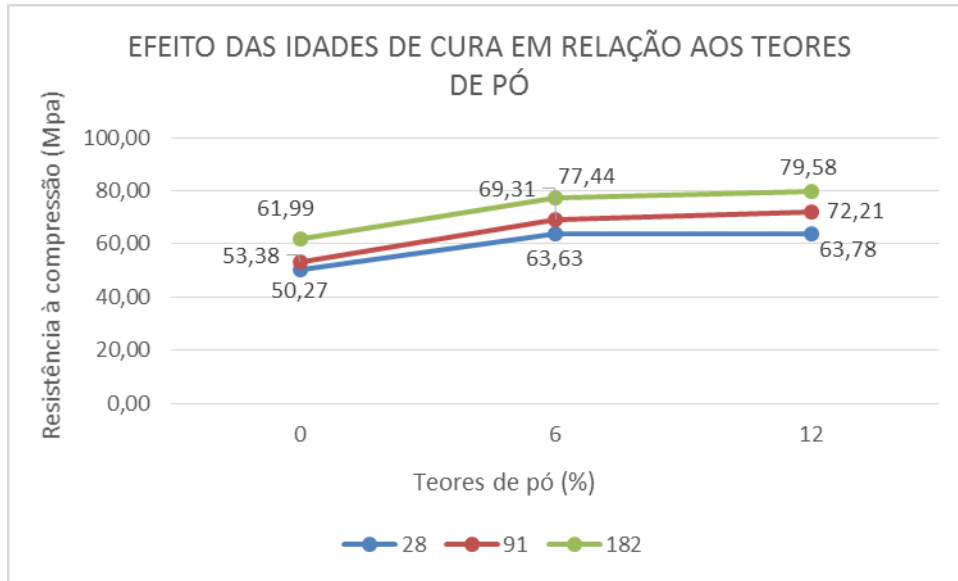
FIGURA 71 – EFEITO DOS TEORES DE PÓ EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



FONTE: A AUTORA (2016)

Os resultados apresentados na FIGURA 71 demonstraram que, de maneira geral o aumento da resistência das amostras foi diretamente proporcional ao aumento do teor de pó de pedra, deste modo, a adição de pó à pasta do concreto aumenta a resistência. A provável causa desse aumento de resistência deve-se ao efeito microfíler do pó, que pelas suas minúsculas partículas, resulta em maior empacotamento dos sólidos. As partículas menores do pó se encaixam nos vazios das partículas maiores, dos agregados, preenchendo os poros da argamassa, tornando-os descontínuos (CAMPOS, 2015).

FIGURA 72 – EFEITO DAS IDADES DE CURA EM RELAÇÃO AOS TEORES DE PÓ – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



FONTE: A AUTORA (2016)

Verifica-se na FIGURA 72 que as resistências cresceram proporcionalmente às idades de cura, como era esperado devido à hidratação do cimento. Maiores tempos de cura, melhores os resultados da microestrutura do concreto que, continuam a formar produtos de hidratação do cimento durante o processo de endurecimento do concreto (AITCIN, 2000).

O comportamento da resistência à compressão para os concretos estudados está apresentado no QUADRO 53, demonstrando significância quanto à adição de teor de calcário pulverizado e idades de cura (28, 91 e 182 dias), conforme verificado através das FIGURA 71 e FIGURA 72.

Nas amostras de 50 MPa (a/c igual a 0,35) e 80 MPa (a/c igual a 0,28), com níveis de água/aglomerante menores que os concretos de 30 MPa (a/c igual a 0,55), em relação aos tempos de cura, apresentaram resultados relativamente mais significativos. Como esperado, maiores são as resistências à compressão, principalmente em função da redução da permeabilidade da matriz e da zona de transição.



QUADRO 53 – ANOVA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

<b>FONTE</b>	<b>SQ</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>F tab.</b>	<b>COMPARAÇÃO</b>
<b>IDADES DE CURA (A)</b>	1106,40	2,00	553,20	84,80	3,35	Há diferenças significativas
<b>RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS EM Mpa (B)</b>	6185,83	2,00	3092,91	474,10	3,35	Há diferenças significativas
<b>% PÓ DE PEDRA (C)</b>	1933,43	2,00	966,72	148,18	3,35	Há diferenças significativas
<b>AB</b>	89,47	4,00	22,37	3,43	2,73	Há diferenças significativas
<b>AC</b>	29,93	4,00	7,48	1,15	2,73	Não há diferenças significativas
<b>BC</b>	2465,12	4,00	616,28	94,47	2,73	Há diferenças significativas
<b>ABC</b>	101,56	8,00	12,70	1,95	2,31	Não há diferenças significativas
<b>Erro</b>	176,14	27,00	6,52			
<b>Total</b>	12087,89	53,00				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB.: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2016)

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do programa experimental, dos resultados obtidos nos ensaios e dos dados das análises estatísticas, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Carbonatação

- As adições agregado pulverizado não foram significativas para os concretos de 30 MPa no ensaio de carbonatação acelerada;
- Para as relações de a/a de 0,35 (50 MPa) o coeficiente de carbonatação que o caracteriza foi de  $0,28\text{mm}\cdot\text{semana}^{-0,5}$  e para as relações de a/a de 0,28 (80 MPa), o coeficiente que o caracteriza foi de  $0,07\text{mm}\cdot\text{semana}^{-0,5}$ , propiciando redução considerável da profundidade de carbonatação quando comparado aos concretos sem adição;
- Quanto o ensaio de carbonatação aos 91 dias de cura submersa, para os concretos de alta resistência, o fator significativo foi o tempo de cura, visto menores profundidades frente à carbonatação, se chegando a resultados nulos;

- Migração de íons cloreto

- Quanto ao estudo de migração de íons cloreto, a adição de teores de pó de 6 e 12% forneceram resultados consideráveis, no geral reduziu-se a movimentação de íons provocada pela diferença de potencial elétrico no concreto;

- Permeabilidade

- As amostras recém saídas da cura, os concretos com relação a/a de 0,55 (30 MPa), não apresentaram mudanças relevantes quando da adição de agregado pulverizado ao traço;
- Para concretos com adições de 6% e 12% de agregado pulverizado em relação à análise de permeabilidade logo após retirados da cura, houve melhora significativa dos resultados para as relações de a/a de 0,35 (50 MPa) e 0,28 (80 MPa);

- Em relação à permeabilidade com 28 dias de cura submersa, 28 dias de câmara de sazonalidade e idades de exposição ao CO<sub>2</sub> controladas, as adições de pó se mostraram significativas para os concretos de 30 MPa (6% de pó), 50 MPa (6% e 12% de pó) e 80 MPa (6% e 12% de pó);
  - Já para a permeabilidade aos 91 dias de cura submersa, 28 dias de câmara de sazonalidade e idades de exposição ao CO<sub>2</sub> controladas, as adições de agregado pulverizado nos concretos de 30 MPa tenderam a reduzir significativamente a permeabilidade do concreto no decorrer do tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>. Porém não foi possível detectar profundidades de carbonatação para os concretos de 50 MPa e 80 MPa, visto ao tempo de cura, durante o qual provavelmente foram reduzidos os poros capilares do concreto;
  - Com base nos estudos realizados e hipóteses adotadas na avaliação do escoamento ao ar do concreto, o procedimento de ensaio aplicado para avaliar a permeabilidade do concreto ao ar pode ser considerado válido, pois os resultados das análises se mostraram coerentes com o esperado. A durabilidade do concreto depende da facilidade com que os fluidos, tanto líquidos como gases, possam ingressar no concreto e se deslocar no seu interior. O tamanho, o volume dos poros e sua continuidade, assim como o mecanismo de transporte, são fatores importantes de transporte de agentes para o interior do concreto;
  - Os resultados de permeabilidade ao ar apresentam valores que comprovam a influência da relação água/aglomerante nesta propriedade. Relações água/aglomerante baixas produziram concretos com baixa permeabilidade ao ar;
  - As idades de cura bem como os teores de agregado pulverizado (pó de pedra) adicionados ao concreto, são fatores influentes nos resultados de permeabilidade das amostras;
- Resistividade elétrica

- No estudo da resistividade elétrica, para os concretos recém saídos da cura, os resultados da relação a/a: 0,55 (30 MPa) não ofereceram resultados satisfatórios quanto ao emprego dos teores de pó;
  - A resistividade elétrica medida aos 28 dias de cura submersa e condições variadas de exposição, forneceram resultados relevantes apenas para a substituição de 6% e 12% de pó aos concretos com relação a/a de 0,28, ou seja, concretos que apresentam resistência de 80 MPa;
  - Para os concretos com relação a/a de 0,35, a substituição de pó foi significativa para o teor de 12% na cura submersa de 91 dias e sazonalidade de 28 dias, nas idades de exposição ao CO<sub>2</sub> de 0, 14 e 35 dias;
  - Já para os concretos com relação a/a de 0,28 e idade de cura submersa de 91 dias, as adições de 6% e 12% de pó foram significativas para todas as idades.
- Resistência à compressão
    - Em relação ao ensaio de resistência à compressão, com relação à água/aglomerante de 0,35 e 0,28, a substituição de pó em 6% e 12% foi significativa após as primeiras idades de cura; já para os concretos de 0,55 apenas o teor de adição de pó de 6% mostrou-se significativo;
    - Como esperado, os resultados relativos à resistência à compressão apresentaram-se coerentes, quanto maiores os tempos de cura (28, 91 e 182 dias), melhores os resultados;

A utilização do pó de pedra leva a uma curva granulométrica mais contínua. Ao utilizar partículas com granulometrias diferentes, as de menor tamanho podem ocupar os interstícios deixado livres pelo empacotamento de partículas de tamanho superior. Os resultados obtidos nesta dissertação corroboram as conclusões de Li e Kwan (2013), que explicam que o enchimento de vazios sucessivos por partículas de

tamanho menor pode aumentar a densidade de empacotamento dos materiais cimentícios. Uma vez que é o excesso de água (água em excesso ao necessário para preencher os espaços vazios) que lubrifica a pasta, uma densidade de empacotamento mais elevada dos materiais cimentícios para um determinado volume de água, melhora a fluidez e para um espalhamento desejável, com a redução do volume de água, há uma melhora na resistência e na durabilidade. Assim, misturando materiais de cimento de tamanhos diferentes é possível aumentar a densidade de empacotamento e reduzir a demanda de água;

Deste modo, as conclusões obtidas se limitam aos concretos e materiais utilizados nesta pesquisa, utilizando agregados obtidos pela britagem de calcário, bem como o agregado pulverizado decorrente desse processo. Os resultados obtidos nos diversos ensaios mostram que a utilização de substituição e adição de agregado pulverizado em concretos na faixa compreendida entre 30 MPa e 80 MPa aumentam a durabilidade na maior parte dos ensaios, não sendo detectada nenhuma consequência negativa significativa desse quesito. Também se verifica que a cura é fator significativo para a durabilidade dos concretos ensaiados. Além da clara vantagem econômica e ambiental a utilização de pó de pedra mantém ou melhora a durabilidade dos concretos analisados. Deve ser ressaltado que a durabilidade, neste caso, está sendo avaliada pelos ensaios de permeabilidade ao ar, migração de íons cloreto, resistividade elétrica, e carbonatação.

## 6.1. SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

A partir dos resultados obtidos, da existência de algumas incoerências de resultados e curiosidades que surgiram durante o trabalho, sugere-se alguns assuntos para futuras pesquisas:

1. Devido ao ensaio de permeabilidade ter sido realizado somente em relação ao ar, recomenda-se realiza-lo também em relação à água, para correlacionar com a influência dos resultados ao ar;
2. Realizar a análise em relação à profundidade de carbonatação com idades mais avançadas, de modo que seja possível uma análise mais aprofundada da influência deste fenômeno no concreto;

3. Salienta-se a importância de realizar mais estudos para avaliar as divergências dos resultados obtidos, inclusive dos resíduos, como é o caso do concreto de 50 MPa com 0% de pó de pedra, de modo a analisar a origem desse efeito;
4. Analisar mais a fundo a influência do empacotamento na microestrutura do concreto com adições de pó de pedra;
5. Investigar outras metodologias de ensaio e correlacionar com o presente estudo a fim de verificar a coerência entre os métodos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Sistemas construtivos à base de cimento. Contribuição efetiva para a sustentabilidade da construção civil, 2010.

ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais.** – Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1998.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**, tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo – Editora Pini, 2000.

AÏTCIN, P.C. Binders for Durable and Sustainable Concrete. Ed. Taylor e Francis, 2008.

ALMEIDA, I.R. **Concreto de alto desempenho.** In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações V2** / ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, 2005.

ALMEIDA, S.L.M.; SILVA, V.S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. **Anais.** Eds. Cuchierato et al.

ALVES, J. D.; SOUZA, R. A. A. Concretos de alto desempenho com adição de finos de micaxisto. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Bento Gonçalves – RS. 2007.

AMARAL, J. C. **Tensões originadas pela retração em elementos de concreto com deformação restringida considerando-se o efeito da fluência.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of Concrete Practice.** Part 1 – 1991. Materials and General Properties, Committee 201. Detroit, Michigan, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.** ASTM C-1202. In: Annual book of ASTM Satandard. West Conshohocken, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908**: Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade e compressão, Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900**: Água para amassamento do concreto, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia, Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland, Rio de Janeiro, 2011.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681**: Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles” Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BARBOSA, M. T. G.; COURA, C. V. G.; MENDES, L. D. O. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. **Ambiente construído**, v. 8, n. 4, p. 51-60, 2008.

BASTOS, S. R. B. **Uso de areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção e concretos convencionais**. In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

BIANCHINI, M. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2010.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2006.

CABRAL, K. O. **Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granitognaisse nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido**. Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, (2007)

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CARMO, J. B. M.; ANDRADE, M. A. S, GRAÇA, N. G., BITTENCOURT, R. M., ANDRADE, W. P. **Influência do agregado pulverização e adição de sílica ativa nas propriedades do concreto convencional**. Seminário nacional de Grandes Barragens, Fortaleza, 2001.

CASCUDO, O; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto**. Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 Ed. São Paulo: IBRACON, 2011

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto, inspeção e técnicas eletroquímicas** – Editora Pini, 1997.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, M.C. **Standardization, to a reference of 25°C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions**. ACI Materials Journal, 2002.

CASTRO, A. L. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia de concretos de alto desempenho. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Paulo, 2007.

CASTRO, A. L. de, PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica** 55 (2009) 18-32.

CASTRO, A. L. de, J. B. LIBORIO, PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. **Cerâmica** 5, 2011..

CELIK, T; MARAR, K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 1121-1130, 1996.

CHIES, J. A.; ROHDEN, A. B.; SILVA FILHO, L. C. P. **Tratamentos superficiais em corpos de prova de concreto submetidos à compressão**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 7, n. 5, p. 775 – 800, 2014.

CHAN, W. W. J.; WU, C. M. L. Durability of Concrete with High Cement Replacement. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 30, n. 6, p. 865-879, 2000.

COLLEPARDI, S.; et al. Mechanisms of Action of Different Superplasticizers for High Performance Concrete. Gramado In: **international conference on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. 2. Proceedings**. 1999.

CONAMA - **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução nº 307/02. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, SEMA, 2002.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto. **Ambiente construído**, v. 9, n. 4, p. 99-107, 2009.

CUCHIERATO, G. **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da Região metropolitana de São Paulo (RmsP), visando seu aproveitamento econômico**. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

DA SILVA, G. F. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Carlos, 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D. C.; VIEIRA, F.M.P.; WOLF, J., **Concreto de Alta Resistência**. CDROM:Concreto de Alto Desempenho, Versão 1.0. Produzido porNUTAU/USP.1997.

DAL MOLIN, D. C. C.; OLIVEIRA, A. P. M. Estudo de concretos com adição de sílica ativa (microsílica) frente ao ataque de agentes agressivos para empregos em pisos especiais. s. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1., 1996, Florianópolis. **Proceedings..** Florianópolis: UFSC, 1996. p. 590-598.

DE SOUZA, C. A. **Utilização de Resíduo de Concreto como Agregado Miúdo para Argamassa de Concretos Estruturais Convencionais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) **Sumário mineral – Agregados para construção civil – Edição 2001 a 2008.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) **Sumário mineral – Agregados para construção civil – Edição 2009.**

DRAGO, C. VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. **Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland.** Minas Gerais, Outro Preto, 2009

FIEMG – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Guia de sustentabilidade no setor de artefatos de cimento. Câmara da indústria da construção, Belo Horizonte, 2009.

FERREIRA, A. A. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição.** 2013. 192p. Dissertação (Mestrado), Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

FORNASIER, R. S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com sílica ativa.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

FREITAS, J. A. Jr. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção

Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GASPARIM, J. C. **Concreto projetado elaborado com cimentos especiais: Análise segundo parâmetros de durabilidade**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. Rio de Janeiro, 1996.

GIL, A. C. **Como elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª Ed., Editora ATLAS S.A.: São Paulo, 2002.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: Uma análise crítica a partir de métodos complementares** – Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GONÇALVES, J.P; TAVARES, L.M; TOLEDO FILHO, R.D; FAIRBAIRN, E.M.R; CUNHA, E.R. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v.37, p.924–932, 2007.

GOWERS, K.R.; MILLARD, S. G. Measurement of concret resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. **ACI Materials Journal**. V.96. Nº5, 1999.

GUACELLI, P. A. G. **Substituição da areia natural por areia de britagem de rochas basálticas para argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Londrina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Londrina, 2010.

HELENE, PAULO R.L. **Tecnologia de edificações. Corrosão de armaduras para concreto armado**. São Paulo: Editora Pini, p. 597-602 1988.

HELENE, PAULO R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Editora Pini – Instituto de pesquisas Tecnológicas IPT, 1986.

HELENE, PAULO R.L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2.º ed. São Paulo: Editora Pini – Fosroc, 1992.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese de livre docência, USP. São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto**. In: Anais do workshop: Durabilidade das Construções, ANTAC, 1997.

HOFFMANN, L. **Efeitos da adição de materiais pulverulentos proveniente da britagem de rochas na resistência à abrasão de concretos convencionais.** Dissertação de Mestrado – PPGCC – UFPR, 123 f. Curitiba, 2015.

HERNÁNDEZ, F. O.; BARLUENGA, G. **Fire Performance of Recycled Rubber-Filled High- Strength Concrete.** Cement and Concrete Research, Elmsford, v. 34, n. 1, p. 109-117., 2003.

HERRMANN, H. **A mineração sob a óptica legal.** In: Lins, F. A. F.; Loureiro, F.E.V.; Albuquerque, G. A..A. S. C. Brasil 500 anos – A Construção do Brasil e da América Latina pela Mineração. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000.

HOFFMANN, L. **Efeitos da adição de materiais pulverulentos provenientes de britagem de rochas na resistência à abrasão de concretos convencionais.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná, 2015.

HOLSBACH, T. S. **Avaliação da substituição da areia natural por areia artificial em argamassa de cimento, cal e areia para assentamento.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: the physical science basis - Summary for policymakers.** Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 2007.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de Pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JALALI, S; TORRAL, P.F. Considerações sobre a sustentabilidade dos materiais de construção. **Engenharia e Vida**, 2008.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável.** Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, 2008.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2002.

LEMONS, P. E.; TRIGO, A. P. M.; AKASAKI, J. L., MELGES, J. L. P.; GIROTTI, L. S.; MENOSSI, R. T. **Estudo de dosagens de concretos com pó de pedra basáltica e 6 resíduos de borracha de pneus.** In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Bento Gonçalves - RS. 2007.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LODI, V. H.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó – SC.** In: Workshop Desempenho de Sistemas Construtivos, Unochapecó, Chapecó, SC, 2006.

LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 Mpa.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

LOPÉZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino.** São Paulo, 2005.

LÜBECK, A. **Resistividade elétrica de concretos de cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

MALHOTRA, V. M. Fly ash, slag, silica fume, and rice-hush ash in concrete: a review. **Concrete International**, V.15, no. 4, p. 23-28, apr., 1993.

MALHOTRA V.M & MEHTA, P. K. &. **High-performance high volume fly ash concrete.** Ottawa, 3th edition, 2008.

MANUAL PROCEQ – **Manual de instruções de operação**; Teste de durabilidade do concreto – Resipode.

MARLAND, G.; ANDRES, R. J. **Global, Regional, and National CO2 Emissions in Trends: A Compendium of Data on Global Change.** Oak Ridge, Tenn, U.S.A.: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2003.

MAURY, M. B., BLUMENSCHNEIN, R. N. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente.** Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MAYS, G. C. **The behaviour of concrete.** In.: Durability of concrete structures: investigation, repair, protection. London, 1992.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.** Editora: IBRACON, São Paulo, 2011.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloreto – (Tese de Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.**

MEHTA, P.K. **Concrete technology for sustainable development.** Concrete International, November, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, PAULO J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais.** 4ª. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MEHTA, P. K.. **Society, sustainability, and the global concrete industry.** Trabalho apresentado no 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, Curitiba, 2009.

MENDES, S. E. da S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MENOSSEI, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2004.

MINEROPAR – MINERAIS DO PARANÁ S/A. Substâncias deletérias dos agregados. Disponível em: < <http://www.mineropar.pr.gov.br> >. Acesso em: 14 de maio, 2013.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCT) **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil – Edição 2014.**

MOURA, R. Efeitos simbólicos do museu Oscar Niemeyer na internacionalização de Curitiba. *Arquitextos*, São Paulo, ano 11, n. 125.08, Vitruvius, out. 2010.



NEVILLE A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de GIAMMUSSO, S. E. 2<sup>a</sup>.ed. São Paulo: Pini, 1997.

NUGENT, F. R. Ensaio com areia artificial – como melhorar seu concreto. In: Colóquio Sobre Agregados para Concreto. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1979.

PANDOLFELLI, V.C.; OLIVEIRA, R. I.; STUDART, A. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 224 p

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influencia do tipo de cimento, relação a/c da temperatura e do tempo de cura**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PEREIRA, T. **Concreto auto adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adição de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Paulo, 2010.

PERIM, J. R. **Influencia do metaculim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

PIMENTEL, L. L. **Apostila de Materiais de Construção Civil A: Concreto**. PUC-Campinas, São Paulo, s/d.

POGGIALI, F. S. J. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas**. Especialização, Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Especialização em Construção Civil, Belo Horizonte, 2009.

POSSAN, E.; FOGAÇA, J. C.; PAZUCH, C. M. **Sequestro de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação do concreto: Potencialidades da barragem de Itaipu**. In: Revista de estudos ambientais, FURB, 2012.

RIBEIRO, C. C., PINTO, J.D.S., STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**, 4<sup>a</sup> ed. Revisada. Editora UFMG, 2013.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projeto de experimentos**, FEENG/ UFRGS, Porto Alegre, 2003.

RODOLPHO, P.M.; ISA, M. M. **A influencia da resistência à penetração de íons cloreto na carbonatação e na durabilidade das construções de microconcreto.** In: Congresso iberoamericano de patologias de las construcciones, Montevideo, 1999.

REGATTIERI, C. E. X.; HELENE, P.R.L. **Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/232. São Paulo, 1999.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D'ESSAIS DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS – RILEM Measurement of hardened concrete carbonation depth: RILEM CPC-18. **Materials and Structures**, v. 21, n. 6, p. 453-55, 1988.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D'ESSAIS DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS – RILEM Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion: RILEM TC-154-EMC. **Materials and Structures**, v. 36, n. 22, p. 461-471, 2003.

ROQUE, J. A. & MORENO JUNIOR, A.L. Considerações sobre vida útil do concreto. 1º Encontro nacional de pesquisa-projeto-produção em concreto pré-moldado. São Paulo, Campinas, 2005.

SALAS, F. R. P.; BERTOCINI, S. R. O uso de areia artificial britada em concretos de alto desempenho. In: 48º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Rio de Janeiro - RJ. 2006.

SANQUETTA, C. R.; FLIZIKOWSKI, L. C.; CORTE, A. P. D.; MOGNON, F.; MAAS, G. C. B. Estimativa das emissões de gases de efeito estufa em uma obra de construção civil com metodologia GHG PROTOCOL. UFPR – Curitiba, 2013.

SANTOS, G. R. S. *et al.* Avaliação da intensidade de deterioração de uma estrutura de concreto armado localizada em ambiente marinho e exposta à ação de solução acida: estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2006.

SCHUMACHER, H. R. S. P. **Caracterização do concreto convencional com pó de pedra em substituição parcial a areia natural.** Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Santa Catarina, Joinville, 2007.

SENTONE, D. T. **Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de revestimentos de argamassa.** Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para construção civil**. Departamento Nacional de Produção Mineral, Goiás, 2009.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SOARES, T.C.C. **Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos pós reativos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, 2015.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

SMITCH, K. M.; SCHOKKER, A. J.; TIKALSKY, P. J. Performance of supplementary cementitious materials in concrete resistivity and corrosion monitoring evaluations. **ACI Materials Journal**, v.101, N°5, 2004.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete. REserarch Institute, 1982.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 Ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

VALVERDE, F. M. **Agregados para a construção civil: Balanço Mineral Brasileiro**, São Paulo: Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção, 2001.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental de pilares de concreto armado de alta resistência sob flexo compressão reta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos (USP – EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

VEIGA, F. N.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. **Influência da adição de filler calcário na carbonatação do concreto**. Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro: IBRACON, 1998.

VIEIRO, E. H. **Aplicação da areia de britagem de rochas basálticas na fabricação de concreto de cimento Portland**. Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em materiais da Universidade de Caxias do Sul, (2010).

**WEIDMANN, D. F. Contribuição ao estudo da influência da forma da composição granulométrica de agregado miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

**WOLF, J. Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssílica.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.