

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

UAÇAI VAZ LORENZETTI

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS ASSOCIADAS À
DURABILIDADE DE CONCRETOS EM FUNÇÃO DA CURA, DA
DOSAGEM E DO TIPO DE CIMENTO**

FLORIANÓPOLIS
2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

UAÇAI VAZ LORENZETTI

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS ASSOCIADAS À
DURABILIDADE DE CONCRETOS EM FUNÇÃO DA CURA, DA
DOSAGEM E DO TIPO DE CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.
Área: Materiais Cerâmicos

Orientador: Marcio Celso Fredel
Co-orientador: Philippe Jean Paul Gleize

FLORIANÓPOLIS
2002

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS ASSOCIADAS À DURABILIDADE DE
CONCRETOS EM FUNÇÃO DA CURA, DA DOSAGEM E DO TIPO DE CIMENTO**

UAÇAI VAZ LORENZETTI

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESPECIALIDADE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS**

ORIENTADOR: PROF. MÁRCIO CELSO FREDEL, DR. ING.

COORDENADOR DO CURSO: PROF. ALEXANDRE LAGO

BANCA EXAMINADORA

**PROF. ORESTES ESTEVAM ALARCON, DR. ENG.
PRESIDENTE**

PROF. PHILIPPE JEAN PAUL GLEIZE, DR. ING.

PROF^a. DENISE ANTUNES DA SILVA, DR.

PROF. ROBERTO CALDAS DE ANDRADE PINTO, PH. D.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Márcio Celso Fredel, pela orientação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Philippe Jean Paul Gleize, pela co-orientação, pelos esclarecimentos às minhas dúvidas e por estar sempre disponível tornando possível a finalização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do curso de pós-graduação em Engenharia dos Materiais, pelos ensinamentos e apoio recebido.

Em especial aos professores Pedro Bernardini, pelo incentivo, e José Antônio Bellini da Cunha Neto, pela realização dos ensaios de porosimetria.

À professora Denise Antunes da Silva, pela leitura prévia deste trabalho e pelas sugestões.

Ao professor Pedro Barbeta, pela valiosa contribuição na interpretação estatística deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais da Engenharia Civil, Luiz Henrique e Renato, pelo apoio e ajuda durante a fase experimental desta pesquisa.

Ao aluno-bolsista Patrick Vaz, pela amizade e colaboração na fabricação do concreto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização do mestrado.

Às empresas que cederam material para a realização deste trabalho: Cimento Itambé e Pedrita.

A minha filha Júlia, pela paciência, pelo apoio, amor e carinho de todos os momentos.

Ao Roger Plouffe, pelo incentivo e carinho demonstrados ao longo deste trabalho.

E a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA	3
2. REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1 HISTÓRICO	4
2.2 CRITÉRIOS ATUAIS DE QUALIDADE DO CONCRETO	5
2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO	7
2.3.1 AGLOMERANTE (CIMENTO PORTLAND)	7
2.3.2 ÁGUA.....	11
2.3.3 AGREGADO.....	12
2.4 CONCRETO.....	13
2.4.1 MÉTODO DE DOSAGEM.....	14
2.4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	17
2.4.3 TRABALHABILIDADE	19
2.5 CARACTERÍSTICAS DE CONCRETOS ASSOCIADAS À DURABILIDADE	19
2.5.1 POROSIDADE.....	19
2.5.2 MECANISMOS DE DESLOCAMENTO DE FLUIDOS NO CONCRETO.....	20
2.6 CURA	21
2.6.1 CURA E PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.....	21
2.6.2 INFLUÊNCIA DOS PROCEDIMENTOS DE CURA NA RESISTÊNCIA.....	22
2.7 PERDA DE MASSA APARENTE	24
2.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	26
2.9 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	28
2.9.1 MECANISMOS DA CARBONATAÇÃO	29
2.9.2 VELOCIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	30
2.9.3 CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS COM CIMENTOS COMPOSTOS.....	31
2.10 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG).....	31
2.11 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (MIP).....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	36
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE (CIMENTO PORTLAND).....	37
3.3 MÉTODO DE DOSAGEM	39

3.3.1 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS	41
3.3.2 FABRICAÇÃO DO CONCRETO	42
3.4 SELEÇÃO E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	43
3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	43
3.4.2. PERDA DE MASSA APARENTE	45
3.4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	45
3.4.4 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	47
3.4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	49
3.4.6 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	53
4.1.1 INFLUÊNCIA DA CURA	54
4.1.2 INFLUÊNCIA DA CURA E DA DOSAGEM EM CIMENTO NA RESISTÊNCIA.....	56
4.1.3 COMPENSAÇÃO ENTRE DURAÇÃO DE CURA E DOSAGEM EM CIMENTO.....	63
4.2 INFLUÊNCIA DA CURA E DA DOSAGEM EM CIMENTO NA DURABILIDADE DO CONCRETO.....	67
4.2.1 PERDA DE MASSA.....	68
4.2.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	73
4.2.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	77
4.2.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	86
4.2.5 POROSIMETRIA.....	90
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5. CONCLUSÕES.....	100
ANEXO 1	105
ANEXO 2	115
REFERÊNCIAS	127

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 -	Volumes relativos do cimento não hidratado, dos produtos de hidratação e dos poros capilares de misturas com diferentes relações a/c, em diferentes estágios de hidratação (NEVILLE, 1997).....	6
FIGURA 2.2 -	Micrografias representativas das escalas de grandeza de um concreto (GARBOCZI, 1997).....	14
FIGURA 2.3 -	Consumos de cimento em função dos métodos de dosagens de concreto (OLIVEIRA, 1995).....	15
FIGURA 2.4 -	Resistência à compressão de concretos em função dos métodos de dosagem (OLIVEIRA, 1995).....	15
FIGURA 2.5 -	Absorções capilares de concretos (NBN 05-201) em função dos métodos de dosagens (OLIVEIRA, 1995).....	16
FIGURA 2.6 -	Massas específicas dos concretos em função dos métodos de dosagens (OLIVEIRA, 1995).....	17
FIGURA 2.7 -	Influência do período de cura úmida na resistência do concreto (PRICE, 1952).....	23
FIGURA 2.8 -	Relação entre a duração de secagem acelerada a 50 °C e a perda de massa realizada por diferentes laboratórios (QUENARD e CARCASSES, 1997).....	25
FIGURA 2.9 -	Relação entre a duração de secagem a 80 °C e a perda de massa para dois concretos (QUENARD e CARCASSES, 1997).....	25
FIGURA 2.10 -	Representação esquemática dos poros do concreto (C.E.B, 1989).....	26
FIGURA 2.11 -	Exemplo de curva obtida do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	27
FIGURA 2.12 -	Esquema do aparelho de análise termogravimétrica (BALAYSSAC, 1992).....	32
FIGURA 2.13 -	Curva termogravimétrica aos 120 dias da superfície (pele) do concreto com 400 kg/m ³ do CP I - S 32 e cura de 3 dias em imersão.	33
FIGURA 2.14 -	Volume acumulado em função do diâmetro do poro da argamassa para três relações a/c (45, 60 e 75 %) (LORENZETTI et al, 1999)....	34
FIGURA 2.15 -	Comparação dos resultados obtidos através de dois métodos de avaliação do tamanho dos poros de uma argamassa (DIAMOND, 2000).....	35
FIGURA 3.1 -	Curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo.....	37
FIGURA 3.2 -	Porcentagem de vazios em relação à proporção entre os agregados graúdo e miúdo (método O'Reilly).....	40

FIGURA 3.3 -	Esquema experimental do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	47
FIGURA 3.4 -	Característica do concreto carbonatado.....	48
FIGURA 3.5 -	Exemplo de curva obtida do ensaio de análise termogravimétrica.....	50
FIGURA 3.6 -	Exemplo de curva obtida do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.(LORENZETTI et al, 1999).....	52
FIGURA 4.1 -	Influência do período de cura imersa na evolução da resistência à compressão do concreto com 300 kg/m ³ do CP I – S 32 até a idade de 120 dias.....	54
FIGURA 4.2 -	Evolução das resistências à compressão nas idades estabelecidas do concreto com 300 kg/m ³ de CP I – S 32 em função de 1, 3, 7 e 28 dias de duração da cura imersa.....	55
FIGURA 4.3 -	Evolução das resistências à compressão nas idades estabelecidas do concreto com 300 kg/m ³ do CP II – Z 32 em função de 1, 3, 7 e 28 dias de duração da cura imersa.....	55
FIGURA 4.4 -	Resistência à compressão aos 28 dias em função da duração da cura imersa do concreto para três dosagens do CP I – S 32.....	56
FIGURA 4.5 -	Resistência à compressão aos 28 dias em função da duração da cura imersa do concreto para três dosagens do CP II – Z 32.....	57
FIGURA 4.6 -	Resistência à compressão aos 28 dias em função da duração da cura selada do concreto para três dosagens do CP I – S 32.....	58
FIGURA 4.7 -	Resistência à compressão aos 28 dias em função da duração da cura selada do concreto para três dosagens do CP II – Z 32.....	59
FIGURA 4.8 -	Comparação das resistências à compressão aos 28 dias em função do tempo de cura imersa e selada dos concretos, para as dosagens de 300, 350 e 400 kg/m ³ do CP I – S 32.....	59
FIGURA 4.9 -	Resistência à compressão ao final de cura do concreto com duas dosagens do CP I – S 32 em função do final da cura imersa.....	60
FIGURA 4.10 -	Comparação das curvas da resistência à compressão ao final de cura e aos 28 dias do concreto com duas dosagens do CP I – S 32 em função da duração da cura imersa.....	60
FIGURA 4.11 -	Variação da relação resistência em fim de cura/resistência aos 28 dias do concreto com duas dosagens do CP I – S 32 em função da duração da cura imersa.....	61
FIGURA 4.12 -	Tendência das curvas da resistência aos 120 dias do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função da cura imersa.....	62
FIGURA 4.13 -	Tendência das curvas da resistência aos 120 dias do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função da cura com selo	62
FIGURA 4.14 -	Relação entre as resistências à compressão ao final de cura e aos 120 dias dos concretos com duas dosagens de CP I – S e CP II – Z para 1, 7 e 28 dias de duração da cura imersa.....	63
FIGURA 4.15 -	Resistência à compressão aos 120 dias do concreto em função das dosagens do CP I – S 32 para diferentes durações de cura imersa.....	64
FIGURA 4.16 -	Resistência à compressão aos 120 dias do concreto em função das dosagens do CP II – Z 32 para diferentes durações de cura imersa....	65

FIGURA 4.17 - Tendência da reta da resistência à compressão aos 120 dias do concreto com CP I – S 32 e CP II – Z 32 em função da dosagem nominal de clínquer e gipsita para cura imersa de 28 dias.....	66
FIGURA 4.18 - Tendência da reta da resistência à compressão aos 28 dias do concreto com CP I – S 32 e CP II – Z 32 em função da dosagem nominal de clínquer e gipsita para cura imersa de 28 dias.....	66
FIGURA 4.19 - Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com 300, 350 e 400 kg/m ³ de CP I – S e CP II – Z em função da relação a/c para cura imersa de 28 dias.....	67
FIGURA 4.20 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 300 kg/m ³ de CP II – Z 32, após cura imersa, em função da secagem até a idade de 120 dias.....	69
FIGURA 4.21 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 300 kg/m ³ de CP II – Z 32, após cura selada, em função da secagem até a idade de 120 dias.....	69
FIGURA 4.22 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 300 kg/m ³ de CP I – S 32, após cura imersa, em função da secagem até a idade de 120 dias.....	70
FIGURA 4.23 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 300 kg/m ³ de CP I – S 32 após cura selada, em função da secagem até a idade de 120 dias.....	70
FIGURA 4.24 - Correlação da perda de massa aparente com a resistência à compressão do concreto aos 120 dias com duas dosagens de CP I – S 32 para curas de imersão e selada de 1, 3, 7 e 28 dias.....	72
FIGURA 4.25 - Correlação da perda de massa aparente com a resistência à compressão do concreto aos 120 dias com duas dosagens de CP II – Z 32 para curas de imersão e selada de 1, 3, 7 e 28 dias.....	72
FIGURA 4.26 - Profundidades de carbonatação aos 120 dias do concreto com 300 kg/m ³ de CP I - S 32 em função da duração e da condição de cura....	73
FIGURA 4.27 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias do concreto com 300 kg/m ³ de CP I – S 32 e CP II – Z 32 em função da duração da cura imersa.....	74
FIGURA 4.28 - Correlação da profundidade de carbonatação aos 120 dias com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m ³ de CP I – S 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.....	75
FIGURA 4.29 - Correlação da profundidade de carbonatação aos 120 dias com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m ³ de CP II - Z 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.....	75
FIGURA 4.30 - Correlação da profundidade carbonatada aos 120 dias com a perda de massa aparente aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m ³ de CP I – S 32 para as curas imersa e selada de 1, 3, 7 e 28 dias.....	76
FIGURA 4.31 - Correlação da profundidade carbonatada aos 120 dias com a perda de massa aparente aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m ³ de CP II – Z 32 para curas imersa e selada de 1, 3, 7 e 28 dias.....	77

FIGURA 4.32 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 300 kg/m ³ do CP I – S 32 e cura imersa em função da raiz quadrada do tempo.....	78
FIGURA 4.33 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 300 kg/m ³ do CP II – Z 32 e cura imersa em função da raiz quadrada do tempo.....	78
FIGURA 4.34 - Influência da cura na absorção de água por capilaridade aos 120 dias dos concretos com dosagem de 300 kg/m ³ de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para um dia de duração da cura imersa e selada.....	79
FIGURA 4.35 - Correlação da quantidade de água absorvida, em uma hora, aos 120 dias com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m ³ de CP I – S 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias das curas imersa e selada.....	80
FIGURA 4.36 - Correlação da quantidade de água absorvida, em uma hora, aos 120 dias com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m ³ de CP II – Z 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias das curas imersa e selada.....	80
FIGURA 4.37 - Absorção de água por capilaridade, em uma hora, aos 120 dias dos concretos em função da resistência à compressão ao final de cura imersa de 1, 7 e 28 dias para dois tipos e duas dosagem de cimento..	82
FIGURA 4.38 - Correlação da absorção de água por capilaridade (em uma hora) com a perda de massa aparente do concreto com 120 dias, com 300 e 400 kg/m ³ de CP I – S 32 e com durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.....	83
FIGURA 4.39 - Correlação da absorção de água por capilaridade (em uma hora) com a perda de massa aparente do concreto com 120 dias, com 300 e 400 kg/m ³ de CP II – Z 32 e com durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.....	83
FIGURA 4.40 - Correlação da profundidade carbonatada com a absorção de água por capilaridade (em uma hora) do concreto com 120 dias de idade e duas dosagens do CP I – S 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.....	84
FIGURA 4.41 - Correlação da profundidade carbonatada com a absorção de água por capilaridade (em uma hora) do concreto com 120 dias de idade e duas dosagens do CP II – Z 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.....	84
FIGURA 4.42 - Curva de caracterização das perdas de massa aos 120 dias da pele do concreto com 300 kg/m ² de CP II – Z 32 para 28 dias de cura com selo.....	86
FIGURA 4.43 - Curva de caracterização das perdas de massa aos 120 dias do miolo do concreto com 300 kg/m ² de CP II – Z 32 para 28 dias de cura com selo.....	86
FIGURA 4.44 - Relação entre resistência à compressão e água ligada do miolo do concreto aos 120 dias com 300 kg/m ² de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para 1, 3 e 28 dias de cura imersa e selo.....	88

FIGURA 4.45 - Relação entre perda de massa aparente e água ligada do miolo do concreto aos 120 dias com 300 kg/m ² de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para 1, 3 e 28 dias de cura imersa e selo.....	89
FIGURA 4.46 - Relação entre absorção de água por capilaridade e água ligada do miolo do concreto aos 120 dias com 300 kg/m ² de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para 1, 3 e 28 dias de cura imersa e selo.....	89
FIGURA 4.47 - Relação entre profundidade carbonatada e água ligada do miolo do concreto aos 120 dias com 300 kg/m ² de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para 1, 3 e 28 dias de cura imersa e selo.....	90
FIGURA 4.48 - Volume acumulado em função do diâmetro dos poros, aos 120 dias de idade, de amostras do miolo e da pele dos concretos, com CP II – Z 32 e CP I – S 32, submetidos a um dia de cura imersa.....	91
FIGURA 4.49 - Correlação da absorção capilar e da profundidade carbonatada do concreto com CP I – S 32, aos 120 dias.....	94
FIGURA 4.50 - Correlação da absorção capilar e a profundidade carbonatada do concreto com CP II – Z 32, aos 120 dias.....	94
FIGURA 4.51 - Correlação da resistência à compressão e da absorção capilar do concreto com CP I – S 32.....	95
FIGURA 4.52 - Correlação da resistência à compressão aos 120 dias e da absorção capilar do concreto com CP II – Z 32.....	95
FIGURA 4.53 - Correlação da resistência à compressão aos 120 dias e da dosagem em cimento do concreto com CP I – S 32.....	96
FIGURA 4.54 - Correlação da resistência à compressão aos 120 dias e da dosagem em cimento do concreto com CP II – Z 32.....	96
FIGURA 4.55 - Correlação da resistência à compressão ao final de cura e da absorção capilar do concreto com CP I – S 32.....	97
FIGURA 4.56 - Correlação da resistência à compressão ao final de cura e a absorção capilar do concreto com CP II – Z 32.....	97
FIGURA 4.57 - Resistência à compressão final de cura em função da cura imersa do concreto com CP I – S 32.....	98
FIGURA 4.58 - Resistência à compressão final de cura em função da cura imersa do concreto com CP II – Z 32.....	98
FIGURA A1.1 - Resistência à compressão ao final de cura do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função do final de cura por imersão.....	105
FIGURA A1.2 - Comparação das curvas da resistência à compressão ao final de cura e aos 28 dias do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função da duração da cura imersa.....	105
FIGURA A1.3 - Variação da relação resistência em fim de cura/resistência aos 28 dias do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função da duração da cura imersa.....	106
FIGURA A1.4- Resistência à compressão aos 120 dias do concreto em função das dosagens do CP II – Z 32 para diferentes durações de cura com selo.	107
FIGURA A1.5 - Resistência à compressão aos 120 dias do concreto em função das dosagens do CP I – S 32 para diferentes durações de cura com selo..	107
FIGURA A1.6 - Tendência das curvas da resistência aos 120 dias do concreto com duas dosagens do CP I – S 32 em função da cura imersa.....	108

FIGURA A1.7 - Tendência das curvas da resistência aos 120 dias do concreto com duas dosagens do CP I – S 32 em função da cura com selo.....	108
FIGURA A1.8 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 400 kg/m ³ de CP I – S 32, após cura imersa, em função da secagem até a idade de 120 dias.....	109
FIGURA A1.9 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 400 kg/m ³ de CP I – S 32, após cura com selo, em função da secagem até a idade de 120 dias.....	109
FIGURA A1.10 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 400 kg/m ³ de CP II – Z 32 em função da idade até 120 dias para cura imersa de 1, 3, 7 e 28 dias.....	110
FIGURA A1.11 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 400 kg/m ³ de CP II – Z 32 em função da idade até 120 dias para cura com selo de 1, 3, 7 e 28 dias.....	110
FIGURA A1.12 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias do concreto com 300 kg/m ³ de CP II - Z 32 em função da duração e da condição de cura...	111
FIGURA A1.13 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias do concreto com 400 kg/m ³ de CP I – S 32 e CP II – Z 32 em função da duração da cura imersa.....	111
FIGURA A1.14 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 300 kg/m ³ do CP I – S 32 e cura selada de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.....	112
FIGURA A1.15 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 300 kg/m ³ do CP II – Z 32 e cura selada de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.....	112
FIGURA A1.16 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 400 kg/m ³ do CP I – S 32 e cura imersa de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.....	113
FIGURA A1.17 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 400 kg/m ³ do CP II – Z 32 e cura imersa de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.....	113
FIGURA A1.18 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 400 kg/m ³ do CP I – S 32 e cura selada de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.....	114
FIGURA A1.19 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 400 kg/m ³ do CP II – Z 32 e cura selada de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.....	114

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 -	Relação dos componentes químicos do cimento anidro.....	8
TABELA 2.2 -	Resistência à compressão para diferentes tipos de cimento.....	18
TABELA 3.1 -	Dados do ensaio da análise granulométrica dos agregados.....	36
TABELA 3.2 -	Dados dos ensaios de caracterização física dos agregados.....	37
TABELA 3.3 -	Relatório das características químicas e físicas do cimento.....	38
TABELA 3.4 -	Exemplo de determinação da composição ótima entre areia média e brita 1 através do volume de vazios.....	40
TABELA 3.5 -	Exemplo de nova determinação da composição ótima entre a areia média e a brita 1 através do volume de vazios.....	41
TABELA 3.6 -	Composições e características dos concretos.....	42
TABELA 3.7 -	Resistências à compressão nas idades de 28 e 120 dias.....	44
TABELA 3.8 -	Resistência à compressão ao final de cura (R_{fc}) e evolução com a idade (R_{ei}).....	44
TABELA 3.9 -	Ensaio de absorção capilar na idade de 120 dias.....	46
TABELA 4.1 -	Valores da resistência à compressão para valores nominais de clínquer e gesso.....	65
TABELA 4.2 -	Correlação da resistência à compressão com a absorção de água por capilaridade do concreto.....	81
TABELA 4.3 -	Resistência à compressão e as características de qualidade do concreto.....	85
TABELA 4.4 -	Perdas de massa dos concretos com CP I – S 32 e CP II - Z 32 na análise termogravimétrica.....	87
TABELA 4.5 -	Características físicas do concreto detectadas pelo MIP.....	92
TABELA 4.6 -	Intervalos de porosidade da pele e do miolo do concreto.....	92
TABELA A2.1 -	Médias dos resultados das resistências à compressão aos 28 (R_{c28}) e 120 dias (R_{c120}).....	115
TABELA A2.2 -	Médias dos resultados das resistências à compressão ao final de cura (R_{fc}) e evolução com a idade (R_{ei}).....	116
TABELA A2.3 -	Médias dos resultados das perdas de massa aparente aos 120 dias $\Delta M/M$ (%)......	117
TABELA A2.4 -	Média dos resultados da absorção de água por capilaridade aos 120 dias AA (kg/m^2).....	118
TABELA A2.5 -	Dados referentes às determinações da profundidade carbonatada....	120
TABELA A2.6 -	Médias dos resultados da profundidade carbonatada P_c (mm).....	121
TABELA A2.7 -	Perdas de massa através da análise térmica (%)......	121

TABELA A2.8 - Análise estatística bidimensional - Coeficiente de correlação linear (R).....	122
TABELA A2.9 - Estatística de regressão linear simples - resistência à compressão..	123
TABELA A2.10 - Estatística de regressão linear simples - perda de massa aparente...	124
TABELA A2.11 - Estatística de regressão linear simples - absorção de água por capilaridade.....	125
TABELA A2.12 - Estatística de regressão linear simples - perda de massa aparente e absorção de água por capilaridade.....	126

RESUMO

As condições de conservação às quais o concreto é submetido, após sua fabricação e lançamento, podem ser diferentes daquelas especificadas no projeto e desse modo prejudicar as características almejadas, pois o concreto sofre influência particularmente no que diz respeito ao método e à duração de cura. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar como os procedimentos de cura influenciam a resistência à compressão, a microestrutura e como contribuem para a durabilidade do concreto de uso corrente.

A influência da cura foi avaliada em concretos imersos em água saturada de cal a (23 ± 2) °C e em concretos lacrados com filme plástico adesivo de PVC transparente na base e nas laterais, com exceção do topo, como se estivessem nas fôrmas de moldagem. Os concretos monitorados foram submetidos a essas condições por períodos de 1, 3, 7 e 28 dias. Os seguintes ensaios foram realizados: resistência à compressão para avaliar a resistência mecânica, perda de massa aparente, absorção de água por capilaridade e profundidade carbonatada para caracterizar o potencial da durabilidade, enquanto que, para avaliar a microestrutura, realizou-se análises termogravimétricas e porosimetria por intrusão de mercúrio. As dosagens experimentais de concretos foram realizadas utilizando-se dois tipos de cimentos Portland (CP I - S 32 e CP II - Z 32) nas proporções de 300, 350 e 400 kg/m³.

As informações oriundas desse trabalho permitem estimar o tempo eficaz de cura imersa, a fim de reter a água evaporável necessária para a hidratação do cimento e assegurar as propriedades do concreto. Os resultados mostram que em função do tipo do cimento, as condições de cura influenciam de maneira significativa a resistência à compressão e os parâmetros de durabilidade do concreto. Os resultados contribuíram, ainda, para tirar certas conclusões que abrem perspectivas, em particular, nos diversos tipos de correlações que podem ser colocadas em evidência. Permitiu-se assim, estabelecer como a resistência à compressão pode ser estimada a partir da sua correlação com valores desejados para caracterizar a durabilidade e também verificar como a cura e a dosagem em cimento podem compensar seus efeitos para alcançar essa resistência. Dessa forma, foi possível contribuir com a sugestão de ensaios simples como a absorção de água por capilaridade ou a perda de massa aparente para especificar a durabilidade.

ABSTRACT

The conditions of conservation to which concrete is submitted after being manufactured and cast may be different from those specified in the project and so they can damage the longed-for characteristics, so that the concrete may suffer influence, particularly concerning the curing method and duration. Then, the aim of this work is to analyse how curing procedures influence the compressive strength and the microstructure and how they contribute to the durability of the ordinary concrete.

The influence of curing was evaluated on concrete immersed into lime saturated water to (23 ± 2) °C and in concrete sealed with PVC transparent adhesive plastic film on the whole surface other than the top of it as if it was in molding containers. The monitored concrete was submitted to those conditions for periods of 1, 3, 7 and 28 days. The following tests were performed: compressive strength for evaluating the mechanical properties, apparent loss of mass, capillary sorption and carbonation depth for characterizing the potency of durability, whereas thermogravimetric analysis and mercury intrusion porosity were measured in order to evaluate the microstructure. The concrete was made by using two types of Portland cement (CP I - S 32 and CP II - Z 32) in proportions of 300, 350 and 400 kg/m³.

The information from this work enable us to estimate the effective time of immersed curing in order to retain evaporable water, necessary to the hydration of the cement and to assure the concrete properties. The results show that, because of the types of cement, curing conditions significantly influence the compressive strength and concrete durability parameters. The results also contributed to draw conclusions revealing some perspectives, particularly in the several kinds of correlations, which can be pointed out. It was allowed to state how the compressive strength could be evaluated from its correlation with the desired values, in order to characterize durability, as well as to verify how their curing and the proportion of cement can compensate their effects for that such strength may be achieved. Thus, it was also possible to collaborate with suggestions of a simple test, such as capillary sorption or apparent loss of mass to specify the durability.

1. INTRODUÇÃO

Em face do crescente consumo do concreto em âmbito mundial, muito esforço tem-se consagrado no seu estudo e particularmente no que diz respeito ao seu componente mais importante: o cimento Portland. Dessa forma, o avanço no campo tecnológico tem possibilitado o desenvolvimento de novas adições em diferentes proporções no cimento, visando minimizar o consumo energético e o impacto ambiental na sua obtenção. Porém, as diversas origens e proporções diferenciadas das adições do cimento - pozolanas, escória e filler - modificam o comportamento e o desempenho do concreto.

Assim, se as características de um concreto à base de um ligante hidráulico dependem, dentre outras coisas, do tipo e das proporções do cimento, as condições de conservação, às quais o concreto será submetido após a fabricação e o lançamento, determinam uma ampla variação das reações de hidratação, interferindo, particularmente, na sua estrutura porosa e, conseqüentemente, na sua durabilidade.

Quando o amadurecimento higrométrico do concreto efetua-se de forma a impedir a saída prematura da água de amassamento, há um gradual acréscimo na sua qualidade, observado tanto na resistência mecânica como na durabilidade. O principal objetivo da cura é impedir a saída prematura dessa água do concreto. Se ocorrer perda de parte da água por evaporação, principalmente nas idades mais recentes, a velocidade de hidratação do cimento vai diminuir, e pode até parar. Com isso, os poros capilares não serão preenchidos pelos produtos de hidratação, em particular, na camada de recobrimento do concreto que protege as armaduras, deixando caminhos preferenciais para a entrada de agentes agressivos.

Portanto, o centro de interesse desse trabalho visa avaliar o efeito da cura no comportamento do concreto para estabelecer correlações com a evolução do seu desempenho mecânico e com as características de sua durabilidade - em função da dosagem e do tipo de cimento (comum e modificado com substituições).

1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

No momento em que o concreto é lançado na fôrma e, às vezes, até mesmo antes, ele sofre a influência do meio exterior, que tanto pode ser por ação química (ataques de íons agressivos, cloretos, sulfatos, dióxido de carbono, líquidos e gases naturais ou artificiais) como por causa física (intempéries, variações de temperaturas e oscilações de umidade) sendo que a atuação normalmente é conjunta, pois raramente a causa é isolada. Depois, o concreto continuará em permanentes transformações físico-químicas internas; em outras palavras, ele se modifica e pode deteriorar precocemente. Entretanto, em curto prazo, as reações que entram em jogo na sua deterioração são imperceptíveis, pois sua ação é extremamente lenta.

Assim, pode-se dividir a evolução do concreto de duas maneiras: de uma parte o amadurecimento natural, conseqüência das reações de hidratação sob a influência da atmosfera quando há equilíbrio higroscópico e, de outra parte, o envelhecimento que pode ser provocado pelo meio ambiente quando ele é agressivo causando a degradação principalmente das armaduras.

Este trabalho tem por meta contribuir nesse panorama, através da avaliação de algumas das causas do envelhecimento precoce do concreto, ou seja, sua deterioração ainda em tempo de vida útil. O tema será abordado em função do processo de cura relacionada com ensaios (mecânico e microestrutural) que são utilizados para inferir a durabilidade do concreto.

Tomando por base o atual estado das pesquisas, sabe-se que já existe a preocupação em equacionar questões importantes e comumente formuladas referentes à durabilidade. Mas o assunto é vasto, e enquanto algumas questões estão sendo discutidas existem outras de relevância que ainda aguardam por respostas, entre elas, as formuladas abaixo:

- a) Quais são os procedimentos de avaliação de durabilidade, e como eles podem ser especificados e, mais importante, colocados em prática, principalmente com respeito à cura?
- b) Pode a qualidade e, portanto, a durabilidade do concreto ser quantificada?
- c) Se a relação água/cimento é importante, como cimentos de diferentes tipos e origens fornecerão um nível similar de durabilidade para a mesma relação água/cimento?
- d) Qual é a diferença na qualidade do concreto realizado com diferentes técnicas de cura?
- e) Qual é o efeito de prolongar ou estancar a cura, para o desempenho do concreto, em longo prazo?
- f) Como a duração de cura e a dosagem em cimento podem compensar seus efeitos para a obtenção de uma resistência à compressão a uma dada idade?

Assim, neste trabalho, as propriedades físicas e químicas do concreto endurecido foram avaliadas para responder uma questão simples: de que maneira a cura modifica a durabilidade do concreto?

Para descrever a influência da cura no concreto, associada às variações da dosagem em cimento, além do ensaio de resistência à compressão foram realizados ensaios associados à durabilidade (perda de massa aparente, absorção de água por capilaridade e profundidade carbonatada) e à microestrutura (análises termogravimétricas e porosimetria por intrusão de mercúrio).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo geral determinar a influência das condições de cura sobre a durabilidade dos concretos de uso corrente, através de ensaios de avaliação e diagnóstico da vida útil, e suas correlações com a resistência à compressão.

A partir do enfoque principal, apresentam-se os objetivos específicos da presente pesquisa, que podem ser definidos como:

- a) aprofundar estudos no tema da durabilidade do concreto de uso corrente, através da discussão do estado da arte;
- b) demonstrar a importância da proporção dos constituintes e evidenciar o efeito do teor de cimento;
- c) verificar a diferença de comportamento entre um cimento comum e um composto com pozolanas;
- d) avaliar dosagens com diferentes relações água/cimento;
- e) determinar correlações dos ensaios realizados;
- f) contribuir com dados para apontar um ensaio representativo da qualidade do concreto;
- g) traduzir a duração de cura no “equivalente” em cimento, pois os efeitos da cura não são independentes da dosagem em cimento do concreto;
- h) demonstrar a importância da cura para a qualidade do concreto.

1.3 ESTRUTURA

Após este capítulo introdutório, o Capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica sobre os temas: concreto, resistência à compressão, cura, características de durabilidade (porosidade e transporte de agentes agressivos) e ensaio de perda de massa aparente, carbonatação, absorção capilar, porosimetria e análise térmica.

No Capítulo 3, justifica-se a escolha dos ensaios e descrevem-se os métodos utilizados. A parte prática da presente pesquisa consiste no programa experimental desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil (LMCC), no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica (LabMAT), ambos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e no Laboratório de Materiais e Solos do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFET/SC).

No Capítulo 4, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos através dos estudos concernentes à influência da cura, do tipo e da dosagem em cimento sobre as propriedades e características do concreto endurecido, mostrando-se as correlações dos mencionados temas.

No Capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões, buscando-se confirmar as hipóteses previstas, e apresentam-se algumas recomendações de futuras pesquisas na área.

Por fim, colocam-se as Referências e os Anexos.

2. REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As condições de conservação às quais um concreto é submetido, após sua fabricação e lançamento, podem ser muito diferentes das condições visadas no projeto para garantir as características especificadas. Inúmeros pesquisadores concordam, particularmente no que diz respeito à cura, que o concreto é influenciado e pode ser prejudicado quanto à falha no método e tempo de exposição, aliados a outros fatores como temperatura elevada, baixa umidade relativa do ar, velocidade do vento e incidência direta do sol.

Quando o concreto é colocado num ambiente desfavorável, algumas das conseqüências de falha na cura são bem conhecidas:

- a) diminuição da resistência;
- b) maior tendência à fissuração;
- c) aumento da porosidade capilar;
- d) diminuição da vida útil.

2.1 HISTÓRICO

O concreto se deteriora de muitas maneiras, mas talvez o maior dano seja ao concreto armado pela corrosão da armadura que se encontra próxima do concreto de recobrimento. Países como os Estados Unidos e Austrália têm estimado os custos com reparos em estruturas de concreto (edifícios públicos, pontes, viadutos) e os resultados têm sido alarmantes.

Nos E.U.A, no momento, 22.000 pontes de concreto encontram-se em recuperação, a um custo estimado de 20 bilhões de dólares. O problema principal é a corrosão de armaduras. Os E.U.A, em breve, estarão gastando mais dinheiro na recuperação das pontes existentes do que na construção de novas pontes. Isso já ocorre na Inglaterra, desde 1995 e no Canadá desde 1999 (ALMEIDA, 2001). Na Austrália, segundo HO e CHIRGWIN (1995), o custo de reparos de estruturas de concreto foi estimado no ano de 1987, em 50 milhões de dólares por ano, aproximadamente, representando 10 % do valor destinado para a construção de novas estruturas.

Face ao crescente número de estrutura de concreto armado com manifestações patológicas, devido ao envelhecimento precoce, alguns documentos de referência, citados por HELENE (2001), que bem tratam do tema durabilidade, são o CEB-FIP Mode Code 90, CEB design Guide, ACI COMMITTEE 201, o projeto de normas européias ENV-206 e o projeto de revisão e ajustes da NBR 6118 (NB 1 da ABNT). Esses documentos tendem a definir, especificar e estabelecer regras para o gerenciamento da durabilidade das estruturas de concreto.

Atualmente, relevantes estudos nacionais têm-se voltado para a questão da durabilidade, tendo em vista que a reformulação da NB 1/2001 (NBR 6118 de 2001, projeto em votação, ABNT) reserva um capítulo sobre a durabilidade do concreto. O amplo enfoque irá agenciar mudanças significativas na maneira de especificar, projetar e controlar o concreto. A reformulação busca consenso entre os pesquisadores para a definição dos ensaios a serem contemplados como indicadores da durabilidade. O ensaio de absorção de água por capilaridade está entre os mais discutidos, por motivos que serão analisados e discutidos, também, neste trabalho.

Existem, ainda, associações como a Association Française de Recherche et D'essais sur les Matériaux et les Constructions (AFREM, 1994), na França, que promove estudos sobre a durabilidade do concreto. Essas pesquisas têm uma missão bem específica; comparar modelos e métodos que permitam avaliar a durabilidade do concreto.

2.2 CRITÉRIOS ATUAIS DE QUALIDADE DO CONCRETO

Durante muito tempo o concreto foi avaliado pela sua capacidade de resistência mecânica à compressão. Atualmente, a qualidade potencial do concreto é preponderante e depende: do tipo de cimento, da relação a/c e do grau de hidratação. São esses os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar de água, de permeabilidade por gradiente de pressão d'água ou de gases, de difusibilidade de água ou de gases, enfim, os parâmetros do concreto em relação ao transporte de íons, gases e líquidos através de seus poros, assim como todas as propriedades mecânicas tais como módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, abrasão e outras (HELENE, 2001).

A resistência à compressão do concreto está diretamente relacionada com a qualidade da estrutura da pasta de cimento hidratado e é influenciada pelas suas propriedades que, por sua vez, dependem dos aspectos da microestrutura.

A resistência da pasta de cimento endurecido está ligada à sua estrutura porosa. Como todo material poroso, a pasta de cimento endurecido tem sua resistência reduzida com o aumento da porosidade (MOURET, 1997). Os poros capilares, que tornam a argamassa permeável e reduzem sua resistência mecânica, dependem da relação a/c. FOLLIOT (1982) argumenta que os poros capilares são preenchidos pelos produtos de hidratação à medida que a hidratação progride. Entretanto, para um dado grau de hidratação do cimento, toda a água da pasta se constituirá em excesso, para relação a/c acima de 0,35, aproximadamente, proporcionando efeito negativo pelo surgimento dos poros capilares.

NEVILLE (1997) avaliou a hidratação de pastas de cimento em diferentes estágios de cura em imersão, de modo que a água possa penetrar à medida que os capilares se esvaziam pela hidratação. Constatou, conforme figura 2.1, que alguns capilares podem conter o excedente de água da mistura, e outros podem ser preenchidos com água proveniente do exterior. Somente para relação água/cimento muito baixa, igual ou menor que 0,38, em massa, todo o cimento pode se hidratar eliminando a presença de poros capilares. Com a/c superior a 0,38, a água fica em excesso nos capilares. Para este pesquisador, é correto relacionar a resistência com a concentração de produtos sólidos de hidratação do cimento no espaço disponível para eles.

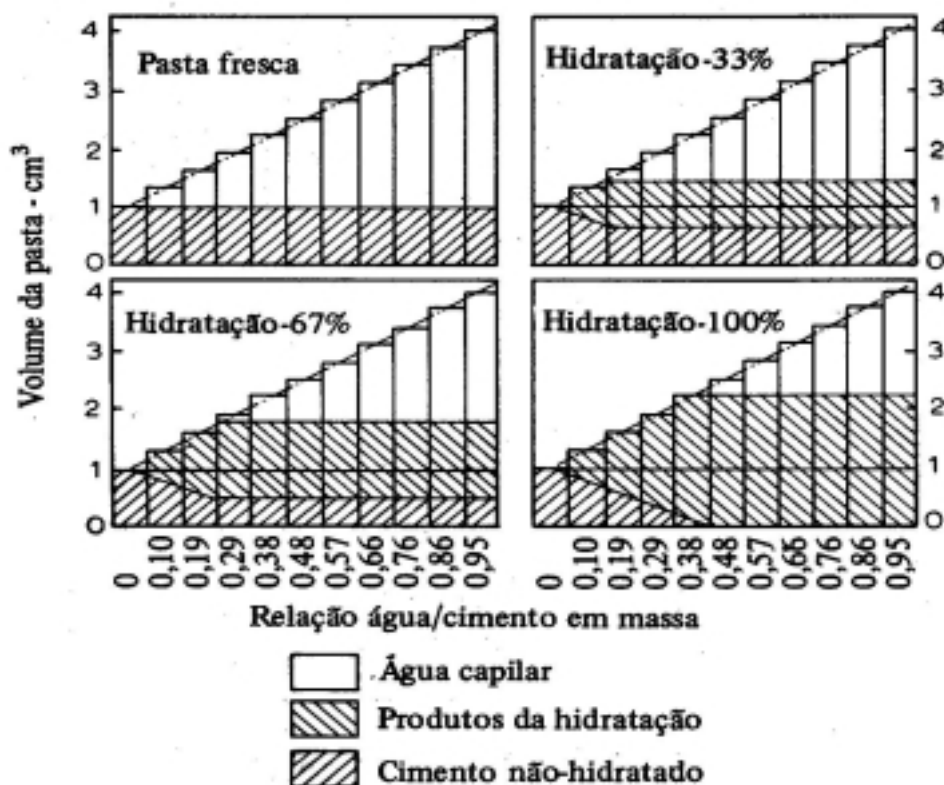


FIGURA 2.1- Volumes relativos do cimento não hidratado, dos produtos de hidratação e dos poros capilares de misturas com diferentes relações a/c, em diferentes estágios de hidratação (NEVILLE, 1997).

De fato, logo após a retirada das fôrmas do concreto ele fica muito vulnerável por causa da sua microestrutura ainda em início de formação. Colocado num ambiente propício à dessecação, ele perde rapidamente sua água livre. Esse fenômeno pode prejudicar e até interromper o desenvolvimento das reações de hidratação do cimento, perto das faces expostas, ao nível das superfícies externas, numa zona de espessura tal que pode ser comparada à camada de recobrimento das armaduras. Nessas zonas, a estrutura torna-se pouco resistente e muito porosa.

Pergunta-se, então, como evoluirá a hidratação do cimento para elementos submetidos a condições de dessecação precoces, e quais seriam as conseqüências mecânicas e microestruturais no concreto endurecido.

Durante os últimos quinze anos, foi mostrado que as propriedades e a durabilidade dos materiais à base de cimento podem ser substancialmente melhoradas, incorporando-se os conhecimentos básicos da ciência dos materiais sobre as relações entre processo, microestrutura, propriedades e durabilidade do material (PRATT, 1988).

O principal objetivo da ciência dos materiais é controlar propriedades e comportamento através do controle da microestrutura. Para atingi-lo, características importantes da microestrutura devem ser identificadas e avaliadas numericamente. Portanto, a

estratégia é a compreensão das alterações que ocorrem na escala microestrutural, visando o desempenho e a durabilidade.

Por exemplo, nos metais, a microestrutura pode ser alterada pelo controle da composição, através de tratamento mecânico e térmico dos materiais e, entendida através das discordâncias, das formas e dos tamanhos dos grãos, pelo diagrama de fases, etc.

No caso de materiais à base de cimento, definir a microestrutura, em termos de estabelecer ligações entre processo e propriedades, é ainda uma ciência incompleta (JENNINGS e SUJATA, 1996), pois, nesse caso, é muito complexa devido aos seguintes fatores:

- a) presença de fases hidratadas com composições e características microestruturais que apresentam grande variação de um ponto ao outro;
- b) presença de uma fase aquosa, de composição variável, no interior de poros com dimensões que variam dentro de uma grande escala de magnitude;
- c) a estrutura muda com o tempo e condições de exposição.

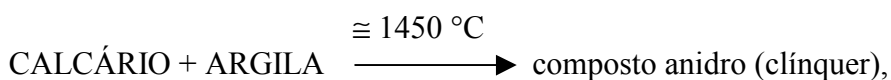
Portanto, é essencialmente a microestrutura da pasta de cimento que deve ser entendida no concreto, por causa de sua influência no comportamento e nas propriedades desse.

2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO

2.3.1 AGLOMERANTE (CIMENTO PORTLAND)

Os cimentos anidros são minerais pulverulentos, obtidos pela fusão incipiente e posterior moagem de uma mistura de calcário e argila, apresentando a capacidade de endurecer ao contato com a água. O cimento anidro é composto pelo clínquer, gipsita e componentes secundários, tais como escória de alto forno, cinzas volantes, filer calcário ou pozolana (CARDE, 1996).

O esquema abaixo apresenta os dois principais componentes e a temperatura para fabricação do cimento Portland:



onde:

CALCÁRIO: CaCO_3 + impurezas,

ARGILA: silicatos complexos de Fe, Al e outros elementos, dando os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 ,

CLÍNQUER: silicatos e aluminatos de cálcio, cal livre e compostos alcalinos,

CLÍNQUER + GIPSITA \Rightarrow moagem e mistura \Rightarrow cimento Portland.

A tabela 2.1 apresenta a composição química média de um cimento Portland comum.

TABELA 2.1 - Relação dos componentes químicos do cimento anidro.

Componentes	Óxidos	Porcentagens
Óxido de cálcio	CaO (cal)	60 a 70 %
Óxido de silício	SiO ₂ (sílica)	17 a 25 %
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃ (alumina)	3 a 8 %
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	2 a 5 %
Óxido de magnésio	MgO (magnésia)	0 a 7 %
Óxido de sódio e potássio	Na ₂ O, K ₂ O (álcalis)	0 a 0,6 %
Trióxido de enxofre	SO ₃ (sulfetos)	0,5 a 2 %

Para simplificar a leitura, adota-se a nomenclatura (abreviações) em química do cimento com a notação das indústrias cimenteiras: C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, N = Na₂O, T = TiO₂, K = K₂O, P = P₂O₅, H = H₂O, M = MgO, \bar{C} = CO₂ e \bar{S} = SO₃.

2.3.1.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DO CIMENTO PORTLAND ANIDRO

Clínquer

Os quatro principais óxidos do clínquer (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) se dividem em:

- a) quatro fases principais,
 - silicato tricálcico $\Leftrightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \Leftrightarrow \text{C}_3\text{S}$ (alita) 40 % - 70 %;
 - silicato dicálcico $\Leftrightarrow 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \Leftrightarrow \text{C}_2\text{S}$ (belita) 10 % - 40 %;
 - aluminato tricálcico $\Leftrightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \Leftrightarrow \text{C}_3\text{A}$ (celita) 5 % - 15 %;
 - aluminato ferrítico $\Leftrightarrow 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \Leftrightarrow \text{C}_4\text{AF}$ 5 % - 10 %;
- b) fases minoritárias (ou impurezas do clínquer),
 - M = MgO (0 % - 7 %);
 - C = CaO (0 % - 2 %);
 - K = K₂O e N = Na₂O (álcalis) (0 % - 2 %).

As fases minoritárias como o MgO e o Na₂O têm seus teores controlados por serem expansivos em contato com agregados reativos, assim como o composto não combinado CaO (cal livre) – que é inerente à fabricação do cimento Portland.

Gipsita

A gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é adicionado ao cimento, em até 4 %, com a função de impedir a rápida hidratação das fases anidras do clínquer. A gipsita reage, preferencialmente, com o aluminato tricálcico (C_3A), formando o trissulfoaluminato (etringita), retardando ou impedindo a pega instantânea.

Adição de pozolana

As pozolanas são definidas como materiais silicoso ou sílico-aluminoso que, por si mesmos, possuem poucas ou nenhuma propriedades cimentantes, porém, numa forma finamente moída e na presença de umidade, reage quimicamente de preferência com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. É um material hidráulico latente na presença do cimento Portland (NEVILLE, 1997).

As partículas de pozolanas possuem diâmetro entre 1 μm a 100 μm (50 % são menores que 20 μm), equivalentes ao cimento Portland (50 % das partículas do clínquer moído devem ter entre 3 μm e 30 μm). Suas partículas esféricas são benéficas do ponto de vista da demanda de água, pois melhoram a mobilidade relativa ou a capacidade de fluir do concreto.

As cinzas sílico-aluminosas (*fly-ash*) são as pozolanas artificiais mais comumente adicionadas ao cimento Portland. As mais comuns são provenientes das centrais térmicas alimentadas com a queima do carvão betuminoso pulverizado, daí a denominação “*cinza volante pulverizada*”. Portanto, a composição mineralógica, as propriedades e a qualidade desse componente do cimento são bastante variáveis, pois são subprodutos do carvão.

MEHTA e MONTEIRO (1994) comentam que as cinzas volantes diferem entre si principalmente quanto ao teor de cálcio, e podem ser divididas em duas categorias:

- a) primeira categoria: geralmente subproduto de antracito e carvões betuminosos, contém menos de 10 % de CaO . Devido à proporção elevada de sílica e alumina, consistem basicamente de vidros de aluminossilicatos podendo ser silimanita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) ou mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), ou ainda, quartzo- α , hematita ou magnetita (tipo F);
- b) segunda categoria: contém normalmente de 15 a 30 % de CaO e é, geralmente, um produto de combustão de lignito ou de carvões sub-betuminosos (tipo C).

2.3.1.2 REAÇÕES DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A adição de água à mistura anidra leva à formação de uma pasta de cimento, que é um meio poroso constituído por fases sólidas anidras e/ou hidratadas, e por uma solução intersticial que preenche parcialmente os poros.

Mecanismos de hidratação do cimento Portland

Para alguns pesquisadores como REGOURD (1982), TAYLOR (1992), MEHTA e MONTEIRO (1994), segundo as teorias clássicas de Le Chatelier e Michaelis, as reações de hidratação do cimento Portland ocorrem por dois mecanismos:

- dissolução-precipitação: envolve a dissolução de compostos anidros do cimento em seus constituintes iônicos que se reorganizam para formar os compostos hidratados na solução e, devido à baixa solubilidade, ocorre uma precipitação dos íons provenientes da solução supersaturada;
- topoquímico ou hidratação em estado sólido do cimento: as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro sem entrar em solução.

A partir de estudos sobre pastas de cimento com microscópio eletrônico, o primeiro mecanismo parece ser dominante nos estágios iniciais da hidratação. Quando a mobilidade iônica na solução se torna restrita, a hidratação das partículas residuais do cimento pode ocorrer pelo segundo mecanismo (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

As principais fases do cimento hidratado são os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), o hidróxido de cálcio denominado portlandita (CH), a etringita ou o trissulfoaluminato de cálcio hidratado ($C_3A.3\overline{CS}.H_{32}$) e o monossulfoaluminato de cálcio hidratado ($C_3A.C\overline{S}.H_{12}$). As reações químicas que ocorrem entre a água e os constituintes anidros conduzem à formação das seguintes fases hidratadas (REGOURD, 1982):

fases anidras		fases hidratadas
C_3S	\Rightarrow	$C-S-H + CH;$
C_2S	\Rightarrow	$C-S-H + CH;$
C_3A	\Rightarrow	$C_2AH_8 + \underline{C_4}AH_{13} + C_3\overline{A}H_{13};$
$C_3A + \text{gipsita}$	\Rightarrow	$C_3A.3\overline{CS}.H_{32} + C_3A.C\overline{S}.H_{12} + \underline{C_4}AH_{13};$
C_4AF	\Rightarrow	$C_3(A,F).3\overline{CS}.H_{32} + C_3(A,F).C\overline{S}.H_{12} + C_4(A,F).H_{13}.$

O principal composto responsável pela coesão das pastas de cimento é um silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que pode apresentar-se em forma de: fibras compostas por lamelas enroladas em si mesmas (tipo I), podendo aparecer em outros casos como uma malha ou colméia (tipo II) ou como uma estrutura fina sem traços definidos (tipo III) e, em alguns casos, como uma estrutura densa (tipo IV) (DIAMOND, 1986). Assim, o C-S-H recobre progressivamente os grãos anidros de cimento e preenche aos poucos os espaços intergranulares, dando origem às principais propriedades da pasta de cimento endurecida. Atualmente, os silicatos de cálcio hidratados são, em geral, representados como C-S-H e admite-se que a relação C/S esteja entre 1,5 e 2 (o excesso de cal encontra-se em forma de portlandita) (NEVILLE, 1997). A portlandita (CH) forma placas hexagonais empilhadas entre os grãos de cimento parcialmente hidratados.

MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que as forças de atração de Van der Waals, nos produtos da pasta de cimento Portland, propiciam a adesão entre duas superfícies sólidas. A resistência é atribuída a essas forças de natureza física, sendo o grau de ação

aderente dependente da extensão e natureza das superfícies envolvidas. Os pequenos cristais de C-S-H possuem área específica elevada e grande capacidade de adesão. Esses produtos de hidratação do cimento tendem a aglomerar-se uns aos outros, aos sólidos de área específica baixa (tais como o hidróxido de cálcio e grãos de clínquer anidro) e às partículas de agregado miúdo e graúdo.

Mecanismos de hidratação do cimento Portland com adições de pozolanas

A reação pozolânica pode ser escrita basicamente da seguinte maneira:

S (sílica pozolânica) + CH + H \Rightarrow C-S-H (produto proveniente da reação pozolânica).

O C-S-H formado através das reações pozolânicas é denominado “secundário”, pois a reação entre a pozolana (S) e o CH só ocorre após as reações iniciais de hidratação do cimento (reações com C₃S e C₂S). Conseqüentemente, são mais lentas (ocorrem mais tarde) e, ainda, o C-S-H resultante tem proporção de CaO/SiO₂ diferente do C-S-H proveniente do clínquer (AÏTCIN, 2000).

2.3.2 ÁGUA

Assim como o cimento e os agregados, a água é um constituinte do concreto. Por suas propriedades físico-químicas ao mesmo tempo em que assegura a hidratação do cimento ela confere plasticidade ao concreto no estado fresco. Em seguida, participa do processo de endurecimento do concreto com a importante função de continuar a hidratação do cimento, para a progressiva estruturação do material, conferindo-lhe resistência e durabilidade em longo prazo.

Não existem recomendações particulares concernentes à qualidade da água utilizada para fabricar o concreto, sendo que, na maioria das vezes, é água potável distribuída pela rede de serviço público. Dessa forma, fica claro que esse constituinte não deve conter matérias orgânicas indesejáveis nem substância inorgânica em teores excessivos.

No concreto endurecido, a água apresenta-se de muitas formas, sendo que as de maior interesse para o estudo da durabilidade são: (i) livre (ii) adsorvida, (iii) intersticial e (iv) combinada (ligada).

Água livre

A água livre é aquela que não participa, inicialmente, dos processos físicos e químicos de interações com os componentes anidros do cimento, mas será utilizada nas futuras reações de hidratação. O excesso dessa água é que forma os poros capilares e é a primeira a migrar, sendo eliminada por evaporação quando ocorre dessecação, deixando atrás de si uma estrutura porosa (REGOURD, 1982). Para a caracterização dos ensaios essa água evapora no decorrer de secagem em estufa a (105±5) °C por um período de aproximadamente 24 horas ou até constância de massa.

Água adsorvida

A água retida pelas forças superficiais das partículas hidratadas do cimento é denominada água de adsorção (NEVILLE, 1997).

Água intersticial

Parte da água de adsorção retida entre as superfícies de certos planos de um cristal, particularmente no microcristal lamelar C-S-H, é denominada água intersticial (interlamelar). Tanto a água adsorvida como a intersticial fazem parte dos poros dos produtos hidratados do cimento, mas a mobilidade dessas águas é diferente das propriedades da água livre, devido ao pequeno diâmetro desses poros (NEVILLE, 1997).

Água ligada

A água combinada quimicamente, que forma os hidratos de cimento, é denominada água ligada ou combinada. Ela pode ser extraída após calcinação da amostra em um forno ou mufla a 1000 °C durante uma hora (REGOURD, 1982).

2.3.3 AGREGADO

Segundo O'REILLY (1998), no que diz respeito aos procedimentos de elaboração das misturas de concreto, vários autores estão de acordo que há dependência das características dos agregados tais como: forma, área específica, trituração, rugosidade, textura, etc. Dessa maneira, o agregado contribuirá ou não para melhorar as características do concreto. Porém, o aproveitamento prático desse conhecimento esbarra no grau de dificuldade associado à determinação dessas características. No procedimento de elaboração de misturas de concreto, suas influências dificilmente podem ser determinadas quantitativamente e, além disso, não podem ser expressas com exatidão como, por exemplo, a rugosidade ou a textura da superfície. O método de dosagem O'REILLY, que será focado na seqüência deste trabalho, é elaborado levando em conta o melhor empacotamento dos agregados.

Portanto, o agregado tem um importante papel na composição da dosagem do concreto e é essencial que se conheçam todos os parâmetros, antes de iniciar qualquer pesquisa. Logo, ensaios preliminares de granulometria, de massa específica, de material pulverulento, teor de argila e matéria orgânica, entre outros, são realizados previamente.

Os agregados podem ser classificados em categorias em função da: (i) dimensão; (ii) origem; (iii) composição mineralógica e (iv) massa específica. Dessa forma, através de ensaios normalizados, testa-se a adequação do agregado para compor o concreto.

MOURET (1997) comenta que a resistência do concreto depende da pasta, dos agregados, da adesão pasta-agregados e da concentração dos grãos no concreto. No caso de concretos de uso corrente é razoável supor que as propriedades mecânicas dos agregados, habitualmente empregados, são superiores às da pasta. Portanto, a resistência

global é governada principalmente pela resistência da pasta e da sua adesão aos agregados.

Para MEHTA e MONTEIRO (1994), os materiais constituintes devem ser escolhidos entre os tecnicamente aceitáveis e, ao mesmo tempo, economicamente atrativos.

2.4 CONCRETO

O concreto é um material compósito que apresenta uma microestrutura totalmente heterogênea, numa escala de grandeza de nanômetro até milímetros, com cada nível de observação desenvolvendo um novo material compósito (GARBOCZI, 1997).

O nível usual de observação do concreto na engenharia é na escala macroscópica (metro), sendo considerado um material uniforme com propriedades de resistência à compressão, à abrasão (desgaste), fluência e outras.

Na observação visual de uma amostra de concreto, esse pode ser considerado como um material compósito de agregados graúdos repartidos de forma aleatória numa matriz de argamassa. A figura 2.2 (a) representa uma micrografia de agregados graúdos envoltos em uma argamassa.

A matriz de argamassa do concreto analisada no microscópio ótico (MO) é definida como um compósito de agregados miúdos (areia) numa matriz de pasta de cimento. A figura 2.2 (b) apresenta micrografia de agregados miúdos em uma matriz de pasta de cimento.

Observada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), em micrômetros, a matriz da pasta de cimento é, também, uma estrutura compósita (figura 2.2 c). Podem-se visualizar cimento não hidratado, poros capilares e as várias fases resultantes das reações de hidratação do cimento com água, cuja principal fase é um silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O C-S-H é um composto amorfo ou pouco cristalino, podendo ser considerado como o elemento que dá coesão às demais fases do cimento e agrega os componentes da argamassa e do concreto.

Ampliando ainda mais a imagem no microscópio eletrônico de transmissão (MET), em nanômetros, podemos identificar que o C-S-H é um material complexo, apresentando uma microestrutura porosa, com arranjo aleatório. A figura 2.2 (d) apresenta a micrografia do C-S-H.

A estrutura do concreto cobre nove ordens de grandeza, indo do nanômetro (C-S-H), passando pelo micrômetro (pasta de cimento) até o metro (escala da aplicação).

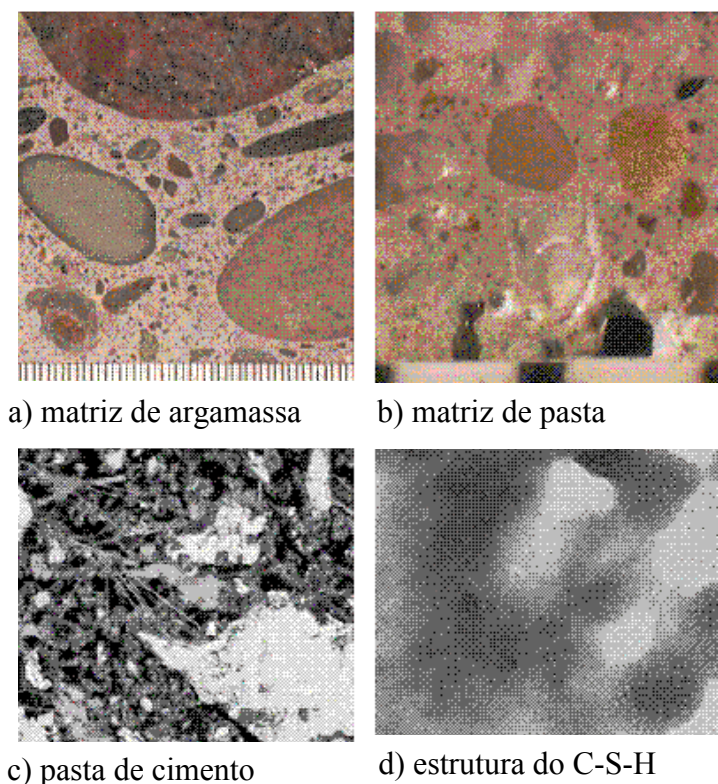


FIGURA 2.2 - Micrografias representativas das escalas de grandeza de um concreto (GARBOCZI, 1997).

2.4.1 MÉTODO DE DOSAGEM

Para MEHTA e MONTEIRO (1994), a dosagem do concreto é o processo utilizado para obter a melhor proporção entre seus materiais constituintes, atendendo a especificações prévias. Normalmente, os requisitos são a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido a uma idade definida. Os autores afirmam que, em operações rotineiras de dosagens, a durabilidade é normalmente ignorada, a menos que fortes razões de meio ambiente agressivo obriguem a considerá-la.

OLIVEIRA (1995) constatou, figura 2.3, que diferentes métodos de dosagens de concretos praticados no Brasil como: do Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e do Concreto de Elevado Desempenho (O'REILLY, 1998) levam a diferentes consumos de cimento.

A propósito que, maiores consumos de cimento não levam necessariamente a concretos mais resistentes, GRANJU et al (1984) (apud BALAYSSAC, 1992) comentam que o aumento na quantidade de cimento aumenta a quantidade de produtos de hidratação, mas a taxa de hidratação não segue forçosamente o mesmo sentido. Os grãos anidros têm necessidade de espaço vazio para formar os produtos de hidratação e espaços muito densos, com dosagem alta em cimento, tendem a bloquear a criação de novos produtos de hidratação.

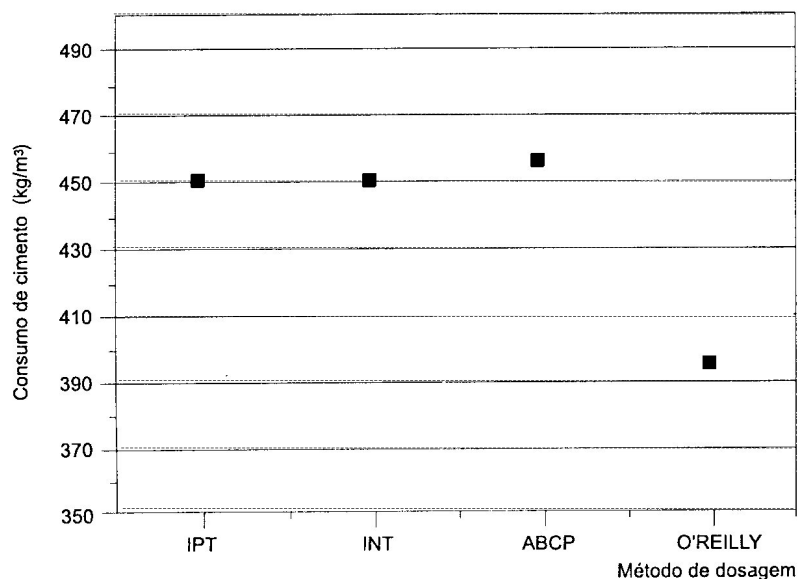


FIGURA 2.3 - Consumos de cimento em função dos métodos de dosagens de concreto (OLIVEIRA, 1995).

Nessa linha de raciocínio, OLIVEIRA (1995) representa graficamente na figura 2.4 os resultados da comprovação experimental dos métodos de dosagens e constata que todos os concretos atendem a resistência média à compressão fixada, aos 28 dias, de 27 MPa.

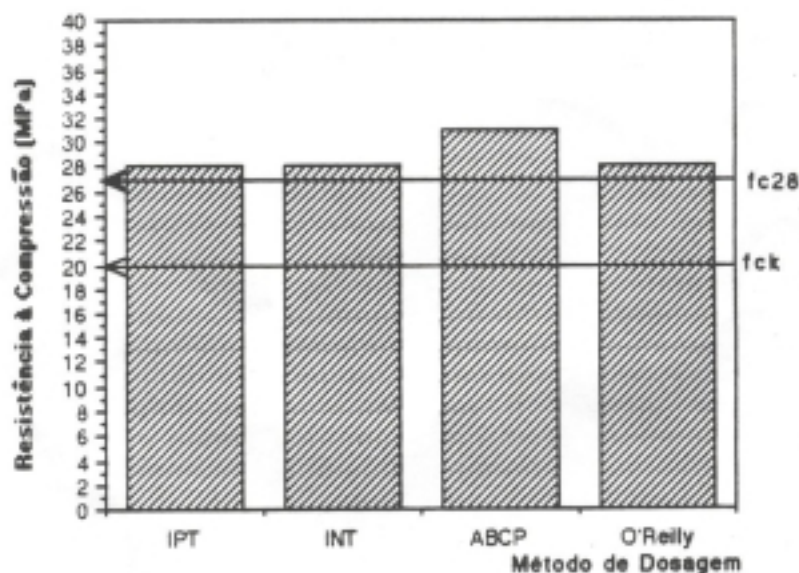


FIGURA 2.4 - Resistência à compressão de concretos em função dos métodos de dosagens (OLIVEIRA, 1995).

No entanto, verifica na figura 2.5 que a absorção de água por capilaridade (método de ensaio NBN 05-201 do Institut Belge de Normalisation – Capacité d'impregnation d'eau par capillarité) teve uma grande variabilidade. Assim, constata-se que diferentes

métodos de dosagem podem apresentar a mesma classe de resistência, mas não apresentam a mesma eficácia quando o tema aborda a durabilidade. Logo, a durabilidade depende fundamentalmente do método de dosagem, ou seja, da proporção entre seus constituintes.

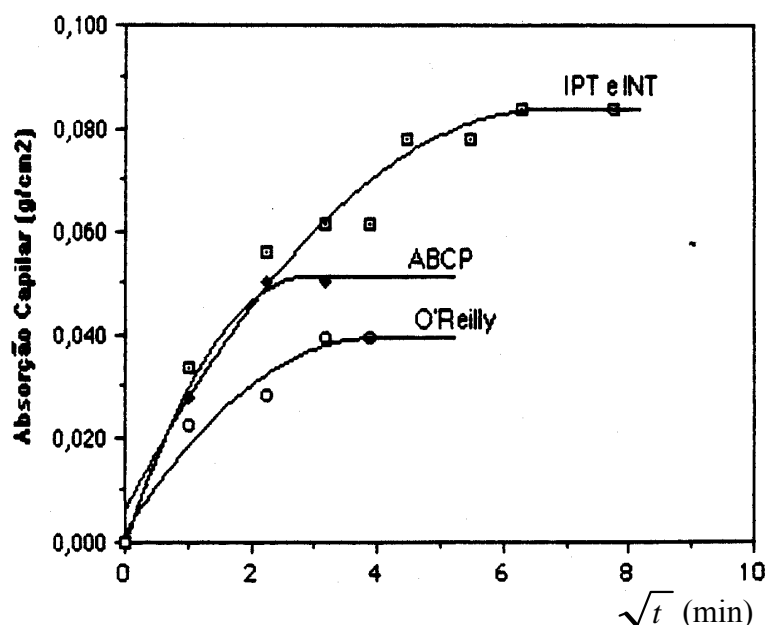


FIGURA 2.5 - Absorções capilares de concretos (NBN 05-201) em função dos métodos de dosagens (OLIVEIRA, 1995).

Assim, se para diferentes métodos de dosagens o concreto necessita de maior consumo de cimento para atingir uma dada resistência, isso pode significar maior quantidade de pasta e maior porosidade capilar e, também, pode acarretar problemas como a retração.

Portanto, admite-se que a resistência à compressão pode traduzir um indicativo de qualidade para um determinado concreto, sendo válida se for considerado apenas um único tipo de material. Para os mesmos intervalos de resistência, concretos com materiais diferentes apresentarão comportamentos distintos em relação à durabilidade (DAL MOLIN e ANDRADE, 2001). Porém, cabe salientar que essa afirmação é válida até mesmo para concretos com materiais idênticos, porém, com diferentes proporções no traço (diferentes métodos de dosagens).

Considerando que concretos que atingem a mesma resistência mecânica apresentam diferenças nas características associadas à durabilidade, OLIVEIRA (1995) constatou, também, que a massa específica é maior no concreto dosado com menor quantidade de cimento (método O'REILLY) - conforme bem ilustra a figura 2.6.

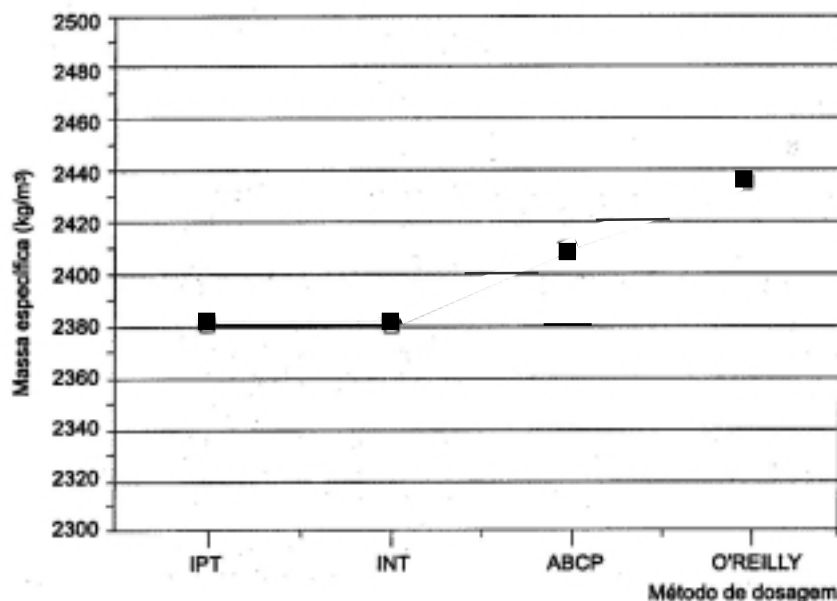


FIGURA 2.6 - Massas específicas dos concretos em função dos métodos de dosagens (OLIVEIRA, 1995).

2.4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência do concreto é definida como a capacidade desse resistir à tensão até a carga de ruptura. No projeto de estrutura de concreto armado, considera-se o concreto como o material mais adequado para resistir à carga de compressão e que, geralmente, por isso, é utilizada para traduzir a resistência mecânica do concreto. É uma medida mínima de projeto, quando não há exigência de ensaios específicos de resistência, como por exemplo, ao desgaste à abrasão, ou de durabilidade (permeabilidade).

A resistência mecânica do concreto tem sido o principal parâmetro de interesse dos projetistas de estruturas de concreto. Sendo assim, é relevante considerar que a resistência aparece sempre como um indicador da durabilidade. Porém, o crescimento e o custo de reposição das estruturas degradadas estão forçando os engenheiros a tomarem consciência dos aspectos do desempenho do concreto em função do tempo de uso (OLIVEIRA, 1995).

Principais fatores de influência

Os principais fatores de influência na resistência à compressão são apresentados a seguir:

- a) relação água /cimento (fator a/c);
- b) tipo do aglomerante;
- c) tipo e teor de adições;
- d) empacotamento granulométrico;
- e) natureza e diâmetro máximo ($D_{máx}$) do agregado;
- f) proporção entre os componentes;
- g) grau de adensamento;
- h) condição de cura.

Mostra-se na tabela 2.2 alguns resultados obtidos por REGATTIERI (1999) ao analisar a resistência à compressão dos concretos variando o tipo de cimento e mantendo constante a relação água/cimento e, nesse caso, os consumos de cimentos variam para garantir uma dada trabalhabilidade - abatimento (*slump*) constante. Observa-se que o tipo de cimento usado influencia o seu consumo e constata-se que, para manter o fator a/c constante, as quantidades de água aumentam nas mesmas proporções das quantidades dos cimentos; o que em síntese aumenta a quantidade de pasta. Assim, a proporção com os demais componentes do concreto também é alterada. Portanto, o tipo de cimento é fundamental, pois ele representa um papel muito importante que influencia não só a resistência, mas também as demais características do concreto.

TABELA 2.2 – Resistência à compressão para diferentes tipos de cimento.

Tipo de cimento	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Resistência à compressão (MPa)
CP I – S 32	0,50	348	41
CP II – E 32		356	35
CP V – ARI		394	47

As características do concreto certamente dependem da natureza e das proporções dos constituintes, mas também, das condições de conservação durante o endurecimento, principalmente nas primeiras idades, pois determinam o desenvolvimento de hidratação. A relação a/c, o tipo do cimento e as condições de hidratação são, portanto, os principais e preponderantes fatores para o desempenho do concreto.

A classe de resistência à compressão do concreto é determinada a partir do ensaio de rompimento de corpos-de-prova, conservados continuamente dentro da água, até o momento em que o teste se efetue, aos 28 dias (NBR 5739 e NB-1 6118/2001).

Entretanto, as condições de cura do concreto endurecido, realmente praticadas, para efetuar a hidratação do cimento, não ultrapassam um dia, consistindo basicamente em molhar a parte superior das lajes. Os demais componentes estruturais como vigas e pilares são esquecidos (LEVY e HELENE, 1996).

Estudos têm demonstrado, através de vários traços de uso bastante comuns que a perda do desempenho do concreto, em função de uma conservação inadequada, é compensada pelo acréscimo de cimento, o que logicamente contribui para o desperdício, onerando tanto os custos materiais como os ambientais. Se por falta de água a hidratação do cimento ficar mais lenta ou parar, a evolução das características mecânicas do concreto cessa e/ou fica inadequada. A função da cura é de manter uma umidade suficiente durante a hidratação, de tal maneira que as propriedades desejadas para o concreto sejam atendidas (BALAYSSAC et al, 1997).

2.4.3 TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade é definida pela ASTM C 125 como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade.

Pelo fato de haver uma tendência à floculação das partículas de cimento em presença de água quando se fabricam os concretos comuns (sem aditivos), a quantidade de água de amassamento para se obter um manuseio aceitável do concreto é sempre superior àquela estritamente necessária para a hidratação do cimento.

Essa quantidade necessária de água, para produzir uma consistência desejada, depende de muitos fatores tais como o tamanho, a granulometria, a textura e a angulosidade dos agregados, o grau de finura do cimento e a presença eventual de aditivos. Portanto, a consistência é controlada, também, pela quantidade de água que entra na mistura.

Medida de trabalhabilidade

O ensaio denominado abatimento do tronco de cone é um ensaio de prática universal que mede a consistência dos concretos plásticos no estado fresco. Sua principal função é fornecer um método simples, prático e conveniente para controlar a uniformidade da produção de diferentes betonadas.

Normalmente, nos procedimentos de dosagens, utiliza-se o abatimento do tronco de cone como um índice de trabalhabilidade. No entanto, o abatimento é um ensaio qualitativo e mede somente a facilidade do lançamento e adensamento do concreto no estado fresco (NEVILLE, 1997). Porém, outras características importantes como consistência e coesão, representadas pela trabalhabilidade, são de difícil avaliação quantitativa, sendo que, por definição:

- a) a coesão descreve a resistência à exsudação e a segregação;
- b) a fluidez descreve a facilidade de mobilidade (a consistência é um índice da fluidez do concreto fresco).

2.5 CARACTERÍSTICAS DE CONCRETOS ASSOCIADAS À DURABILIDADE

A durabilidade do concreto pode ser definida como sendo a capacidade do material preservar suas características físicas e seu desempenho ao longo da vida útil, frente às condições de exposição (BALLIM, 1993). É também capacidade do concreto resistir à ação do meio ambiente, ao ataque agressivo de substâncias químicas, à abrasão ou a qualquer outro processo de deterioração, mantendo ao longo do tempo a sua forma original, a sua qualidade e o seu comportamento em serviço, quando exposto a esse ambiente. A durabilidade do concreto depende, então, tanto das próprias características do concreto quanto do meio ambiente ao qual está submetido (ALMEIDA, 2001).

2.5.1 POROSIDADE

O concreto endurecido é um material poroso. Esses poros se formam devido ao excesso de água que é utilizada para atingir a trabalhabilidade, mas não é totalmente consumida

para formar os produtos da hidratação do cimento. As propriedades e características do concreto tais como a resistência mecânica e a durabilidade são fortemente influenciadas por essa porosidade.

Com o avanço da hidratação, os poros capilares são preenchidos progressivamente pelos produtos de hidratação. Dessa forma, a porosidade capilar diminui, mas também, há redução da conectividade dos poros, baixando assim a permeabilidade. Para NEVILLE (1997), a porosidade capilar da pasta depende tanto da relação a/c da mistura como do grau de hidratação e, conforme já foi mencionado, com relação a/c maior que 0,38, sempre haverá um certo volume de poros capilares mesmo após completar a hidratação.

Existem poros de naturezas diferentes, alguns dos quais contribuem para a os processos químicos (íons agressivos) e físicos (diferentes coeficientes de dilatação térmica, alternância de ciclos de molhagem e secagem) de deterioração do concreto e outros não.

Segundo NEVILLE (1997), os poros efetivos para a permeabilidade são aqueles com diâmetro de, pelo menos, 120 nm e 160 nm. Esses poros devem ser, ainda, contínuos, com entrada estreita e possuir água adsorvida.

POON et al (1997) comentam que a estrutura do poro é considerada como sendo o maior fator de controle da durabilidade e da resistência nos produtos hidratados de cimento. BASHEER et al (2001) creditam aos poros capilares maiores que 50 nm o importante papel de prejudicar a resistência e a impermeabilidade, ou seja, interferir na durabilidade do concreto.

Assim, podem-se distinguir duas grandes categorias de poros: (i) os capilares, que correspondem aos espaços entre grãos de cimento não preenchidos com os produtos de hidratação e (ii) os microporos, que constituem a porosidade interna dos hidratos denominada de poros do gel (FOLLIOT e BUIL, 1982).

Devido à importância da porosidade, muito esforço tem sido dedicado no sentido de correlacioná-la aos fatores que a determinam como: a granulometria dos agregados, o tipo do aglomerante, a relação a/c e a cura, pois a porosidade é a propriedade que está diretamente ligada aos principais mecanismos de transporte de fluidos de degradação do concreto, que interferem tanto na resistência mecânica como na durabilidade.

2.5.2 MECANISMOS DE DESLOCAMENTO DE FLUIDOS NO CONCRETO

São três os principais fluidos importantes para a durabilidade que podem ingressar no concreto: água pura ou com íons agressivos, dióxido de carbono e oxigênio, através de três mecanismos básicos de transportes (BASHEER et al, 2001):

- a) permeabilidade;
- b) difusão;
- c) absorção.

A rigor, a permeabilidade se refere ao escoamento de um fluido através de um meio poroso sob diferencial de pressão. Mas, como já mencionado, a permeabilidade depende das dimensões, da distribuição, da forma e da continuidade dos poros. Portanto,

segundo NEVILLE (1997), a permeabilidade está relacionada com a pasta de cimento hidratada, pois é a única fase contínua do concreto.

A difusão é o processo no qual o fluido se desloca por uma diferença de concentração (difusividade) dos átomos ou íons no sólido, ocupando os espaços vazios.

A absorção de água por capilaridade é um dos mais importantes mecanismos de transporte no concreto. Quando dois materiais dissimilares, tais como dois líquidos imiscíveis ou um fluido e um sólido, são colocados em contato, forças de tensão superficial surgem devido à energia necessária para formar uma interface. A absorção de água por capilaridade é o transporte de líquidos nos poros dos sólidos devido à atuação da tensão superficial dos capilares (resultado de movimentos capilares nos poros do concreto aberto ao meio ambiente). A absorção é relacionada não somente com a estrutura porosa do sólido, mas também, com a condição da hidratação do cimento.

Considerando-se que todos os fenômenos de penetração de agentes agressivos são proporcionais à raiz quadrada do tempo, pode-se calcular o prejuízo que isso significa em termos de durabilidade da estrutura.

2.6 CURA

Segundo NEVILLE (1997), cura é a denominação dada aos procedimentos aos quais se recorre para promover a hidratação do cimento. Consiste em controlar a temperatura e a variação de umidade do concreto. Mais especificamente, o objetivo da cura é manter o concreto saturado. Assim, cura pode ser definida como o processo de manter uma umidade suficiente para permitir que a hidratação do cimento ocorra da maneira mais completa possível.

HELENE e LEVY (1996) comentam que a cura proporciona redução de porosidade do concreto, dificultando a carbonatação e a difusão de íons especialmente na camada que recobre as armaduras, contribuindo muito para aumentar a vida útil das estruturas.

2.6.1 CURA E PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o processo de hidratação consiste na ocorrência de reações simultâneas dos compostos anidros com a água, porém, não à mesma velocidade. Para HELENE e LEVY (1996), em condições normais de temperatura, em torno de 23 °C e umidade relativa superior a 98 %, aos 28 dias, o grau de hidratação pode ser de 65 % a 75 %, alcançando os 100 % somente aos 50 anos de idade.

Portanto, os espaços da pasta fresca de cimento que inicialmente estão preenchidos com água devem ser preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento, até uma condição desejável.

MEHTA e MONTEIRO (1994) também afirmam que, em condições normais de temperatura, alguns dos constituintes do cimento Portland começam a se hidratar, assim que é adicionada água, mas as reações de hidratação são retardadas consideravelmente,

quando os produtos de hidratação cobrem os grãos de cimento anidros, sendo que, para condição de saturação menor que 80 % de pressão de vapor d'água nos capilares, a hidratação quase pára.

O AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMITEE 308 (1971) (apud NEVILLE, 1997) e também DIAFAT (1996) argumentam que, embora a microporosidade (porosidade interna dos produtos de hidratação, C-S-H) cresça durante o período de cura, as características mecânicas e a durabilidade melhoram à medida que a hidratação progride e, isso ocorre devido à diminuição da porosidade capilar. Mas a hidratação só poderá ocorrer em presença de uma quantidade suficiente de água. Dessa maneira, torna-se necessária uma cura do concreto durante um período adequado, a fim de evitar uma dessecação prematura, que pode ser muito rápida, principalmente pela ação do sol e do vento. No caso do concreto das obras, quase sempre a cura é interrompida bem antes que tenha ocorrido a máxima hidratação possível (NEVILLE, 1997).

BALAYSSAC et al (1997) comentam que no processo de secagem ou de dessecação, dentro de certas condições, não somente a água excedente, necessária à trabalhabilidade da mistura vai evaporar, mas também uma parte da água necessária à hidratação do ligante (o cimento). A secagem natural do concreto tem, pois, conseqüências importantes sobre o comportamento mecânico das estruturas e sobre sua durabilidade, donde vem o interesse de um amadurecimento higrométrico controlado nas idades mais recentes.

ALMEIDA (2001) enfatiza que, em função da porosidade, a cura se constitui em um dos principais fatores para a garantia do desenvolvimento das resistências mecânicas e das características associadas com a durabilidade dos concretos, como a porosidade e, sobretudo, a permeabilidade, e deve ser realizada de modo muito criterioso, em especial na zona junto à superfície da peça concretada. HELENE e LEVY (1996) reforçam que secagens prematuras resultam em camadas superficiais porosas com baixa resistência ao ataque de agentes agressivos.

2.6.2 INFLUÊNCIA DOS PROCEDIMENTOS DE CURA NA RESISTÊNCIA

Se devido à evaporação da água dos poros capilares o concreto endurecido sofre dessecação, a água suplementar da cura, vinda do exterior, tem um papel importante não somente nas propriedades mecânicas (resistência, tensão ou fissuração induzida), mas também, na durabilidade (penetrabilidade aos líquidos ou aos gases).

Existem muitas formas de conservação no armazenamento do concreto após o endurecimento, entre as quais, podemos citar a cura: (i) úmida por imersão (em tanque de água saturada com cal); (ii) através de invólucro (impermeável ou com constância de umidade); (iii) lacrada; (iv) em câmara úmida; (v) com produtos químicos e (vi) na própria fôrma de moldagem (com ou sem molhagem), entre outras. Algumas dessas formas de cura se prestam somente a estudos laboratoriais, não sendo passíveis de aplicação prática, pois são inexecutáveis.

Vários procedimentos de cura normais, que abrangem a grande maioria do território brasileiro, são sugeridos por HELENE e LEVY (1996): (i) represamento ou imersão,

(ii) borrifamento de água, (iii) uso de revestimento saturado que retenham umidade - tipo sacos de anagem e (iv) vedação da superfície concretada com a aplicação de manta de papel impermeável, mantas de polietileno ou compostos formadores de membrana de cura.

Estudos recentes não têm sido conclusivos quanto às diferentes formas de cura, mas a de imersão em água demonstra dar menor permeabilidade ao concreto que qualquer outra (NOLAN et al 1997). Isso porque, além de suprir a água que está sendo consumida no processo de hidratação dos grãos anidros, ela também impede a evaporação e, ainda, conserva a temperatura do concreto em níveis mais baixos (MOURET, 1997).

A cura influencia propriedades do concreto tais como: (i) resistência mecânica; (ii) durabilidade; (iii) permeabilidade; (iv) porosidade; (v) densidade e (vi) resistência ao desgaste, entre outras.

Conseqüentemente, uma cura adequada tem um efeito imediato na aquisição das características mecânicas do concreto e, principalmente, nas primeiras idades, como mostra a figura 2.7 (PRICE, 1952).

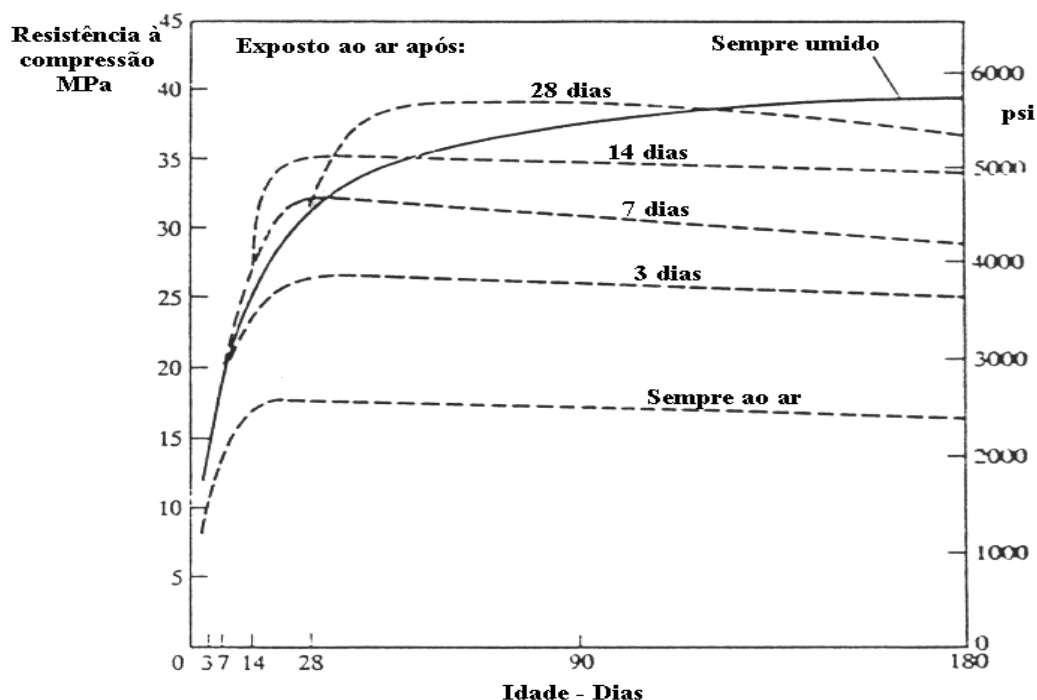


FIGURA 2.7 - Influência do período de cura úmida na resistência do concreto (PRICE, 1952).

2.7 PERDA DE MASSA APARENTE

A secagem natural do concreto é um fenômeno complexo, mas pode-se descrever seu princípio básico como sendo a saída de água líquida de seus poros para outro ambiente, que apresente umidade higroscópica mais baixa - é uma maneira indireta de medir a porosidade existente, pois permite avaliar a capacidade do concreto em reter a água necessária à hidratação do cimento. Segundo BALAYSSAC (1992), DIAFAT (1996) e AÏTCIN (2000), é a água contida em poros mais abertos e capilares localizados próximos à superfície que em primeiro lugar deixa o concreto, pois as forças capilares são mais fracas ali. É através desses poros que todos os mecanismos de transporte de fluidos, tanto líquidos como gases, têm acesso ao concreto, interferindo na durabilidade das estruturas.

O gradiente de concentração de água que existe entre as camadas mais profundas, em relação à camada da superfície, induz a uma transferência de umidade do interior para o exterior do concreto. ACKER et al (1988) afirmam que, por depender da permeabilidade do material, esse fluxo é muito lento e fica cada vez mais difícil à medida que a dessecação progride.

PARROTT (1996) afirma que a perda de massa aparente inicial é um indicador da velocidade de difusão da umidade no concreto de recobrimento e, assim como a permeabilidade, apresenta uma ótima correlação com a profundidade carbonatada nas idades mais avançadas.

Quando o concreto é colocado num meio onde a dessecação é favorável, ele perde rapidamente uma parte da água de capilaridade, porém, POWER (1947) (apud DIAFAT, 1996 e MOURET, 1997) mostrou que numa pasta de cimento, a hidratação pode prosseguir e ser total, se a umidade interna não for inferior a um valor próximo de 80 %.

Para demonstrar a importância do ensaio da perda de massa, QUENARD e CARCASSES (1997) argumentam que somente uma representação da permeabilidade em função da perda de massa parece eficaz para discriminar os concretos, pois a permeabilidade medida isoladamente não é suficiente. É necessário acompanhar o ensaio de permeabilidade com ensaio de porosidade, a fim de calcular a taxa de saturação, e de perda de massa, para se obter resultado mais conclusivo. Na seqüência de suas pesquisas constataram, ainda, que a permeabilidade evoluiu em grande escala em função da duração da secagem e da taxa de saturação. Ela aumenta, aproximadamente, na ordem de grandeza de 10^{-19} a 10^{-17} m² entre 20 e 100 dias de secagem acelerada a 50 °C.

Através da análise realizada por diferentes laboratórios credenciados de ensaios, os pesquisadores QUENARD e CARCASSES (1997) demonstram na figura 2.8 o comportamento da dessecação do concreto endurecido. Observa-se que a amostra do ensaio cuja secagem vai além de três meses, a perda de água continua e sua massa não estabiliza, mesmo após mais de 300 dias de dessecação. No entanto, a tendência da curva é se aproximar dos valores obtidos com secagem a 105 °C.

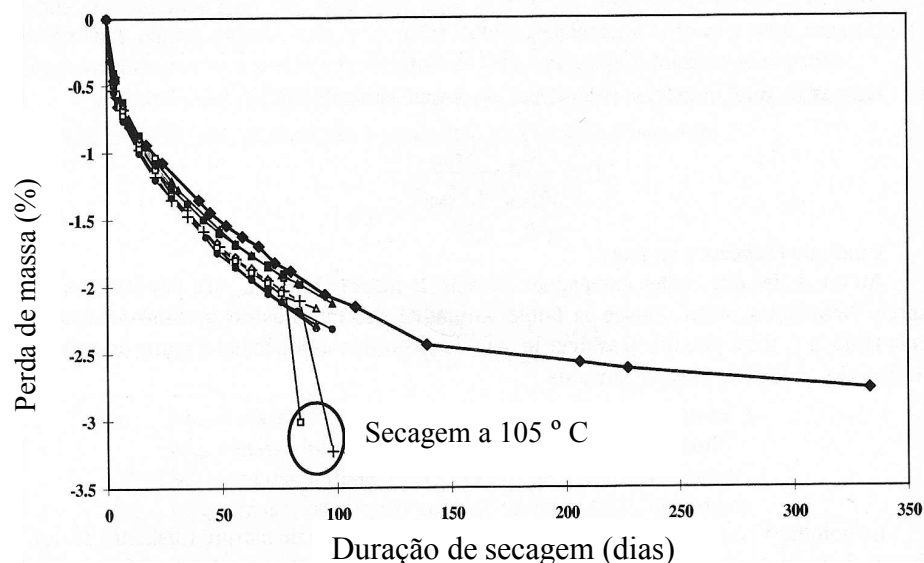


FIGURA 2.8 - Relação entre a duração de secagem acelerada a 50 °C e a perda de massa realizada por diferentes laboratórios (QUENARD e CARCASSES, 1997).

Na figura 2.9, QUENARD e CARCASSES (1997) constataram ainda que a perda em massa foi maior para o concreto A, que tem porosidade maior que o concreto B (14,59 % contra 8,54 %). Acreditam que a cinética da perda de massa inicial é mais rápida para o concreto A devido ao tamanho dos poros maiores.

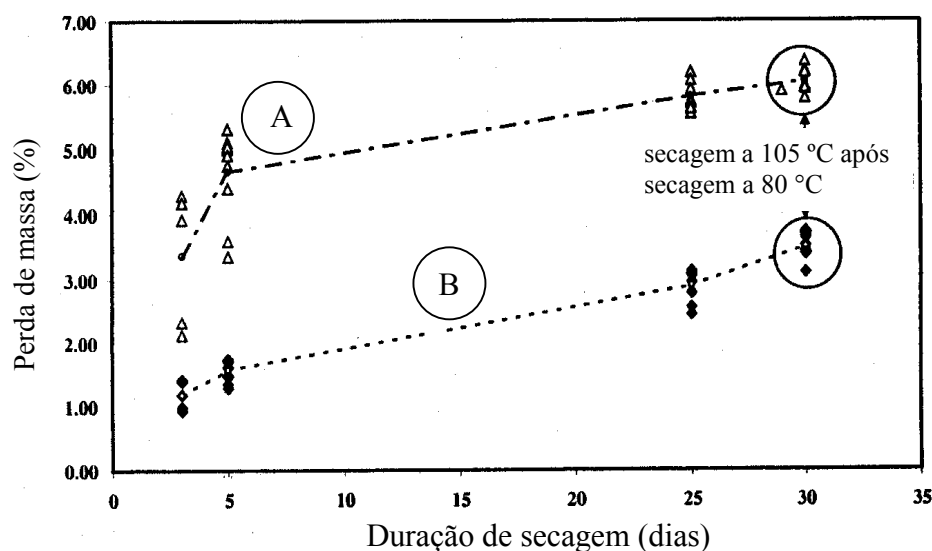


FIGURA 2.9 - Relação entre a duração de secagem a 80 °C e a perda de massa para dois concretos (QUENARD e CARCASSES, 1997).

2.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A durabilidade de um concreto explica-se, em grande parte, pela dificuldade que os agentes agressivos têm para penetrar na rede porosa do concreto, logo, um parâmetro importante é a porosidade e a conectividade dos poros (ou permeabilidade) do concreto de recobrimento. Dentro dessa zona de alguns centímetros, que corresponde à camada exterior que protege as armaduras, os poros capilares maiores e os macroporos com diâmetros médios compreendidos entre 10^{-1} e 10^{-5} mm estão presentes em grande número e representam um papel primordial na penetração de agentes agressivos (DIAFAT, 1996). O ensaio de absorção de água por capilaridade caracteriza globalmente o volume dos poros capilares maiores que se encontram na superfície de um concreto endurecido. Assim, o ensaio de absorção pode, muito bem, caracterizar essa zona.

A figura 2.10 ilustra os tipos de poros existentes no concreto endurecido através do esquema apresentado pelo Durable Concrete Structure, Comitê Euro-Internacional du Béton C.E.B.(1989).

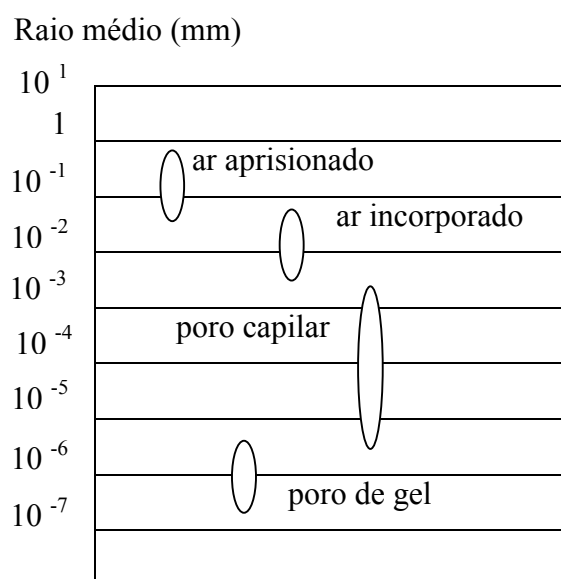


FIGURA 2.10 - Representação esquemática dos poros do concreto (C.E.B, 1989).

DIAFAT (1997) conclui que tanto a espessura como as características da superfície externa do concreto são muito importantes em relação à durabilidade, tendo em vista que a perenidade das armaduras depende da proteção proporcionada pelo concreto de recobrimento.

A NB 1/2001 estabelece critérios de projeto visando à durabilidade, com enfoque na qualidade do concreto de recobrimento, considerando que “a durabilidade das estruturas é altamente dependente das características, da espessura e da qualidade do concreto superficial, de recobrimento e proteção à armadura”. Desse modo, o ensaio de absorção de água por capilaridade é um ensaio que poderá fazer parte das especificações do concreto, ao lado da resistência à compressão.

MARTYS e FERRARIS (1997) observaram que o ganho de massa do concreto corresponde à ascensão capilar e pode ser obtido através da integração da equação de Washburn. Considerando-se que a altura h de ascensão capilar, para um dado poro de raio r , é função da raiz quadrada do tempo e que a quantidade de água absorvida inicialmente vai variar com a quantidade dos poros maiores demonstra-se que:

$$h = [(r\gamma\cos\theta)/2\mu]^{1/2} \cdot t^{1/2},$$

onde μ e γ são, respectivamente, a viscosidade e a tensão superficial da água, e θ é o ângulo do menisco formado pela água no capilar

BALAYSSAC (1992) avalia a cinética de absorção capilar a partir da quantidade de água absorvida, por unidade de superfície, em função da raiz quadrada do tempo, evidenciando dois fenômenos:

- a primeira parte da curva de absorção de água por capilaridade caracteriza o preenchimento dos poros capilares maiores, com raio superior a $10\ \mu\text{m}$. A inclinação da reta entre 0 e 1 hora é denominada de absorção inicial (A_i) em referência ao trabalho de SCHÖNLIN (1989) e pode ser expressa em kg/m^2 ;
- a segunda parte da curva representa o preenchimento dos poros mais finos. A inclinação da reta entre 1 e 24 horas é caracterizada pela absorvidade (A_o) em referência ao trabalho de HALL (1989), dada em $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{t}^{1/2}$.

Assim, a cinética de absorção de água por capilaridade pode ser visualizada na figura 2.11.

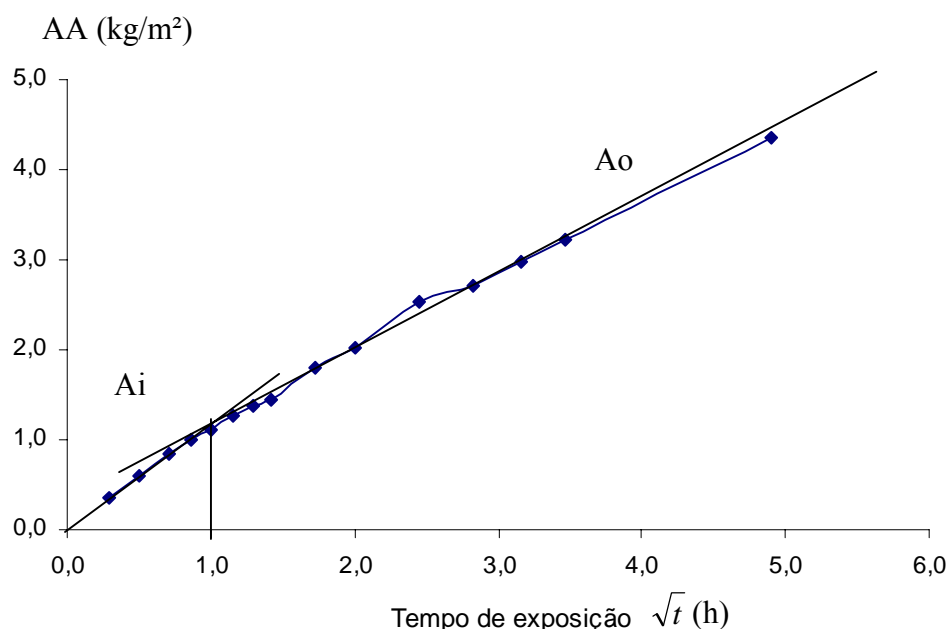


FIGURA 2.11 - Exemplo de curva obtida do ensaio de absorção de água por capilaridade.

MARTYS e FERRARIS (1997) também consideram que a absorção de água por capilaridade do concreto exibe uma complexa dependência do tempo, sendo que,

inicialmente, aproximadamente em uma hora, o total de água absorvida aumenta com a raiz quadrada do tempo, com o comportamento típico da teoria de absorção de água por capilaridade. Para tempos maiores, na ordem de 10 dias, é observado um decréscimo da absorção de água por capilaridade, e na ordem de 100 dias, a absorção capilar recupera o comportamento de aumentar com $t^{1/2}$, porém, comandado pelos poros capilares menores, o coeficiente de absorvibilidade diminui.

CARDE (1997) relata que para alguns concretos, o coeficiente de absorção capilar varia com a raiz quadrada do tempo durante todo o ensaio (duração de 24 horas), mas para o concreto pré-fabricado há variação linear para $t^{1/2}$ somente durante as primeiras 8 horas.

ALMEIDA (2001) afirma que o ensaio de absorção capilar reproduz o comportamento dos concretos em contato com fluidos, sem pressão, podendo retratar a penetração de agentes agressivos em solução. GLANVILLE (1931) e ROSE (1965) (apud BASHEER et al, 2001) argumentam que a absorção de água está relacionada não somente com a estrutura porosa do sólido, mas também com o estado de hidratação do concreto; logo, deve-se considerar esse fator na realização do ensaio.

A cura é uma maneira eficaz para reduzir de modo considerável a porosidade do concreto amenizando, assim, as possibilidades de transporte dos agentes agressivos. Durante a hidratação, os volumes dos produtos hidratados do cimento aumentam, em relação às fases primárias (anidros e água), portanto, o volume dos hidratos (V_h) é superior ao volume do cimento anidro (V_c). Os espaços intergranulares, inicialmente preenchidos com a água da mistura, serão reduzidos e a porosidade diminuirá.

2.9 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

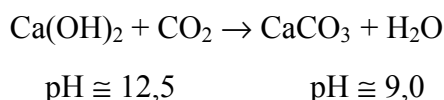
A carbonatação do concreto constitui um fator importante para a durabilidade do concreto armado. Esse tema há muito tempo, tem sido objeto de inúmeras publicações: VERBECK (1958), PARROT (1968), CHAUSSADENT (1997) e MIRAGLIOTTA (1997) (apud ROUGEAU, 1997). Assim, a introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto na NB 1/2001 faz com que os estudos concentrem-se num dos principais agentes agressivos à armadura: o gás carbônico (CO_2).

Segundo VENUAT et al (1967) (apud DIAFAT, 1996), devido à baixa quantidade de CO_2 na atmosfera, que é na ordem de 0,03 % em volume e 0,04 % em peso, a carbonatação do concreto efetua-se lentamente, mesmo se o ar é renovado. Tendo um diâmetro molecular de 5,8 Å (o diâmetro de uma molécula de água é de 6,2 Å) o gás carbônico pode se difundir em quase todos os poros capilares do concreto.

ALMEIDA, 2001 também comenta que o ar atmosférico possui em média 0,03% de gás carbônico em volume, sendo que esse valor pode até quadruplicar em áreas urbanas poluídas. O gás carbônico da atmosfera, que penetra por difusão dentro da matriz do cimento, reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto, principalmente o hidróxido de cálcio, reduzindo o pH dessa solução. Essa reação reduz o pH da solução a um valor tal que a película de óxido passivo que protege a armadura não é mais estável. Se o filme passivo se destrói a corrosão do aço pode então se desenvolver.

O gás carbônico anidro - CO_2 contido no ar - se dissolve facilmente na água para formar o ácido carbônico que pode ser representado como H_2CO_3 . É o ácido carbônico que reage com os compostos de hidratação, principalmente com o CH da pasta de cimento, pois o CO_2 gasoso não é reativo.

Na presença de oxigênio e umidade, a reação ocorre da seguinte forma:



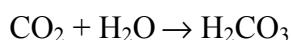
A carbonatação não reduz a resistência do concreto, ao contrário, ela tende a colmatar os poros por formação de CaCO_3 , aumentando assim a dureza superficial. Entretanto, a despassivação por carbonatação é um mecanismo preponderante de deterioração relativamente à armadura.

Para evitar a corrosão é necessário utilizar concretos compactos e pouco permeáveis (DIAFAT, 1996). Para evitar a corrosão das armaduras é importante tanto a espessura quanto a qualidade do concreto de recobrimento, que deve ser o menos permeável possível (ALMEIDA, 2001).

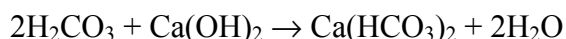
2.9.1 MECANISMOS DA CARBONATAÇÃO

Segundo NEVILLE (1997), o mecanismo que controla a carbonatação na pasta de cimento hidratada é a difusão. A difusão de gases, como o dióxido de carbono, leva a carbonatação à pasta de cimento hidratada. É importante salientar que no caso de deslocamento de um gás ou vapor através do concreto, este resulta de um gradiente de concentração e não de um diferencial de pressão como se pode erroneamente supor.

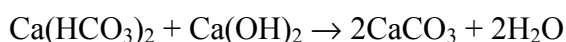
A carbonatação ocorre pela neutralização do hidróxido de cálcio, liberado como subproduto ao longo do processo de hidratação do cimento Portland. A primeira reação caracteriza a formação do ácido carbônico em presença de água:



A segunda reação tem como produto uma fase instável representada pelo bicarbonato de cálcio.



A terceira reação apresenta a forma estável do carbonato de cálcio com liberação de água.



Assim, a carbonatação define uma redução do pH do concreto, pela neutralização de uma base forte de pH entre 12 e 13, o hidróxido de cálcio, num sal de pH próximo de 9, o carbonato de cálcio. Essa reação de salificação típica depende tanto do concreto como do meio ambiente.

A estabilidade química da capa passivadora na armadura do concreto depende de um ambiente alcalino caracterizado por um pH entre 10,5 e 13. A neutralização apresentada pela carbonatação pode reduzir o pH do meio a valores inferiores a 9, instalando um processo degenerativo de corrosão da armadura (NEVILLE, 1997).

2.9.2 VELOCIDADE DE CARBONATAÇÃO

A carbonatação começa na camada superficial do concreto e se propaga por difusão progressivamente, mas a velocidade é decrescente, pois o CO₂ tem que se difundir através do sistema de poros, incluindo a região já carbonatada. A profundidade de carbonatação pode ser representada pela expressão:

$$\Delta\ell = K \sqrt{t},$$

em que $\Delta\ell$ é a profundidade da camada carbonatada do concreto, t é o tempo necessário para esta carbonatação e K é um coeficiente de carbonatação (difusão do gás carbônico no concreto) que representa um grande número de parâmetros tais como a composição do concreto (fator a/c e natureza do aglomerante) e as condições de cura (temperatura e umidade relativa). O coeficiente de carbonatação é dado em mm/ano^{0,5}.

HELENE (2001) comenta que o coeficiente de carbonatação pode variar de 0,1 cm.ano^{-1/2} para concretos de 60 MPa, a 1,0 cm.ano^{-1/2} para concretos de 15 MPa nas mesmas condições de exposição.

VERBECK (1958) (apud DIAFAT, 1996) demonstrou que a velocidade de carbonatação é máxima para um concreto quando a umidade relativa do meio ambiente está entre 40 e 80 %. Segundo DUVAL (1992), também citado por DIAFAT (1996), para valores superiores - maiores que 80 % - há condensação de água dentro dos capilares do concreto, que impede o gás carbônico de penetrar e se difundir, pois o coeficiente de difusão do gás carbônico na água é aproximadamente quatro ordens de grandeza menor do que através do ar. Inversamente, para os valores inferiores - menores que 40 % - a quantidade de água nos poros é insuficiente para dissolver o gás carbônico.

Para NEVILLE (1997), a velocidade máxima de carbonatação ocorre para umidades relativas entre 50 % e 70 %, e depende tanto do teor de umidade do concreto quanto da distância da superfície exposta.

HELENE (2001) discorda que o risco de corrosão de armaduras, por gás carbônico somente deve ser considerado se há ambiente favorável entre 60 % ≤ UR ≤ 99 %. Na questão prática de avaliação da vida útil considera que ciclos de molhagem e secagem

podem ocasionar problemas de corrosão com frequência, mesmo aonde a UR chega a 10 % ou 20 % em alguns meses do ano, mas chove bastante em outros meses.

PARROTT (1996) constatou que a velocidade de corrosão das armaduras do concreto depende da condição de cura e do tipo do cimento e que aumenta rapidamente quando a frente de carbonatação se aproxima das armaduras, e é ainda mais rápida quando essa frente avança para as camadas mais profundas - para além da camada de recobrimento do concreto. Portanto, uma vez instalada, a corrosão avança rapidamente. Entretanto, nas camadas mais profundas a velocidade de corrosão depende menos da eficácia da cura que do tipo de cimento, pois é maior para o concreto que contém, por exemplo, cimento com cinza volante.

2.9.3 CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS COM CIMENTOS COMPOSTOS

NEVILLE (1997) argumenta que o dióxido de carbono da atmosfera decompõe também outros componentes da pasta de cimento hidratada produzindo sílica, alumina e óxido férrico hidratado. No entanto, se no concreto somente a carbonatação do Ca(OH)_2 interessa, quando ele se esgota, por exemplo, através da reação secundária com a sílica das pozolanas, também é possível a carbonatação do C-S-H. Quando isso ocorre, o gel de silicato de cálcio hidratado com poros grandes (maiores que 100 nm) facilita a carbonatação subsequente.

As reações pozolânicas consomem CH em vez de produzi-los, tornando a estrutura da pasta de cimento mais densa, de modo que, a difusibilidade é reduzida e a carbonatação passa a ser mais lenta. No entanto, há outro efeito dessa reação: a sílica pozolânica reduz o teor de CH na pasta de cimento, ou seja, serão necessárias menores quantidades de CO_2 para produzir CaCO_3 e baixar a alcalinidade do concreto.

BIER (1987) (apud NEVILLE, 1997) mostrou que o grau de carbonatação é maior quando a quantidade de CH é menor. A questão é: qual é o efeito predominante? NEVILLE (1997) responde que nessa questão, um fator importante é a qualidade da cura, pois os efeitos de cura inadequada sobre a carbonatação persistem em longo prazo. As causas possíveis que interferem nos resultados durante o ensaio de carbonatação e podem impedir uma boa reprodutividade são de duas categorias:

- a) aquelas que intervêm diretamente sobre a carbonatação do concreto: o estado hídrico e a homogeneidade dos corpos-de-prova, o teor de CO_2 no meio gasoso, a temperatura e a umidade relativa do ambiente;
- b) a data estipulada para a verificação da profundidade de carbonatação - que determina a necessidade ou não de ensaios acelerados.

2.10 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

Quando a massa de uma amostra muda como resultado de uma reação, por exemplo, perda de H_2O , CO_2 ou outro produto de dissociação, oxidação, redução ou evaporação de fase, são todos processo de reações exotérmicas ou endotérmicas. As análises termogravimétrica e termo diferencial podem ser usadas para a identificação de fase ou estudo do processo de reações (PTI – PUBLICAÇÕES TÉCNICAS INTERNACIONAIS LTDA, 1991).

Para realizar a análise termogravimétrica em materiais heterogêneos como o concreto a amostragem é um elemento essencial e tem um papel preponderante, mas, com efeito, é difícil obter uma amostra de aproximadamente 50 gramas que seja representativa. Para suprimir esse problema, as amostras extraídas podem ser isentas de grãos de agregados, mas MASO (1980) (apud BALAYSSAC, 1992) afirma que esse tipo de amostra negligencia as propriedades particulares da zona de transição, pois os fragmentos de pasta fixados no agregado têm poucas chances de serem extraídos. Assim, a amostragem é, ainda, um desafio para os pesquisadores, mas para resolver o problema da presença do agregado não se pode vulgarizar e tratar o concreto como uma simples pasta de cimento (BALAYSSAC, 1992).

A variação de massa da amostra é detectada por uma balança analítica com precisão de um milésimo de grama, em um aparelho que executa o ensaio por comando eletrônico. Os resultados são endereçados a um microcomputador que registra e processa os dados.

O esquema da figura 2.12 ilustra um aparelho que executa o ensaio de análise termogravimétrica.

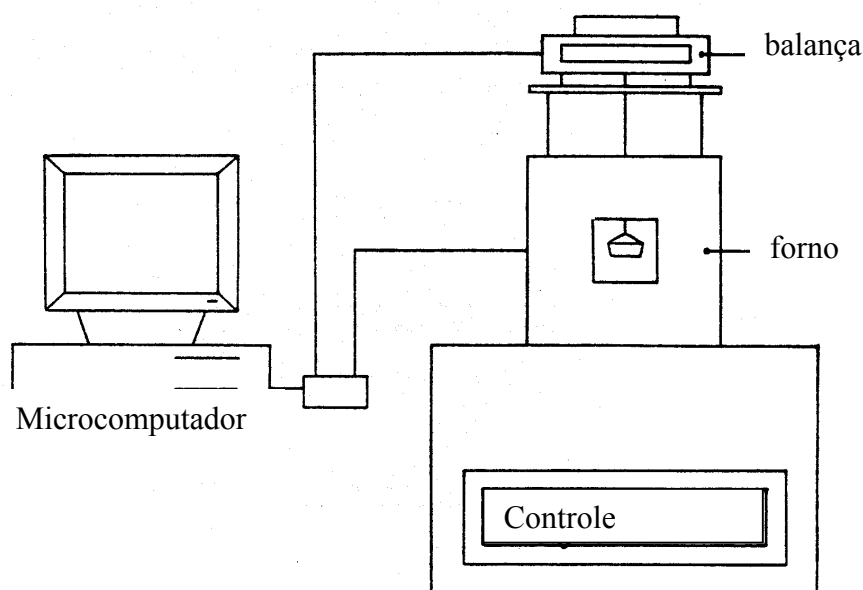


FIGURA 2.12 – Esquema do aparelho de análise termogravimétrica (BALAYSSAC, 1992).

A figura 2.13 representa uma curva típica de análise termogravimétrica realizada sobre uma amostra de concreto. Para TAYLOR (1992), na faixa representada pelo ponto A, as perdas de massas correspondem à evaporação da água livre e uma parte da água ligada. A zona B corresponde à evaporação da água da portlandita e a zona C à liberação de CO_2 da calcita.

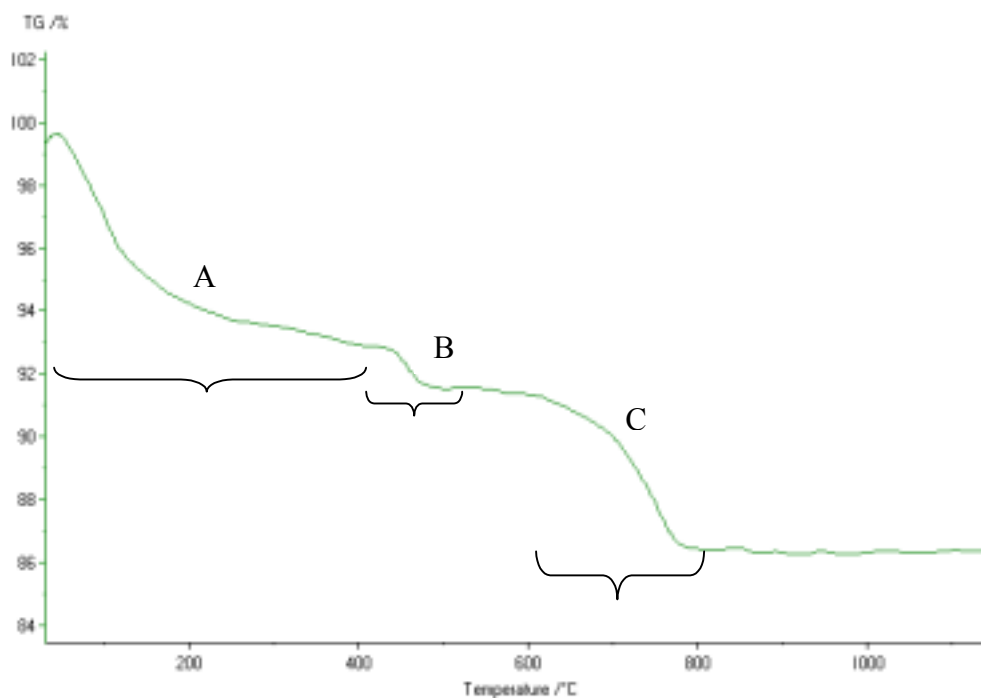


FIGURA 2.13 - Curva termogravimétrica aos 120 dias da superfície (pele) do concreto com 400 kg/m³ do CP I - S 32 e cura de 3 dias em imersão.

2.11 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (MIP)

NEVILLE (1997) comenta que a porosidade, definida como o volume total de todos os poros maiores do que os poros de gel, expressa em porcentagem do volume total da pasta de cimento hidratado, é um fator primário que influencia, praticamente, todas as propriedades do concreto.

Entretanto, não há dúvida que, além do volume, a forma e as dimensões dos poros também têm influência nas propriedades do concreto. Através dos ensaios de absorção capilar e perda de massa aparente não há como determinar a dimensão dos poros, somente é estimado o volume. A forma do poro, que também é importante, não é determinada por nenhum desses dois ensaios. Dessa maneira, é justo que se faça um ensaio específico de porosidade, como a que pode ser medida por intrusão de mercúrio (MIP). Esse ensaio detecta o volume e as dimensões dos poros abertos com diâmetros entre 2 nm e 200 µm.

Com os resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio plotados em uma curva as características dimensionais, como a quantidade e o tamanho dos poros, podem ser constatadas em relação às diferentes pastas de argamassas e concretos. Os resultados ilustrados na figura 2.14 exemplificam os valores obtidos através do MIP, para amostras de argamassas elaboradas com diferentes relações a/c.

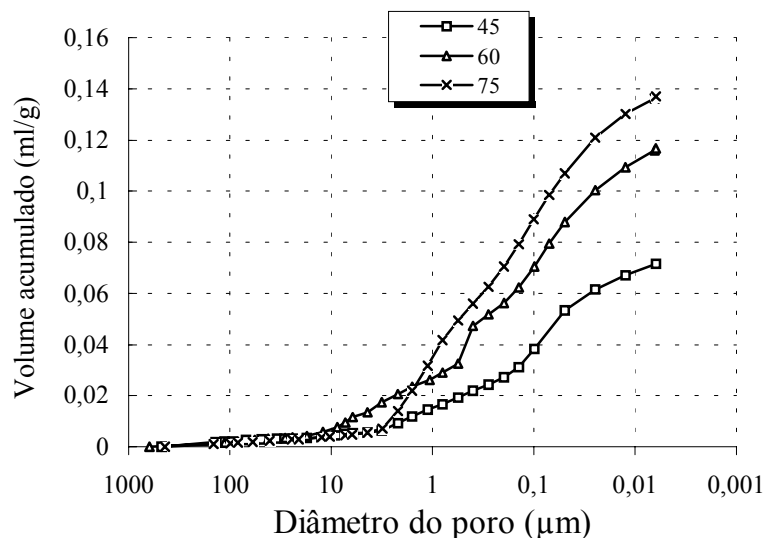


FIGURA 2.14 - Volume acumulado em função do diâmetro do poro da argamassa para três relações a/c (45, 60 e 75 %) (LORENZETTI et al, 1999).

O início da penetração normalmente corresponde ao preenchimento dos interstícios entre os grãos, e a elevação da curva indica a penetração dos poros, em particular, pelo tamanho da entrada e ocorre sob baixa pressão (REED, 1995).

Mas, embora o processo do MIP evidencie determinadas informações a respeito da microestrutura, ele não é considerado realmente um instrumento que representa a microestrutura dos materiais. TAYLOR (1992) considera que a distribuição de poros indicada pelo MIP corresponde mais propriamente à porosidade capilar (entre 2 nm a 200 µm). Através de estudos da porosidade realizados através do MIP e comparados com dados de outros métodos, como a análise de imagem por microscopia eletrônica de varredura (MEV), conclui-se que o MIP determina a distribuição da “largura da entrada” do poro e não do seu tamanho, propriamente dito.

Também DIAMOND e LEEMAN (1995) relatam que a técnica da porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) subestima drasticamente (o equivalente a duas ordens de grandeza) o diâmetro dos poros que são revelados pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV). Eles argumentam que quando dois trabalhos técnicos, com diferentes medidas de um mesmo parâmetro, apresentam resultados tão diferentes, como os verificados entre o MIP e o MEV (figura 2.15), obviamente, essas duas técnicas não medem a mesma coisa.

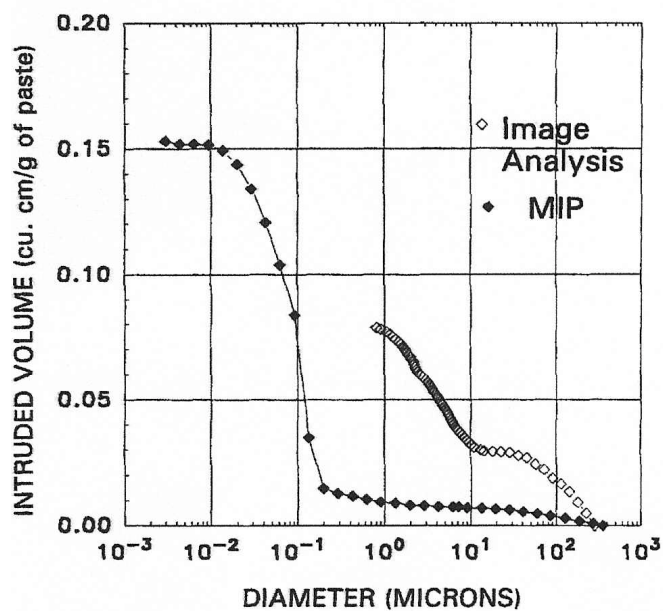


FIGURA 2.15- Comparação dos resultados obtidos através de dois métodos de avaliação do tamanho dos poros de uma argamassa (DIAMOND, 2000).

Mais recentemente, DIAMOND (2000) afirma que as medidas obtidas do MIP em pastas de cimento hidratado são próprias apenas para indicar o tamanho do diâmetro da entrada do poro, estimar o volume total de poros abertos, fornecer medidas como índice de comparação da continuidade (diâmetro de percolação) e da capacidade do sistema de poros, porém, para retratar a distribuição do tamanho do poro ele não é correto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Um programa de dosagens experimentais para a avaliação de concretos de uso corrente em obras de engenharia foi realizado com variação nos seguintes parâmetros: (i) dosagem, (ii) tipo do cimento, (iii) idade do concreto, (iv) tempo e (v) tipo de cura.

Corpos-de-prova de concreto de formato cilíndrico com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura foram submetidos, por períodos de 1, 3, 7 e 28 dias, a duas condições de cura: (i) imersão em água saturada de cal a (23 ± 2) °C e (ii) lacração da base e das laterais com filme plástico adesivo de PVC transparente e com o topo livre, simulando as próprias fôrmas de moldagem. Os concretos lacrados (ou selados) não receberam nenhuma molhagem.

A meta é avaliar o desempenho do concreto em função da cura através de indicadores como: carbonatação, absorção de água por capilaridade, perda de massa aparente, porosidade e perda de massa com aquecimento contínuo correlacionados com a resistência à compressão axial.

Uma balança eletrônica (modelo AS 5000C) foi utilizada em todos os ensaios que exigiam precisão. Sua capacidade de carga máxima é de 5000 g com sensibilidade de 0,1 g.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

O agregado graúdo (granito mesclado de cinza e rosa) foi proveniente de uma jazida localizada em Biguaçu/SC, e o agregado miúdo, de Canelinha/SC.

As classificações das análises granulométricas dos agregados (NBR 7211, 1983) estão representadas na tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Dados do ensaio da análise granulométrica dos agregados.

Classificação Granulométrica	Agregado	
	Miúdo	Graúdo
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	19
Módulo de finura	2,60	6,85
Graduação (zona)	Média (zona 3)	Brita 1

As demais características físicas dos agregados, como a massa específica da areia (NBR 9776, 1991) e da brita (NBR 9937, 1987), e as massas unitárias no estado compactado e seco (NBR 7810, 1983) estão representadas na tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Dados dos ensaios de caracterização física dos agregados.

Características Físicas (kg/dm ³)	Agregado	
	Miúdo	Graúdo
Massa específica (ME)	2591	2625
Massa unitária no estado compactado seco (MUC)	1533	1445

As composições granulométricas dos agregados foram determinadas pelo método de ensaio da NBR 7217 (1987), como ilustra a figura 3.1.

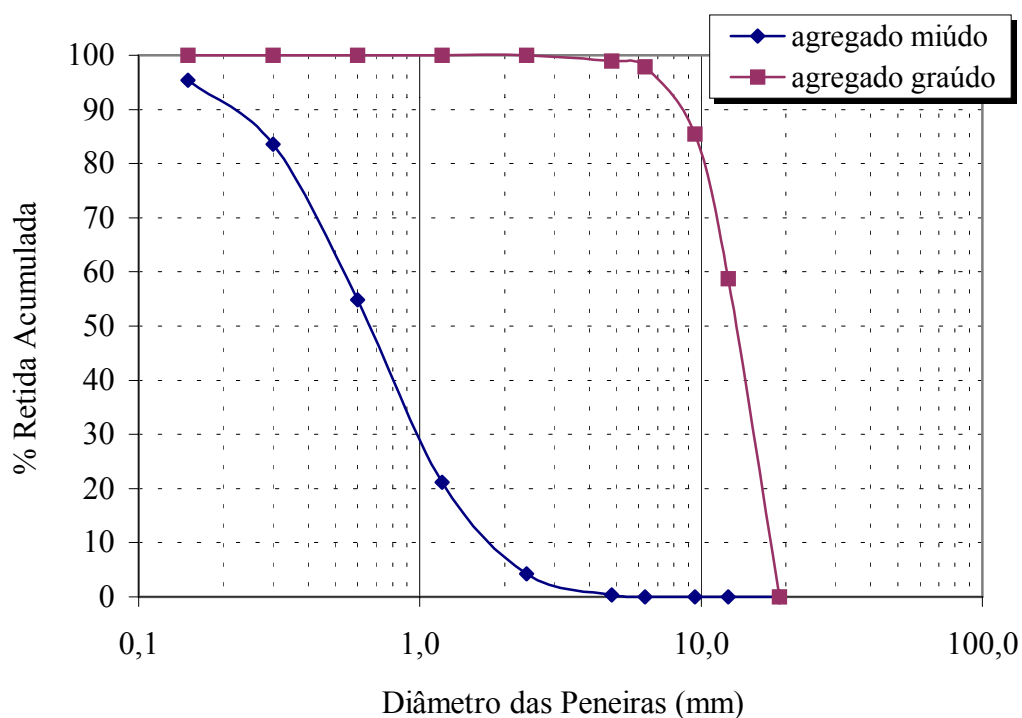


FIGURA 3.1 - Curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE (CIMENTO PORTLAND)

Dois tipos de cimento Portland foram utilizados neste trabalho:

- a) CP I – S 32: Cimento Portland comum com adições;
- b) CP II – Z 32: Cimento Portland composto com pozolana.

As características químicas e físicas dos cimentos, dadas na tabela 3.3, foram fornecidas pelo fabricante.

TABELA 3.3 - Relatório das características químicas e físicas do cimento.

Características químicas	Unidade	CP I - S - 32	CP II - Z - 32	
Al ₂ O ₃	%	4,29	6,37	
SiO ₂	%	18,75	22,40	
Fe ₂ O ₃	%	2,85	3,08	
CaO	%	61,15	54,04	
MgO	%	4,96	4,26	
SO ₃	%	2,70	2,46	
Perda ao Fogo	%	3,41	5,20	
CaO Livre	%	1,86	1,53	
Resíduo insolúvel	%	0,75	12,76	
Equivalente alcalino	%	0,55	0,62	
Características físicas				
Tempo de Início de Pega	min	177,07	188,45	
Tempo de Final de Pega	min	247,03	257,43	
Consistência Normal		27,57	27,60	
Blaine	cm ² /g	3196	3610	
# 200	%	1,2	1,3	
# 325	%	7,3	7,0	
Resistência à compressão (MPa)	1	dias	14,7	11,0
	3		28,4	22,8
	7		34,1	28,5
	28		42,8	38,6

As normas de cimento existentes no mundo são geralmente similares em princípio, variando apenas em pequenos detalhes. Segundo NEVILLE (1997), a especificação do Cimento Portland Comum feita pela 'EUROPEAN COMMITTEE STANDARDISATION (ENV 197-1:1992) segue a moderna tendência de especificar o cimento pelo desempenho, pouco exigindo quanto à sua composição química, mesmo sendo em termos de óxidos. Na verdade, a norma estabelece que ele seja constituído de 95 % a 100 % de clínquer de cimento Portland e 0 % a 5 % de componentes secundários adicionais, em massa referida ao total. No Brasil, o cimento Portland é especificado pela

NBR 5732. Para o cimento Portland I estabelece dois subtipos: o CP I, sem nenhuma adição além do gesso, e o CP I – S, com adições de até 5 % de filer calcário.

Para os cimentos Portland com cinza volante, a norma européia (ENV 197-1:1992) considera-os em duas subclasses: Classe II/A – V com 6 % a 20 % de cinza volante, e Classe II/B – V com 21 % a 35 % de cinza volante (NEVILLE, 1997). Segundo a ABNT, o cimento Portland de cinza volante é classificado em dois tipos em relação ao teor de material pozzolânico: CP IV, de 15 % a 50 %, especificação da NBR 5736 EB - 758 (1991), e CP II – Z com 6 % a 14 %, especificação da NBR 11578 EB - 2138 (1991). Além disso, ambos podem receber adições concomitantes de filer calcário, de até 5 %. Como se pode perceber, dentro de faixas tão amplas de adições, o comportamento desses cimentos também pode ser bastante variável.

3.3 MÉTODO DE DOSAGEM

A determinação da relação ótima entre a mistura de agregado miúdo e agregado graúdo foi realizada segundo a NBR 7810 (1983). O método de dosagem adotado foi o do Concreto de alto Desempenho - O'REILLY, cujo diferencial é o parâmetro de escolha da melhor proporção entre os agregados. Enquanto que para outros métodos a composição considerada "*ideal*" baseia-se no maior valor obtido para massa unitária no estado compactado seco (HELENE e TERZIAN, 1992), o método O'REILLY baseia-se no volume de vazios e considera a proporção ideal aquela que resulta no menor volume de vazio, ou seja, o melhor empacotamento entre os grãos. Misturas baseadas na massa unitária das proporções podem determinar boas escolhas somente para agregados de massas específicas semelhantes.

O método O'REILLY, descrito em detalhes na referência O'REILLY (1998) e relatado na revisão da literatura e fundamentos teóricos, é baseado na obtenção da proporção ótima que, para as mesmas exigências, apresenta um menor consumo de cimento e maior compactidade. Oferece, assim, maior resistência à difusão dos elementos agressivos na estrutura do concreto (OLIVEIRA, 1995) e tem como vantagens, além de alcançar o melhor desempenho dos agregados disponíveis, permitir ajustes no traço para alcançar a resistência almejada e obter o abatimento em função da relação água/cimento (a/c).

Assim, foram elaboradas misturas com agregado miúdo e agregado graúdo para todas as relações mútuas (a partir de 35 % de areia e 65 % de brita); aumentando-se, gradualmente, 5 % de areia e diminuindo, nessa porcentagem, a brita – até se obter a proporção inversa.

Os resultados obtidos dessas misturas indicam duas relações ótimas devido à proximidade de seus valores: (i) 35 % de areia e 65 % de brita, com porcentagem mínima de vazios de 28,8 % e (ii) 40 % de areia e 60 % de brita, com porcentagem mínima de vazios de 28,6 %, conforme tabela 3.4.

TABELA 3.4 - Exemplo de determinação da composição ótima entre areia média e brita 1 através do volume de vazios.

Proporções (%)		M areia	M brita	M mistura	MUC	ME mistura	V vazios
Areia	Brita	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(%)
65	35	14,95	8,05	17,75	1775	2603	31,8
60	40	13,80	9,20	18,55	1855	2605	28,8
55	45	12,65	10,35	18,50	1850	2606	29,0
50	50	11,50	11,50	18,55	1855	2608	28,9
45	55	10,35	12,65	18,45	1845	2610	29,3
40	60	9,20	13,80	18,65	1865	2611	28,6
35	65	8,05	14,95	18,60	1860	2613	28,8
30	70	6,90	16,10	18,20	1820	2615	30,3

Os resultados da tabela 3.4, plotados em um gráfico, demonstram através da tendência da curva as possibilidades de melhores proporções para a mistura ótima (figura 3.2).

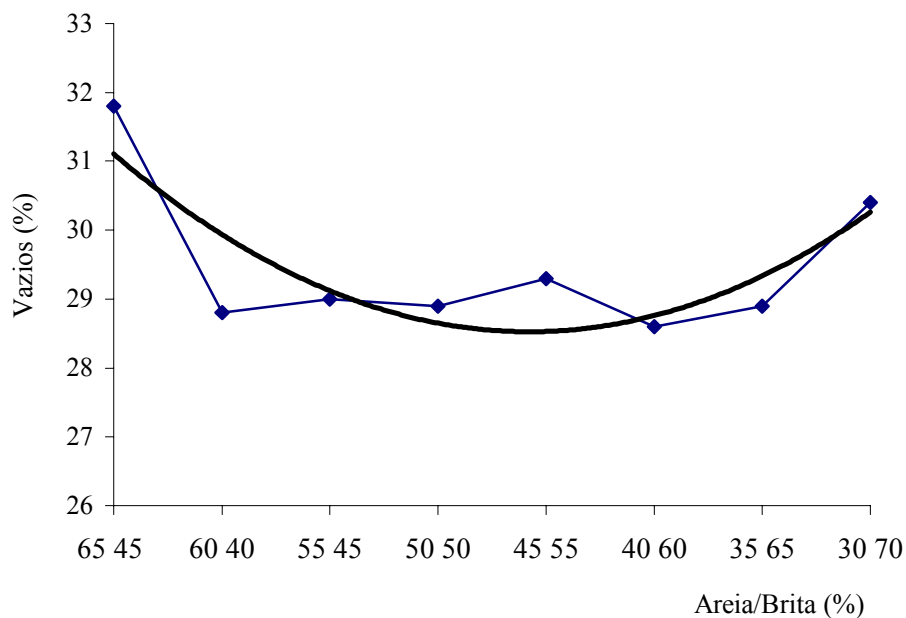


FIGURA 3.2 - Porcentagem de vazios em relação à proporção entre os agregados graúdo e miúdo (Método O'Reilly).

Sabe-se que com o aumento dos agregados de menor dimensão, cresce também a superfície específica na mistura, o que torna necessário maior quantidade de pasta de cimento para envolver a superfície total das partículas (O'REILLY, 1998). Dessa forma, para verificar qual a mistura mais compacta, elaboraram-se novas misturas, aproximando, gradualmente, as porcentagens das duas relações ótimas, agora, com intervalos menores de apenas 1% entre uma proporção e outra.

A relação ótima adotada, então, para efeito de dosagem, foi de 36 % de areia e 64 % de brita, que resultou na menor porcentagem de vazio para a mistura, como mostra a tabela 3.5.

TABELA 3.5 - Exemplo de nova determinação da composição ótima entre a areia média e a brita 1 através do volume de vazios.

Proporções (%)		M brita	M areia	M mescla	MUC mescla	ME mescla	Vvazios
Areia	Brita	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(%)
39	61	12,20	7,8	18,35	1835	2612	29,7
38	62	12,73	7,8	18,50	1850	2612	29,2
37	63	12,75	7,8	18,60	1860	2612	28,8
36	64	12,79	7,8	18,70	1870	2613	28,4

3.3.1 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

As misturas de concreto foram executadas com seis combinações entre dois tipos (CP I – S 32 e CP II – Z 32) e três dosagens em cimento (300, 350 e 400 kg/m³). Para um volume de vazios de 28,4 %, a proporção adotada entre os agregados foi de 36 % de areia e 64 % de brita (resultado da relação ótima da mistura entre o agregado miúdo e o agregado graúdo). Para possibilitar a reprodução prática dos resultados obtidos em laboratório, a base de comparação entre os concretos foi a dosagem em cimento (kg/m³). A trabalhabilidade foi mantida constante em (70±10) mm e verificada através do ensaio de abatimento (*slump-test*). Os valores que definem a classe de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos (f_{c28}) - conforme prescrição da NBR 5739 - foram determinados de 20 MPa a 40 MPa.

A tabela 3.6 indica as composições teóricas e as características dos concretos ensaiados.

TABELA 3.6 - Composições e características dos concretos.

Materiais (kg/m ³)	Composições					
	CP I – S 32			CP II – Z 32		
	300	350	400	300	350	400
Agregado graúdo	1153	1113	1084	1133	1095	1064
Agregado miúdo	648	626	610	637	616	599
Cimento	300	350	400	300	350	400
Água	195	203	208	207	213,5	216
Características						
Relação a/c	0,65	0,58	0,51	0,69	0,61	0,54
Volume de pasta (dm ³)	311	334	351	323	345	363

3.3.2 FABRICAÇÃO DO CONCRETO

Inicialmente efetuou-se a secagem dos agregados. A areia e a brita eram submetidas à secagem em estufa de 105 a 110 °C (marca Fabbe-Primar, com capacidade de 300 °C) durante 24 horas. Em seguida, os agregados eram resfriados, acondicionados em recipientes herméticos e armazenados dentro do laboratório. Nas datas de fabricação, eram submetidos à pesagem, conforme exigência do traço, em balança eletrônica com capacidade de 30 kg e precisão de 5 g (marca UDE/Urano). A brita passou por um processo de peneiramento na peneira da série normal (USS 16; Tyler 14) de 1,19 mm de abertura de malha, a fim de retirar o excesso de finos, que causavam variações na relação a/c. O cimento era, também, acondicionado e estocado em tonéis vedados.

A mistura dos materiais foi confeccionada em betoneira intermitente, com eixo inclinado, pás solidárias à cuba e capacidade de 120 L. A betoneira era utilizada em ambiente protegido do sol e do vento. O número de voltas, o tempo de mistura e a ordem de colocação dos componentes na betoneira em movimento foram mantidos constantes. A seqüência de colocação dos componentes foi: (i) agregado graúdo, (ii) parte da água (aproximadamente 80 %), (iii) agregado miúdo, (iv) aglomerante e (v) restante da água.

Após o período de mistura, era determinada a consistência (*slump-test*) pelo abatimento do tronco de cone (NBR NM 67, 1998). O ajuste da mistura, para manter a consistência desejada, era realizado com a mudança do traço para um valor imediatamente superior ou inferior, de no máximo 1,5 % da relação a/c. Assim, as proporções calculadas entre os componentes foram mantidas.

Os corpos-de-prova de concreto foram confeccionados com adensamento manual em moldes metálicos cilíndricos, de dimensões (10x20) cm, onde permaneceram por 24 h, segundo as recomendações da NBR 5738, 1984.

3.4 SELEÇÃO E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

A escolha dos ensaios reside na aptidão que os mesmos têm em fornecer parâmetros quantitativos e qualitativos sobre o estado da estrutura porosa de um concreto, ou seja, com a durabilidade.

3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

3.4.1.1 ESCOLHA DO ENSAIO

Admite-se que o ensaio de resistência à compressão fornece um indicativo da durabilidade de um determinado concreto. À medida que se aumenta a resistência à compressão, leva-se refinamento à microestrutura interna do material, minimizando a porosidade do mesmo (MEHTA e MONTEIRO, 1994 apud DAL MOLIN, 2001). Como a resistência mecânica à compressão do concreto é um parâmetro de fácil avaliação, existem algumas tentativas de relacionar tal propriedade com a durabilidade (DAL MOLIN, 2001). Todavia, observa-se que a relação da resistência mecânica e da durabilidade do concreto pode apresentar comportamentos distintos para os mesmos intervalos de resistência. Esse tópico será amplamente discutido no próximo capítulo, onde serão analisados os resultados.

3.4.1.2 MÉTODO UTILIZADO

Os ensaios de ruptura por compressão axial foram realizados em Máquina Universal de Ensaio Eletrônica (marca SHIMADZU) com capacidade de carregamento entre 40 KN e 2000 KN e velocidade de aplicação da carga controlada por comando eletrônico. Os corpos-de-prova cilíndricos (10x20 cm) foram recobertos de enxofre (NBR 5738, 1994) nas faces de aplicação da carga (topo inferior e superior).

As medidas da resistência à compressão, usadas para avaliar a evolução das características mecânicas do concreto em função da cura, foram realizadas através do rompimento de séries constituídas por três corpos-de-prova para cada idade do concreto (NBR 5739, 1994). Para avaliar as resistências à compressão do concreto aos 28 e 120 dias, as séries foram retiradas de seus períodos de 1, 3, 7 e 28 dias de cura e deixadas ao ar até o rompimento (datas que completavam 28 e 120 dias de idade) conforme indicado na tabela 3.7. Os corpos-de-prova de resistência aos 28 e 120 dias foram denominados de R_{c28} e R_{c120} , respectivamente. Os valores obtidos com as resistências à compressão foram plotados em gráficos em função da duração das curas, das dosagens em cimento e, também, correlacionados com os demais ensaios. Os perfis das curvas e as tendências das correlações facilitam a interpretação dos resultados.

TABELA 3.7 - Resistências à compressão nas idades de 28 e 120 dias.

Concreto dosado com 300, 350 e 400 kg/m ² (CP I – S 32 e CP II – Z 32)		
Cura		
Duração (dias)	Método	
	Imersão	Plástico adesivo
1	X	X
3	X	X
7	X	X
28	X	X

X corresponde às séries ensaiadas no total de 240 corpos-de-prova.

Nota: para 120 dias os concretos foram dosados somente com 300 e 400 kg/m².

Para avaliar a resistência ao final de cura (R_{fc}) as séries foram retiradas após cada período de cura de imersão e de lacração e rompidas imediatamente. As demais séries foram deixados ao ar, após os períodos de curas, e rompidas nas datas que completavam 3, 7, 28, 90 e 120 dias - a fim de determinar a evolução da resistência com a idade (R_{ei}), conforme mostra a tabela 3.8.

TABELA 3.8 - Resistência à compressão ao final de cura (R_{fc}) e evolução da resistência com a idade (R_{ei}).

Concreto dosado com 300 e 400 kg/m ² (CP I – S 32 e CP II – Z 32)								
Cura		Idade do concreto (dias)						
		1	3	7	28	90	120	
Duração (dias)	1	Imersão	R_{fc}	R_{ei}	R_{ei}	R_{ei}	R_{ei}	R_{ei}
	3							
	7		R_{fc}	R_{ei}	R_{ei}	R_{ei}		
	28		R_{fc}	R_{ei}	R_{ei}	R_{ei}		
Duração (dias)	1	Plástico adesivo						
	3							
	7		R_{fc}	R_{ei}	R_{ei}	R_{ei}	R_{ei}	
	28		R_{fc}	R_{ei}	R_{ei}	R_{ei}		

Total de 240 corpos-de-prova.

Nota: os corpos-de-prova não foram avaliados aos três dias em ambas as curas, nem com um dia de lacração com plástico adesivo.

3.4.2. PERDA DE MASSA APARENTE

3.4.2.1 ESCOLHA DO ENSAIO

A evaporação da água dos poros do concreto não protegido da dessecação impede a hidratação do cimento anidro, diminuindo o desempenho apresentado pelo concreto em todas as etapas de sua vida útil. A medida de perda de massa aparente permite avaliar a capacidade do concreto em reter a água necessária à hidratação do cimento. É uma maneira indireta de avaliar a estrutura porosa do concreto, particularmente, da camada de recobrimento que protege as armaduras e é mais sensível a dessecação.

3.4.2.2 MÉTODO UTILIZADO

As mesmas séries (com três corpos-de-prova) retiradas de seus períodos de cura e deixadas ao ar à temperatura de (23 ± 2) °C e umidade relativa (UR) de (70 ± 5) % - até as datas de rompimento para determinação da resistência à compressão do concreto - foram utilizadas para verificar a perda de massa aparente. Os corpos-de-prova foram monitorados enquanto aguardavam o dia do rompimento através de pesagens periódicas. As séries mantidas com plástico adesivo foram avaliadas durante todo o período, mesmo quando os corpos-de-prova ainda estavam selados, pois, neste caso, ocorria perda de massa aparente através dos topos que estavam livres.

A perda de massa (ΔM) foi medida em idades pré-determinadas e calculada pela seguinte expressão:

$$\frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}) \cdot 100}{M_{\text{inicial}}}$$

onde M_{inicial} é a massa aparente inicial saturada do corpo-de-prova após a retirada da fôrma, e M_{final} é a massa aparente, em processo de dessecação, para cada idade do concreto. Os pontos obtidos, que representam os decréscimos de massa (ou a dessecação) em porcentagem, foram plotados em gráficos em função da duração de secagem.

3.4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

3.4.3.1 ESCOLHA DO ENSAIO

Neste trabalho, serão analisados somente os macroporos e os poros capilares, devido ao papel preponderante que representam para a durabilidade, pois são eles que governam a penetração dos agentes agressivos. O ensaio de absorção de água por capilaridade caracteriza globalmente o volume dos poros capilares maiores, que se encontram na superfície de um concreto endurecido, por esse motivo foi utilizado nesta pesquisa. Os poros do gel, que constituem os microporos do concreto, não são medidos neste ensaio.

Em essência, esse ensaio mede a velocidade de absorção de água por sucção capilar do concreto não saturado e colocado em contato com a água, determinando a velocidade de absorção por ascensão capilar de uma amostra, que se apóia sobre suportes, de modo

que, somente uma parte com 5 ou 10 mm fique imersa. Registra-se o aumento de massa do corpo-de-prova, ou amostra, por unidade de área em função do tempo.

3.4.3.2 MÉTODO UTILIZADO

Esse ensaio foi realizado com uma série composta por dois corpos-de-prova produzidos com as mesmas composições dos concretos avaliados nos ensaios de resistência à compressão (para possibilitar parâmetros comparativos) com os seguintes critérios:

- misturas de concreto foram divididas em seis combinações para os cimentos, sendo dois tipos (CP I – S 32 e CP II – Z 32) e três dosagens (300, 350 e 400 kg/m³);
- corpos-de-prova foram avaliados em função da condição e do tempo de cura, na idade de 120 dias;
- no concreto, a presença inicial de água nos poros capilares, com diâmetros médios maiores, representa um problema na determinação da absorção de água e, portanto, é suposto que no caso dos concretos de 120 dias, os poros maiores da camada mais superficial (entre 5 a 10 mm) estarão sem água (BALAYSSAC, 1992);
- mesmo assim, os corpos-de-prova foram secos em estufa a 40 °C por 24 horas e, após resfriamento, revestidos com tinta betuminosa nas faces laterais. A finalidade era, através de impermeabilização, restringir a área de absorção, evitar a evaporação pelas faces laterais e forçar o caminho axial para a ascensão capilar. A massa inicial foi medida após o procedimento de impermeabilização;
- neste ensaio são feitas várias medidas em um período de 24 horas.

Na tabela 3.9 estão indicados os ensaios de absorção capilar executados com o concreto aos 120 dias de idade.

TABELA 3.9 - Ensaios de absorção capilar na idade de 120 dias.

Concreto dosado com 300 e 400 kg/m² (CP I – S 32 e CP II – Z 32)		
Cura		
Duração (dias)	Método	
	Imersão	Plástico adesivo
1	X	X
3	X	X
7	X	X
28	X	X
Total de 64 corpos-de-prova.		

Os corpos-de-prova foram imersos dentro de um recipiente com uma altura máxima de 10 mm de água. Para cada tempo de medida, os corpos-de-prova eram retirados do

recipiente, enxugados com um pano de algodão, pesados e recolocados, em seguida, dentro do recipiente. A pesagem de cada amostra levou menos que 15 segundos para ser efetuada. As massas dos corpos-de-prova foram medidas nos seguintes intervalos de tempo: 0,08; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,33; 1,67; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12; 24 horas (figura 3.3).

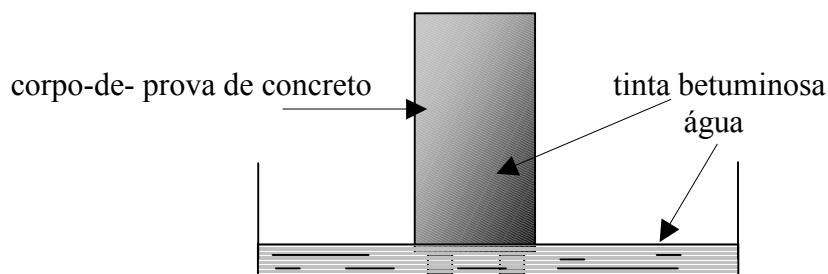


FIGURA 3.3 – Esquema experimental do ensaio de absorção de água por capilaridade.

O coeficiente de absorção capilar (AA) é definido pela seguinte relação (expressa em kg/m^2):

$$\frac{M_{\text{final}} - M_{\text{inicial}}}{A}$$

Nessa relação, M_{inicial} é a massa aparente inicial seca (kg), M_{final} é a massa aparente úmida num determinado instante t , e A corresponde à seção transversal do corpo-de-prova em contato com a água (m^2). Nos pontos do gráfico que representam os acréscimos de massa (ou a ascensão da linha da água) adapta-se uma curva em função da raiz quadrada do tempo.

3.4.4 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

3.4.4.1 ESCOLHA DO ENSAIO

Muitos métodos podem ser utilizados para estudar e determinar a profundidade de carbonatação de um concreto. A escolha do método depende dos objetivos visados e da situação técnico-econômica. Atualmente, o método que se impõe é o da utilização de um indicador colorante: solução de fenolftaleína.

O método à base de fenolftaleína tem a vantagem de poder revelar uma linha de equilíbrio do pH (em torno de 9), traduzindo, assim, uma baixa significativa do pH, fator diretamente relacionado com a estabilidade físico-química das armaduras e com os riscos de corrosão (ROUGEAU, 1997). Entretanto, a solução de fenolftaleína identifica somente pH 9 e sabe-se que para pH inferior a 10 já ocorre despassivação

LO e LEE (2001) escrevem que, teoricamente, existe uma zona parcialmente hidratada onde o valor do pH não é facilmente detectado quando se utiliza indicador de fenolftaleína. Eles encontraram uma grande discrepância nos resultados, sendo que o

valor determinado da profundidade carbonatada por espectrometria de infravermelho resultou 23,9 % superior à medida através da solução de fenolftaleína. Acreditam que esse método pode detectar a zona parcialmente carbonatada do concreto, sendo que o indicador de uma solução de fenolftaleína subestima o nível da carbonatação. Também CHAUSSADENT (1997) comenta que as profundidades carbonatadas determinadas pela fenolftaleína não correspondem, sistematicamente, a um único grau de carbonatação.

3.4.4.2 MÉTODO UTILIZADO

Esse ensaio foi realizado com os mesmos corpos-de-prova utilizados para o ensaio de absorção capilar. As duas amostras, representativas das durações e condições de cura, foram submetidas a rompimento por tração diametral.

A pulverização de uma solução de fenolftaleína a 1 %, em solução de álcool em água a 50 %, sobre um concreto carbonatado, permite distinguir duas zonas: (i) na periferia dos corpos-de-prova a cor é a mesma que havia antes da pulverização - é a zona carbonatada, e (ii) no centro dos corpos-de-prova, a cor torna-se rosa - é a zona sã (figura 3.4).

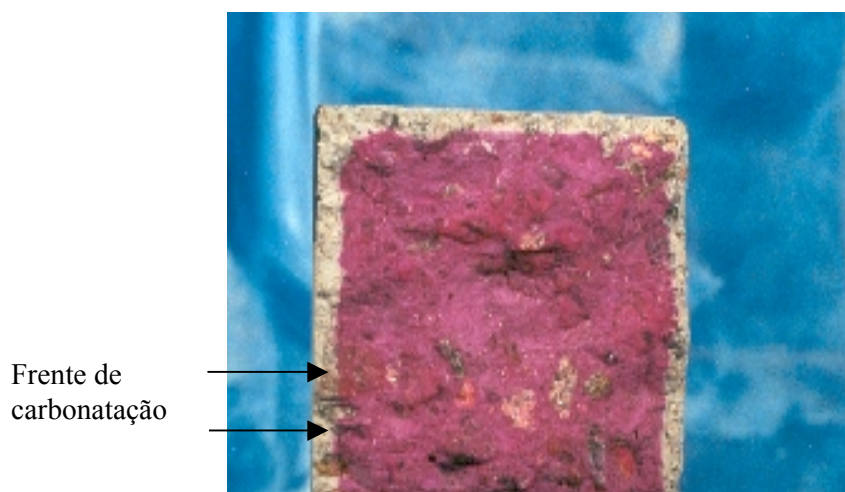


FIGURA 3.4 - Característica do concreto carbonatado.

As medidas da profundidade de carbonatação do concreto foram realizadas com um paquímetro em duas frentes de carbonatação: laterais e topo. A fim de garantir a nitidez da coloração, as leituras foram efetuadas após 15 minutos da pulverização. As “frentes” de carbonatação que estavam impedidas de avançar quando havia agregado, eram facilmente identificadas e ignoradas (não eram tomadas como medida). Os resultados foram computados através de média aritmética.

3.4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise termogravimétrica consiste em registrar continuamente as variações de massa de uma amostra submetida a um aquecimento contínuo em um forno com meio gasoso, que pode ser neutro para os elementos da amostra. No sentido mais amplo, a análise termogravimétrica refere-se à medida de algumas mudanças de propriedades do material que ocorrem como resultado da mudança de temperatura, colocando em evidência, de uma maneira quantitativa, as variações de massa. Para os cimentos e concretos ela revela as reações de oxidação, de redução ou de descarbonatação e desidratação.

3.4.5.1 ESCOLHA DO ENSAIO

A análise termogravimétrica permite definir com precisão as quantidades dos materiais constituintes da estrutura microscópica do concreto, possibilitando, principalmente, determinar as quantidades de água ligada, a fim de avaliar o grau de hidratação dos constituintes.

3.4.5.2 MÉTODO UTILIZADO

O método de medida consiste em aquecer a amostra a 105 °C a fim de eliminar a água livre e calcinar até aproximadamente 1000 °C para extrair a água ligada e o carbonato.

As amostras para análise termogravimétrica foram obtidas dos corpos-de-prova preparados para o ensaio de absorção. A parte central das laterais dos corpos-de-prova foi recoberta com uma fita adesiva antes de receber a tinta betuminosa. Assim, a superfície ficou preservada para o ensaio da análise térmica.

Após o rompimento por compressão diametral, eram extraídas amostras das laterais centrais e do seio dos corpos-de-prova. Em seguida, as amostras eram pesadas e secadas previamente em estufa a (105 ± 5) °C por 24 horas para eliminar a água livre, evitando assim a continuidade do processo de hidratação. As amostras eram, então, submetidas à moagem manual com mão de gral e almofariz (cuidados básicos eram tomados para não contaminar as amostras), até que apresentassem forma de pó. Em seguida, passavam por processo de peneiramento, numa peneira de malha quadrada com abertura de 250 µm (USS/ASTM, Tyler/MESH 250), na tentativa de padronizar o tamanho dos grãos, pois interferem nos resultados da análise-térmica.

Após a pulverização os grãos foram armazenados em dessecador a vácuo com sílica gel, até o momento do ensaio da análise térmica, para impedir as reações químicas que alteram os resultados. O ensaio de análise térmica das amostras (com aproximadamente 30 mg de pasta do concreto endurecido) foi executado em atmosfera de nitrogênio.

O aparelho de análise térmica é constituído de um forno que pode atingir temperaturas de até 1200 °C. A atmosfera foi neutra para os elementos das amostras analisadas. A velocidade de mudança de temperatura ou taxa de aquecimento foi fixada em 10 °C/minuto, bem como os patamares de 105 °C e 1000 °C. Os dados são plotados e fornecidos pelo próprio aparelho através de gráficos. No entanto, as determinações obtidas desses gráficos devem ser ainda interpretadas, pois o conhecimento do intervalo

das temperaturas das reações que ocorrem na microestrutura durante o aquecimento é preponderante para a correta avaliação e compreensão dos resultados. Para TAYLOR (1992), as três reações endotérmicas principais que ocorrem durante o aquecimento das amostras podem ser identificadas nas seguintes temperaturas: entre 105 e 550 °C registram-se os valores obtidos com as perdas por evaporação da água ligada; entre 400 e 550 °C, os das perdas de massa do hidróxido de cálcio (portlandita) também por evaporação da água ligada e, entre 550 e 850 °C, os do carbonato de cálcio (calcita), que correspondem às perdas, em massa, dessas duas fases.

No eixo X são plotados os valores da temperatura e no eixo Y, a perda de massa em porcentagem. As curvas registram as oscilações detectadas que representam a ocorrência de mudanças químicas através de um evento exotérmico ou endotérmico. A linha da derivada é uma curva auxiliar e pode ajudar na leitura e identificação do fenômeno (figura 3.5).

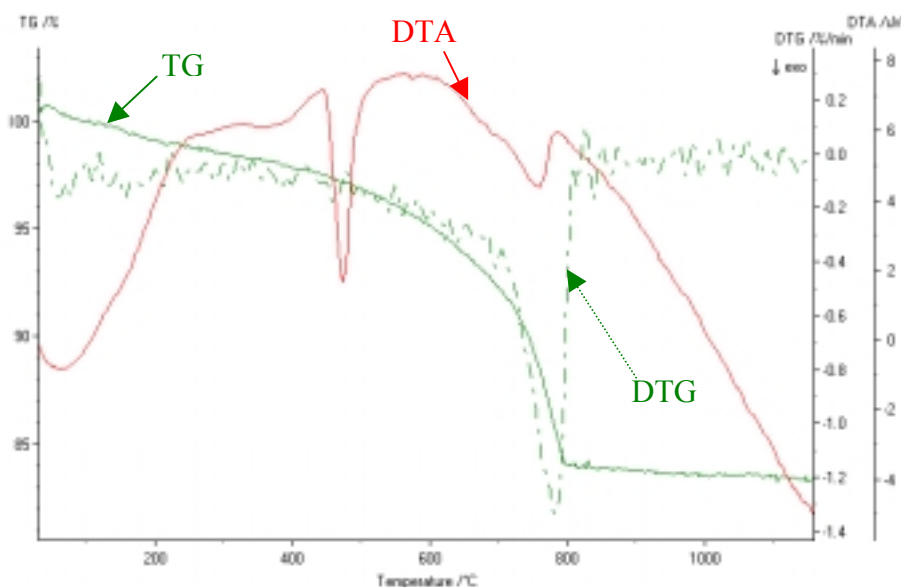


FIGURA 3.5 - Exemplo de curva obtida do ensaio de análise termogravimétrica.

3.4.6 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

3.4.6.1 ESCOLHA DO ENSAIO

O parâmetro mais conhecido associado à durabilidade do concreto é certamente a porosidade (ϵ) que é definida como sendo a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V_t), dada pela expressão:

$$\epsilon = V_v/V_t$$

em que $V_t = V_v + V_s$, e V_s é o volume dos sólidos.

Entretanto, esse parâmetro dá uma informação quantitativa sobre o volume respectivo de duas fases presentes, mas não fornece nenhuma indicação sobre a distribuição e o tamanho dos poros.

A característica dos poros relacionada ao tamanho e à distribuição está restrita a ensaios específicos como o do porosímetro por intrusão de mercúrio (MIP), equipamento capaz de avaliar a porosidade principalmente em materiais compósitos (cerâmicos) como argamassas e concretos. A técnica de porosimetria de intrusão de mercúrio serve como uma ferramenta complementar de avaliação, com ênfase nas características geométricas da porosidade.

3.4.6.2 MÉTODO UTILIZADO

Para o ensaio do MIP, alguns procedimentos estabelecidos devem ser obedecidos na coleta e preparação da amostra. A primeira porção de amostra retirada do concreto deve ser serrada e em seguida ser reduzida a tamanhos menores que 1 cm³, através do corte com fina lâmina diamantada, refrigerada a água. A amostra é seca em estufa a (105±5) °C por 24 horas. Após a secagem, as amostras devem ser imediatamente colocadas em dessecador até o início do ensaio.

No porosímetro por intrusão de mercúrio, um portador especial de amostra é evacuado e parcialmente preenchido com a amostra seca e, então, é preenchido com mercúrio sob pressão, o qual não molha materiais cerâmicos. A pressão deve ser aplicada para dentro expulsando o ar contido nos poros (REED, 1995).

Portanto, considerando-se o fato de que um líquido que não molha um sólido poroso somente entrará nos seus poros sob pressão e, ainda, quando os poros podem ser considerados cilíndricos, baseia-se na Lei de Laplace, dada pela equação de Washburn (TAYLOR, 1992), para determinar a pressão necessária para que o líquido penetre no sólido:

$$p = - 4\gamma\cos\theta/d,$$

onde p é a pressão aplicada, γ é a tensão superficial do líquido, θ é o ângulo de contato e d é o diâmetro do poro, sendo que a tensão superficial do mercúrio e o ângulo de contato adotados são 485,0 dyn/cm e 130°, respectivamente.

A máxima pressão empregada foi cerca de 200 MPa, a qual permitiu a penetração de poros com raios entre 6 nm e 200 µm. Quando duas regiões de penetração estão claramente determinadas, a fração relativa dos poros em cada tamanho pode ser estimada.

Os resultados são comumente apresentados em forma de volume cumulativo penetrado, por massa da amostra em função do raio do poro. Para as menores pressões há o preenchimento dos poros maiores, e a elevação da curva se dá no sentido da penetração dos poros menores, conforme observado na figura 3.6.

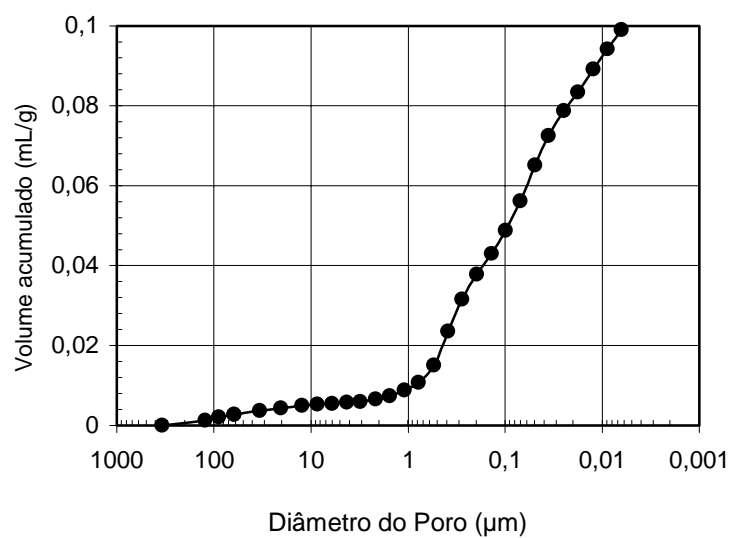


FIGURA 3.6 - Exemplo de curva obtida do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (LORENZETTI et al, 1999).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

É consenso dentro da literatura técnica do concreto que a resistência à compressão é o mais conhecido e significativo dos ensaios mecânicos, sendo utilizada como parâmetro fundamental do dimensionamento do concreto estrutural, essa resistência caracteriza a qualidade global do concreto endurecido. Sabe-se, também, que a resistência à compressão, assim como uma grande parte de outras propriedades do concreto, está condicionada à cura, logo, é conveniente otimizar essa condição para assegurar a hidratação do cimento e garantir a durabilidade desejada.

A necessidade da cura vem do fato que a hidratação do cimento não pode ser efetuada senão na presença de água (NEVILLE, 1997), essa é a razão pela qual a perda d'água pelos capilares deve ser controlada. A cura na água que é utilizada dentro dos laboratórios pode estar longe das condições reais dos canteiros de obras. Esse é o motivo pelo qual os resultados obtidos com corpos-de-prova conservados dentro da água são comparados com os recobertos com plástico adesivo (essa condição corresponde à duração de cura com selo).

Neste item demonstra-se o efeito da cura sobre o comportamento da evolução da resistência à compressão do concreto, em função do tipo e da dosagem do cimento. O objetivo é analisar o amadurecimento higrométrico do concreto denominado de cura do concreto e, mais precisamente, o modo de conservação e a duração da cura. O modo de conservação é analisado através da cura por imersão na água e com plástico adesivo (como se fosse a própria fôrma de moldagem) para quatro efetivas durações de cura (1, 3, 7 e 28 dias).

Na seqüência deste trabalho são mencionados três tipos de resistência à compressão:

- a) resistência aos 28 dias;
- b) resistência em fim de cura;
- c) resistência aos 120 dias.

A resistência aos 28 dias permite definir a classe do concreto quando a medida é tomada sobre corpos-de-prova continuamente dentro da água a $(23\pm 2^\circ)$ C até a idade de 28 dias (cura de 28 dias). Esse é um dos meios mais utilizados para a caracterização do concreto. Neste trabalho, a resistência do concreto que é medida aos 28 dias para as outras durações de cura, obtém-se com corpos-de-prova que ficam imersos ou selados durante 1, 3 e 7 dias e, em seguida, são conservados ao ar até completar 28 dias para rompimento.

A resistência em fim de cura é a resistência medida imediatamente após o término da mesma. Ela é função do estado de hidratação obtido após um certo tempo de conservação dentro da água. Dessa forma, com uma cura realmente realizada, pode-se avaliar o efetivo valor da resistência à compressão do concreto.

A resistência medida sobre corpos-de-prova em idades mais avançadas fornece a resistência do concreto numa idade pré-definida em longo prazo e permite avaliar o ganho ou a evolução da resistência após o fim de cura (neste trabalho foi fixada a idade de 120 dias).

Paralelamente, neste trabalho, amostras de concreto envoltas apenas com plástico adesivo nas laterais e na base (sem contato com água e denominada cura com lacração ou selada) foram avaliadas nos mesmos períodos da cura imersa para as três resistências mencionadas.

4.1.1 INFLUÊNCIA DA CURA

Um ambiente de dessecação (umidade insuficiente) não é favorável à obtenção de resistências elevadas em idades recentes e não permite alcançar boas resistências, em longo prazo, pois a hidratação não se desenvolve dentro de condições adequadas.

A figura 4.1 demonstra como as resistências à compressão de um concreto evoluem, ao final de 1, 7 e 28 dias de cura imersa, até a idade de 120 dias, com dosagem de 300 kg/m³ do cimento de referência CP I - S 32.

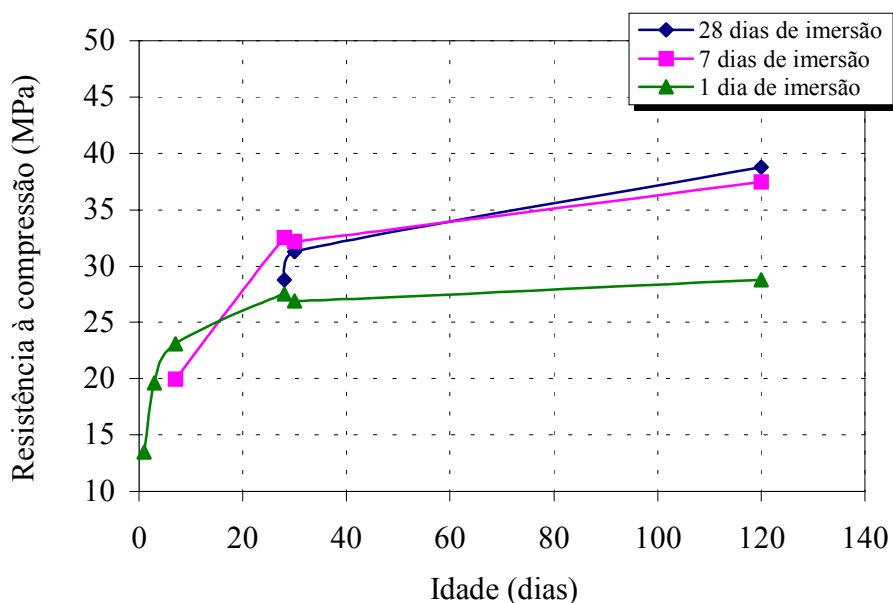


FIGURA 4.1 – Influência do período de cura imersa na evolução da resistência à compressão do concreto com 300 kg/m³ de CP I – S 32 até a idade de 120 dias.

Constata-se que, para a mistura estudada, a evolução da resistência à compressão depende muito da duração da cura. Assim, para uma duração de cura de um dia, a resistência aos 28 dias representa 95 %, aproximadamente, da sua resistência final (aos 120 dias), enquanto que, para duração de cura de 28 dias, ou mesmo até 7 dias, esse

valor não é mais que 75 %. Dessa forma, conclui-se que para a resistência progredir é necessário que o concreto não sofra dessecação nas primeiras idades.

As figuras 4.2 e 4.3 registram para o concreto com CP I – S 32 e CP II – Z 32, respectivamente, as evoluções dos três tipos de resistências à compressão: (i) em fim de cura, (ii) aos 28 dias e (iii) aos 120 dias, na dosagem de 300 kg/m³ e durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa. As tabelas com os valores médios estão no anexo 2.

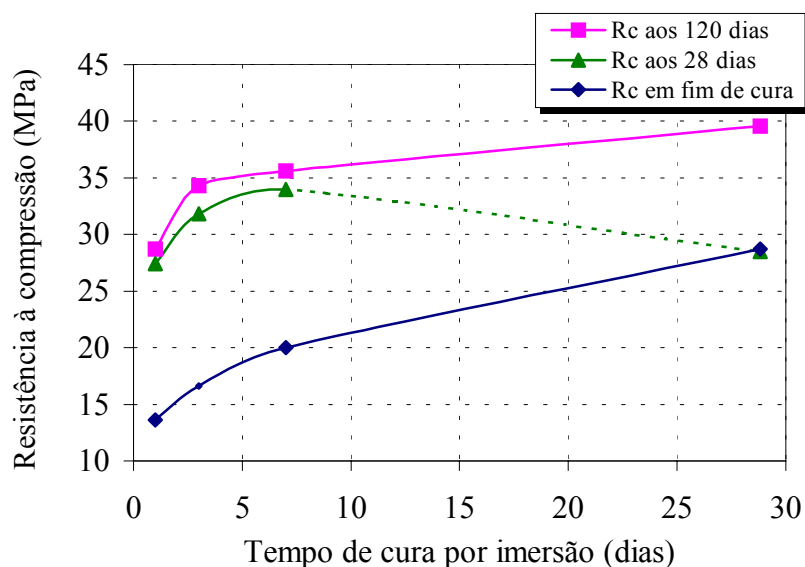


FIGURA 4.2 - Evolução das resistências à compressão nas idades estabelecidas do concreto com 300 kg/m³ de CP I – S 32 em função de 1, 3, 7 e 28 dias de duração da cura imersa.

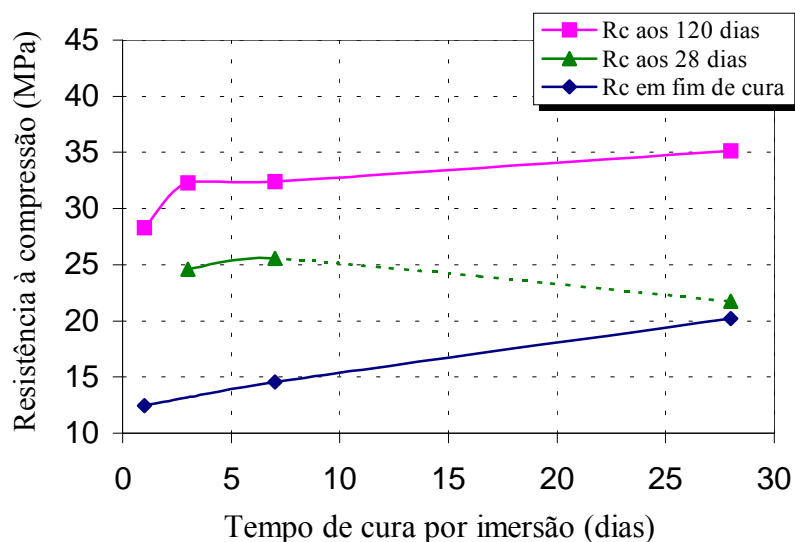


FIGURA 4.3 - Evolução das resistências à compressão nas idades estabelecidas do concreto com 300 kg/m³ do CP II – Z 32 em função de 1, 3, 7 e 28 dias de duração da cura imersa.

Observa-se que a evolução da resistência depende muito da duração da cura imersa e constata-se que uma conservação mais longa na água favorece a hidratação do cimento aumentando a resistência do concreto no transcorrer do tempo.

Entretanto, percebe-se que a evolução da resistência aos 28 dias, em função da duração da cura imersa, não é uniforme. A resistência à compressão aos 28 dias, do concreto submetido a 28 dias de cura imersa, é inferior àquelas cujo concreto não foi submetido a mais que 7, ou mesmo, 3 dias de cura imersa. Esse assunto é comentado no próximo item que enfoca cada uma das resistências acima mencionadas.

4.1.2 INFLUÊNCIA DA CURA E DA DOSAGEM EM CIMENTO NA RESISTÊNCIA

4.1.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS

A figura 4.4 mostra a variação da resistência à compressão aos 28 dias do concreto com 300, 350 e 400 kg/m³ do CP I – S 32 para diferentes durações de cura por imersão (3, 7 e 28 dias).

Em pesquisas realizadas por PRICE (1954) e mais recentemente nos trabalhos realizados por DIAFAT (1996), um comportamento semelhante é observado para as resistências aos 28 dias, quando as amostras de concreto são conservadas em imersão até essa data.

O déficit na resistência medida aos 28 dias, após 28 dias de cura imersa, é demonstrado, também, neste trabalho para todas as variáveis (duas condições de cura, três dosagens e dois tipos de cimentos) conforme figura 4.4.

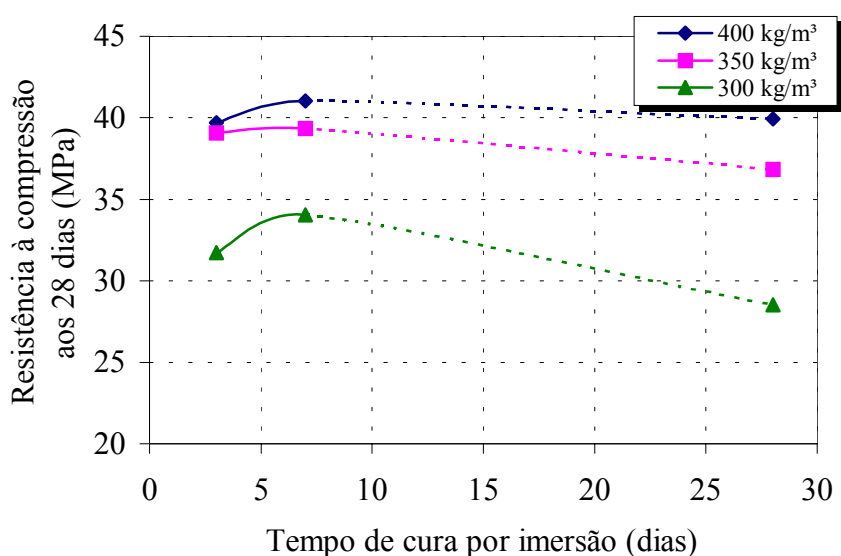


FIGURA 4.4 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da duração da cura imersa do concreto para três dosagens do CP I – S 32.

Pode-se observar, também, na figura 4.5, evolução semelhante para o CP II – Z 32, quando é submetido às mesmas condições.

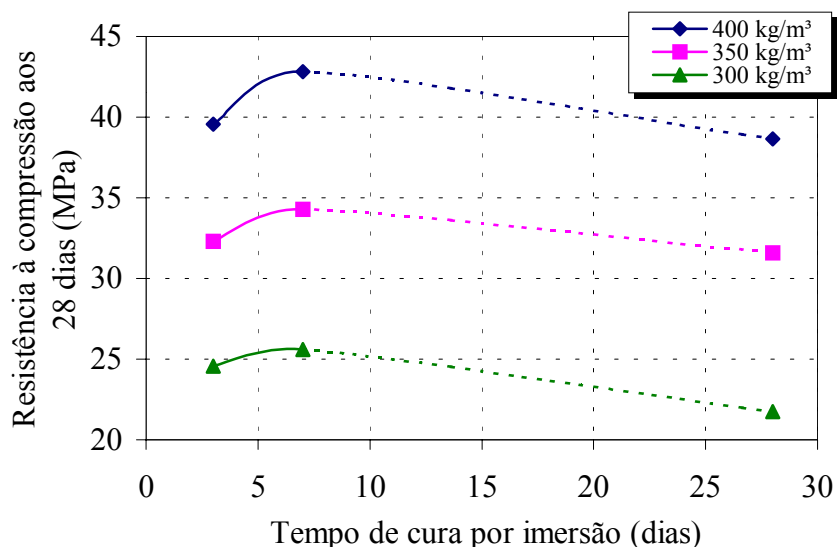


FIGURA 4.5 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da duração da cura imersa do concreto para três dosagens do CP II – Z 32.

Os baixos valores obtidos para a resistência aos 28 dias, após 28 dias de cura imersa, são atribuídos à presença de água em excesso nos poros capilares no momento do ensaio.

Para o CP I – S 32, o maior ganho de resistência, com o prolongamento da cura, ocorre para as dosagens menos ricas em cimento (300 kg/m^3) e em idades mais recentes até 7 dias. Isso é devido à porosidade da superfície do concreto que é maior quando a dosagem em cimento é fraca e o tempo de cura é curto (DIAFAT, 1996), facilitando assim a evaporação da água livre. Porém, é visivelmente eficaz, para a resistência, o prolongamento da cura por imersão de 3 para 7 dias, principalmente para o CP II – Z 32. BALAYSSAC et al (1997) afirmam que, devido ao efeito pozolânico, as reações de hidratação ocorrem posteriormente, com acréscimos de até aproximadamente 10 % na resistência.

Segundo HELENE e TERZIAN (1992), cimentos com adições ativas de escórias ou pozolanas alcançam melhores resistências em presença de cura úmida prolongada, confirmando-se sua importância.

Com a figura 4.6 demonstra-se a evolução da resistência aos 28 dias para o CP I – S 32 quando os corpos-de-prova são mantidos selados por 1, 3, 7 e 28 dias.

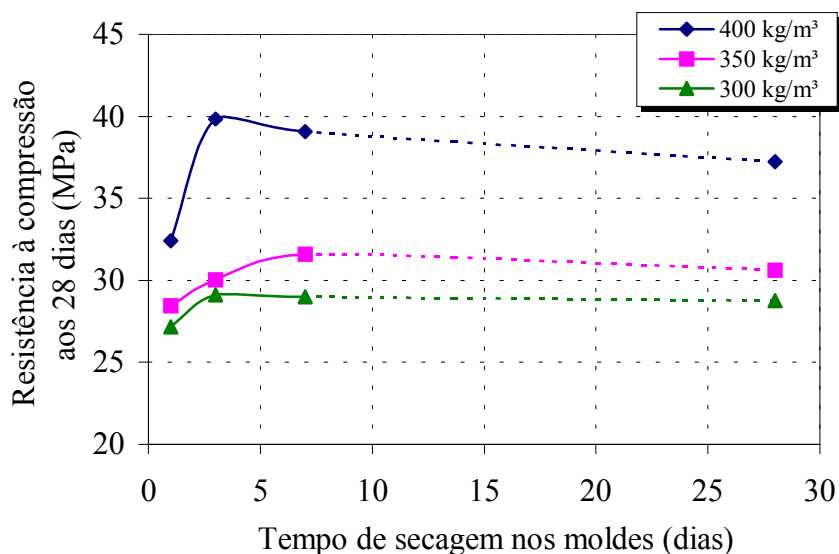


FIGURA 4.6 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da duração da cura selada do concreto para três dosagens do CP I – S 32.

Para o concreto com CP I – S 32, verificou-se que, na cura selada até 3 dias, em relação a 1 dia, há ganhos significativos de até 20 % (400 kg/m³) e 8 % (300 kg/m³). Períodos mais prolongados pouco acrescentam à sua resistência, devido ao fato que, apesar da proteção com selo, boa parte da água livre já evaporou, como será demonstrado na seqüência deste trabalho (através das medidas da perda de massa aparente em função do tempo).

Com a figura 4.7 demonstra-se a evolução semelhante da resistência aos 28 dias para o CP II – Z 32 quando os corpos-de-prova são mantidos selados por 1, 3, 7 e 28 dias. Para o CP - II Z, os ganhos em 3 dias com a cura com selo foram de até 14 % (400 kg/m³) e de 10 % (300 kg/m³), devido ao menor poder de retenção de água; porém, prolongada até 7 dias, resultou em acréscimo de até 20 % (400 kg/m³) e 14 % (300 kg/m³), devido ao efeito pozolânico.

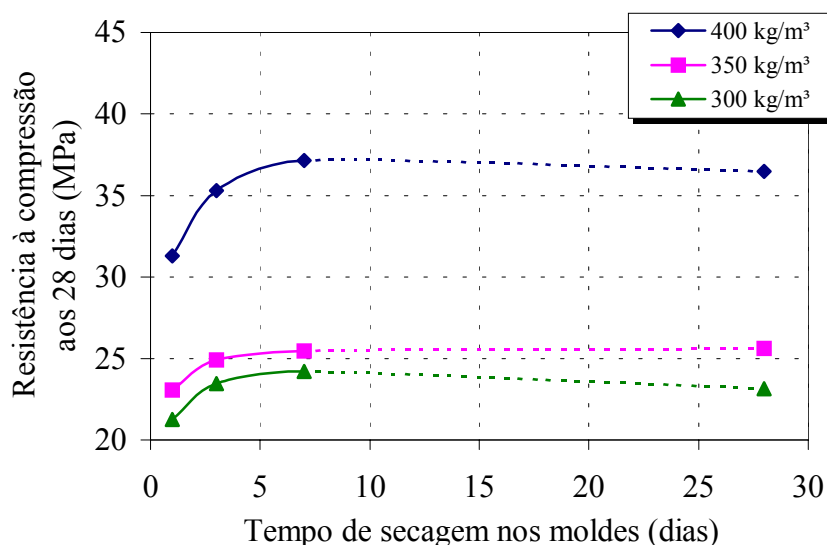


FIGURA 4.7 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da duração da cura selada do concreto para três dosagens do CP II – Z 32.

Os resultados obtidos para a cura selada e por imersão, para o CP I - S 32, são comparados na figura 4.8. Pode-se notar que a cura por imersão é sempre mais eficiente do que a cura selada, principalmente para baixas dosagens em cimento.

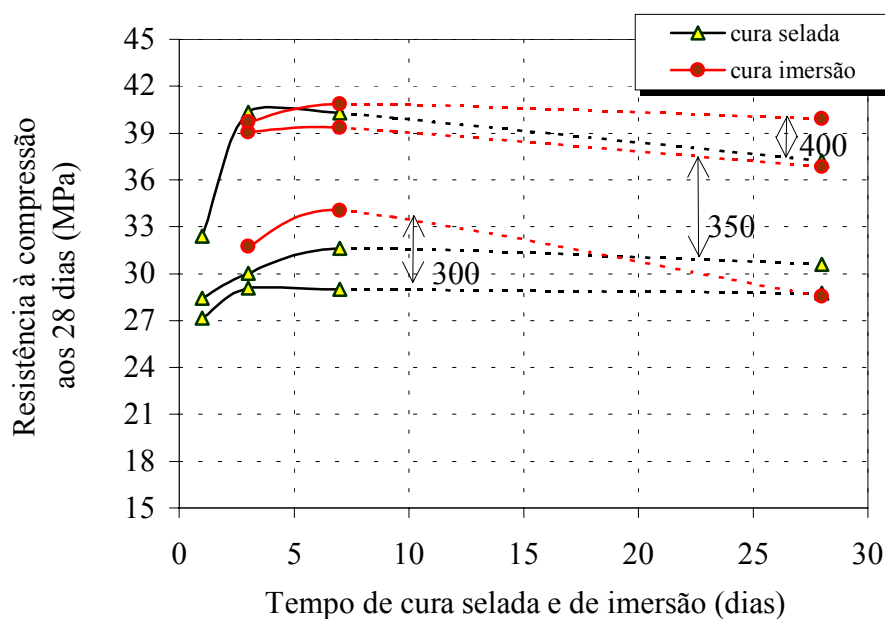


FIGURA 4.8 - Comparação das resistências à compressão aos 28 dias em função da duração da cura imersa e selada dos concretos, para as dosagens de 300, 350 e 400 kg/m³ do CP I – S 32.

4.1.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FIM DE CURA

A figura 4.9 mostra a variação da resistência ao final da cura imersa de 1, 7 e 28 dias do concreto com CP I – S 32.

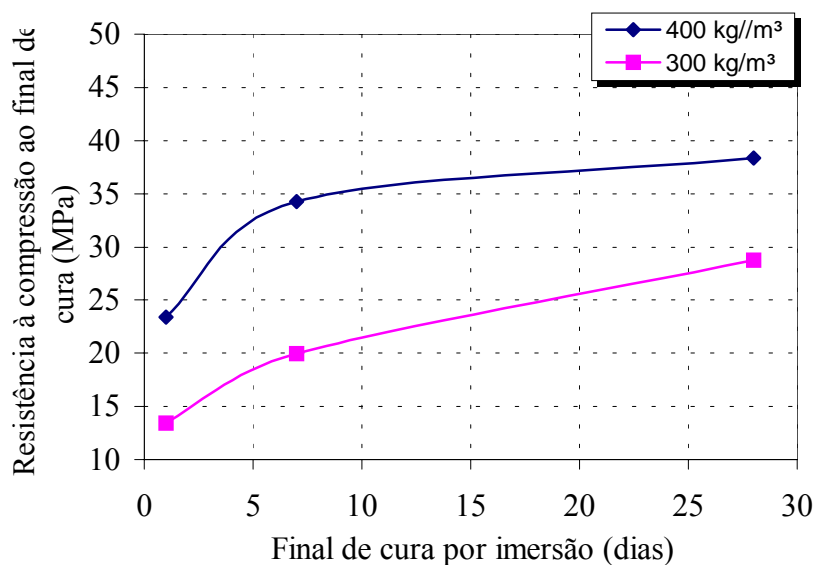


FIGURA 4.9 - Resistência à compressão ao final de cura do concreto com duas dosagens do CP I – S 32 em função do final da cura imersa.

A figura 4.10 compara essa resistência com a resistência à compressão medida aos 28 dias do mesmo concreto, também com cura imersa.

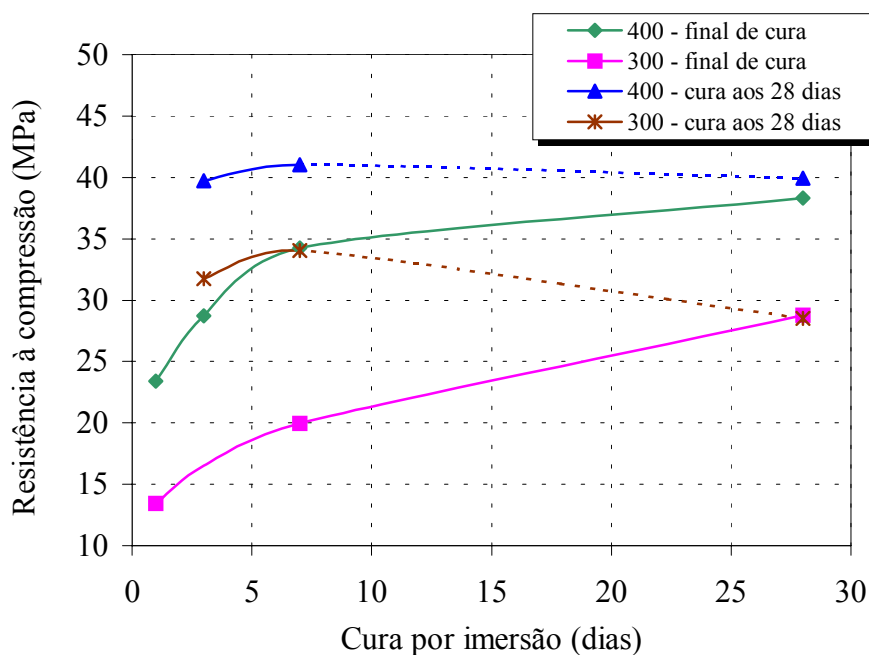


FIGURA 4.10 - Comparação das curvas da resistência à compressão ao final de cura e aos 28 dias do concreto com duas dosagens do CP I – S 32 em função da duração da cura imersa.

Os resultados plotados na figura 4.11 demonstram a correlação existente entre as resistências de final de cura imersa (R_{f_c}) com a resistência aos 28 dias de cura imersa (f_{c28}).

O concreto com CP I – S 32 mostra que a resistência em fim de cura representa uma fração tanto mais importante da resistência aos 28 dias, quanto maior é a dosagem em cimento, mas para os acréscimos relativos das resistências consecutivas, o aumento da duração da cura é mais importante quando a dosagem em cimento é fraca.

Verifica-se que, enquanto a resistência em final de cura imersa aos 7 dias alcança 90 % da resistência aos 28 dias (f_{c28}) na dosagem em cimento de 400 kg/m³, é necessário prorrogar a cura para 21 dias, aproximadamente, para se obter esse mesmo rendimento na dosagem de 300 kg/m³. Porém, os concretos submetidos à dessecação precoce (umidade insuficiente) não atingem a resistência máxima prevista nas idades posteriores.

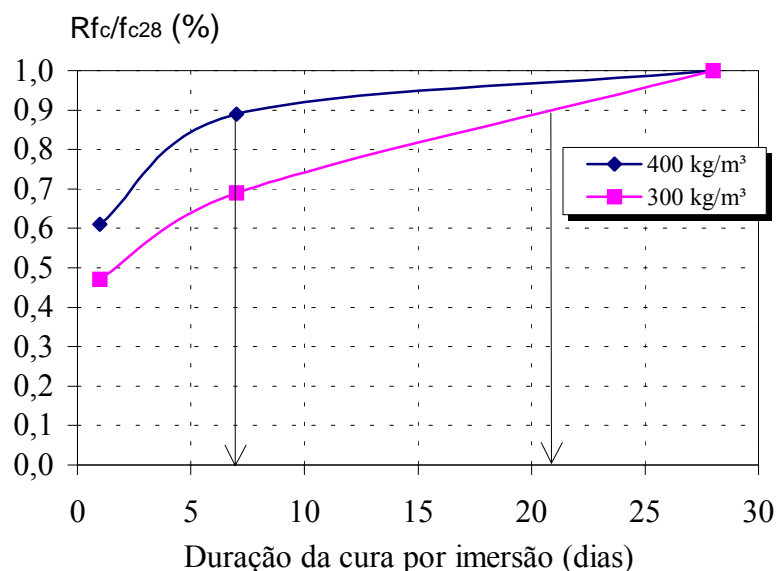


FIGURA 4.11 - Variação da relação resistência em fim de cura/resistência aos 28 dias do concreto com duas dosagens do CP I – S 32 em função da duração da cura imersa.

Certamente que uma cura prolongada de 28 dias não é jamais realizada na prática, mas ela é indispensável para definir a classe do concreto e demonstrar seus efeitos benéficos. Neste trabalho essa cura será sempre utilizada como referência.

Os gráficos da resistência em função do final de 1, 7 e 28 dias de cura imersa, da comparação com a resistência à compressão medida aos 28 dias e a relação entre as resistências foram elaborados também para o concreto com CP II – Z 32, os quais constam no anexo 1.

4.1.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 120 DIAS

As figuras 4.12 e 4.13 mostram as tendências da resistência aos 120 dias do concreto com o prolongamento da duração da cura (imersa e com selo) para diferentes dosagens de CP II – Z 32. Demonstra-se que a tendência ascendente da curva da resistência muda em função do modo de conservação, do tipo e da dosagem em cimento.

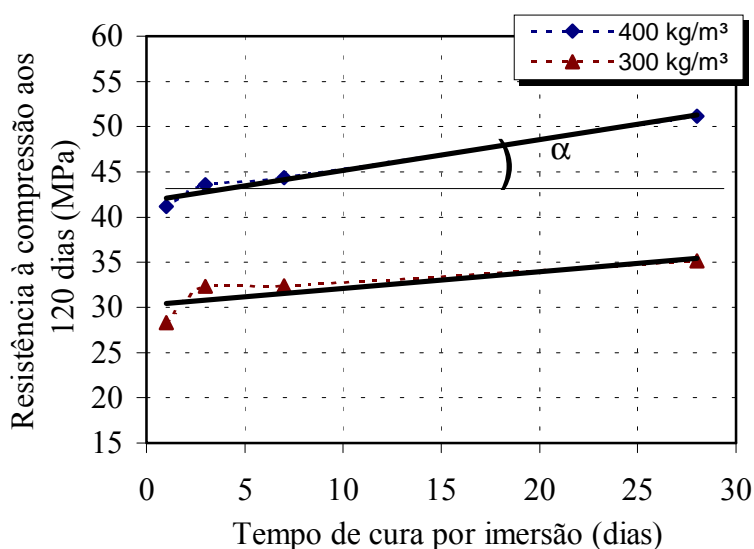


FIGURA 4.12 - Tendência das curvas da resistência aos 120 dias do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função da cura imersa.

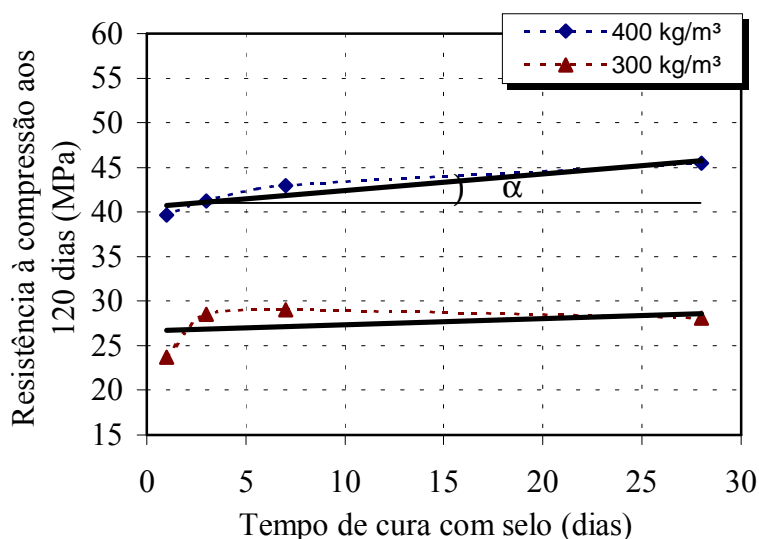


FIGURA 4.13 - Tendência das curvas da resistência aos 120 dias do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função da cura com selo.

Na figura 4.14 observa-se que as resistências ao final de cura e aos 120 dias aumentam proporcionalmente em função de maior dosagem em cimento e maior tempo de cura (tanto para o CP I – S como para o CP II – Z) e estabelecem entre si uma relação

tipicamente linear. Dessa forma, a resistência ao final de cura pode ser um parâmetro indicador de durabilidade na evolução das características do concreto.

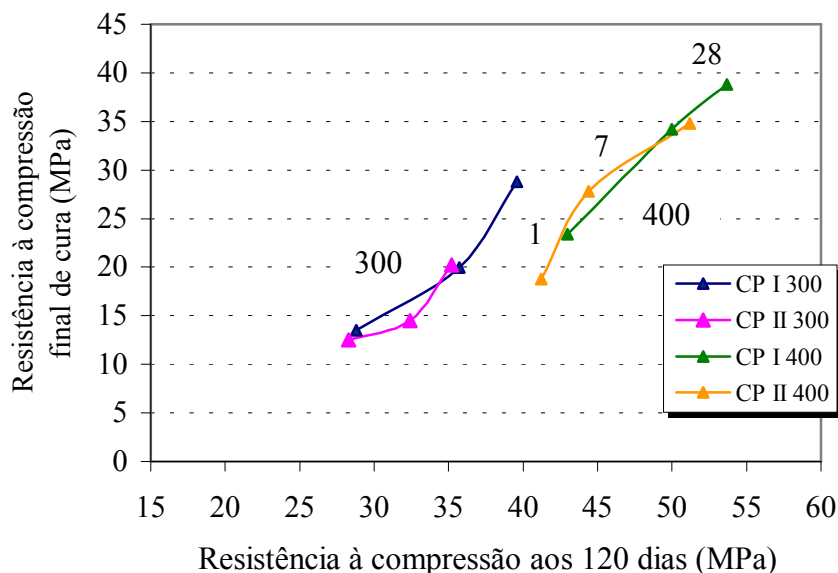


FIGURA 4.14 – Relação entre as resistências à compressão ao final de cura e aos 120 dias dos concretos com duas dosagens de CP I – S e CP II – Z para 1, 7 e 28 dias de duração da cura imersa.

4.1.3 COMPENSAÇÃO ENTRE DURAÇÃO DE CURA E DOSAGEM EM CIMENTO

Parte das interrogações nas quais este trabalho pode se deter consiste em saber como a duração de cura e a dosagem em cimento podem compensar seus efeitos para a obtenção de uma resistência à compressão do concreto em uma determinada idade. Ou seja, traduzir a duração de cura no “equivalente” em cimento, pois os efeitos da cura não são independentes da dosagem em cimento.

A figura 4.15 mostra a evolução da resistência à compressão do concreto com dosagens de 300, 350 e 400 kg/m³ de CP I – S 32 para diferentes durações de cura por imersão (3, 7 e 28 dias) aos 120 dias.

Verifica-se que (na faixa hachurada) a resistência do concreto pode oscilar, em média, 27 % (de 35 a 48 MPa) para diferentes dosagens em cimento e tempo de cura por imersão. Tomando como exemplo a curva da resistência com 28 dias de cura, constata-se que é possível saltar de 42 MPa para 48 MPa (ganho de 12,5 % na resistência) com um acréscimo de 12 % em cimento.

Entretanto, podem-se obter as mesmas resistências de 42 MPa ou até mesmo 48 MPa tanto para um concreto com 28 dias de cura como por outros com 3 ou 7 dias. A diferença é a quantidade extra de cimento que se deve acrescentar, entre 10 % e 12 %, para se obter resistências maiores com menores tempos de cura.

Todavia, resistências mais elevadas, como 51 MPa, somente são atingidas quando o tempo de cura por imersão é prolongado, mesmo com maiores dosagens em cimento. A diferença pode parecer pouco significativa, mas é necessário lembrar que os cimentos que contêm apenas substituições mínimas (CP I - S) têm grande velocidade nas reações de hidratação logo nas primeiras idades, portanto, se comparados com os cimentos com maior porcentagens de substituição, as diferenças serão ainda maiores.

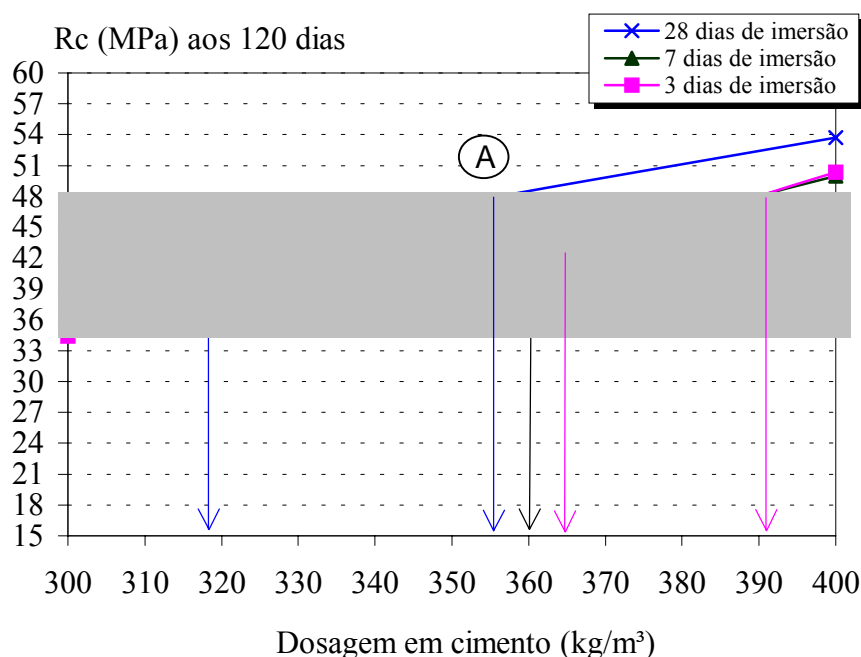


FIGURA 4.15 - Resistência à compressão aos 120 dias do concreto em função das dosagens do CP I – S 32 para diferentes durações de cura imersa.

Na figura 4.16 constata-se evolução semelhante para o CP II – Z 32 quando submetido às mesmas condições de cura. Entretanto, a oscilação das resistências (faixa hachurada) cai para aproximadamente 17 % (de 35 a 42 MPa), em relação ao CP I, com a cura mantida por 3, 7 ou 28 dias. Dessa forma, visto que a faixa de oscilação é menor para o cimento composto (CP II – Z 32), o acréscimo de cimento é menor para atingir a resistência próxima à obtida aos 28 dias de cura.

Para o CP II - Z, a mesma resistência de 42 MPa pode ser obtida com uma quantidade extra de apenas 5 % em cimento, para duração de 7 dias de cura, em relação aos 28 dias, ou mais 11,5 % de cimento para cura de 3 dias. Observa-se que a cura imersa mantida por 7 dias fornece ganhos significativos para o CP II – Z, porém, a cura de 3 dias requer maior dosagem em cimento (12 %) para obter a mesma resistência. Entretanto, é visivelmente eficaz, para a resistência, o prolongamento da cura por imersão de 3 para 7 dias (redução de 6,5 % do consumo de cimento). Entretanto, somente com a cura imersa de 28 dias pode-se almejar uma resistência mais elevada do CP II - Z 32 comparável a uma resistência do CP I – S 32, por exemplo, de 48 MPa (ponto A). Todavia mesmo quando as resistências obtidas com diferentes cimentos se situam em intervalos iguais - o comportamento pode ser distinto quando observado em relação à durabilidade.

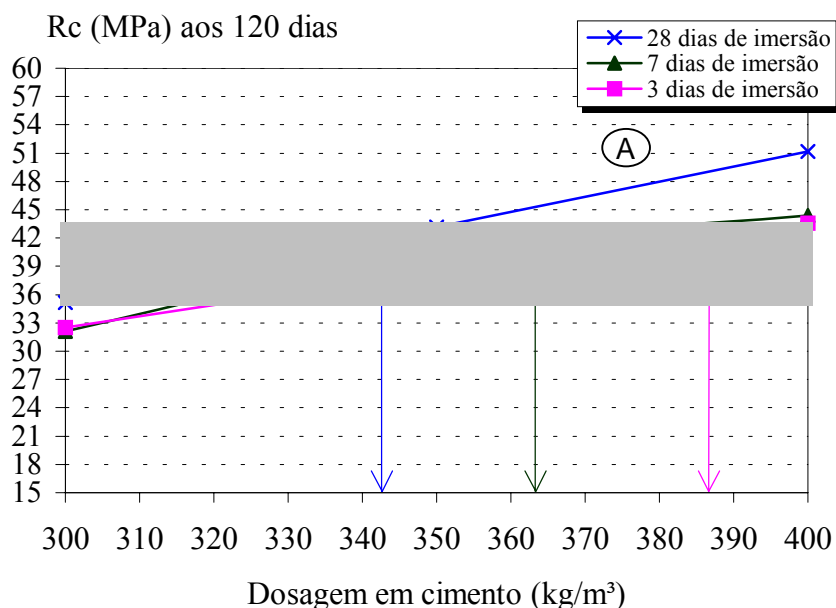


FIGURA 4.16 - Resistência à compressão aos 120 dias do concreto em função das dosagens do CP II – Z 32 para diferentes durações de cura imersa.

Também foram verificadas as interações da resistência aos 120 dias com a cura selada em função da dosagem. Os resultados demonstraram comportamento semelhante do concreto na condição de cura selada com a cura imersa. Os gráficos encontram-se no anexo 1.

Supondo-se que há substituição de 5 % no CP – I S 32 e de 15 % no CP –II Z 32, é possível determinar o valor nominal do cimento (clínquer e gipsita) subtraindo-se essas substituições. A tabela 4.1 fornece os valores estimados das dosagens do concreto com os cimento sem as substituições.

TABELA 4.1 - Valores da resistência à compressão para valores nominais de clínquer e gesso.

Quantidade de cimento (kg/m³)	CP I – S 32			CP II – Z 32		
	Com substituição	300	350	400	300	350
Sem substituição	285	332,5	380	255	297,5	340
Resistência à compressão (MPa) aos 120 dias (cura 28 dias)	39,6	47,2	53,7	35,2	43,2	51,2

Dessa forma, é possível estabelecer uma projeção dos ganhos reais na resistência do concreto assim como o efeito das substituições, para a cura úmida de 28 dias, através da tendência das resistências na idade de 120 dias observada no gráfico da figura 4.17. A quantidade efetiva de cimento numa dosagem fornece um significativo aumento das resistências, conforme fica demonstrado.

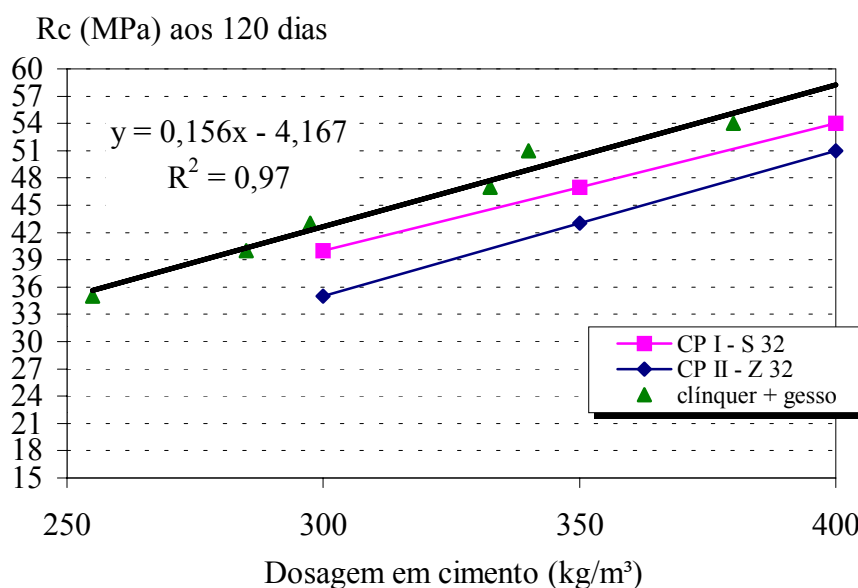


FIGURA 4.17 - Tendência da reta da resistência à compressão aos 120 dias do concreto com CP I – S 32 e CP II – Z 32 em função da dosagem nominal de clínquer e gipsita para cura imersa de 28 dias.

Na figura 4.18, comportamento semelhante do concreto é observado para os resultados obtidos através da tendência das resistências aos 28 dias com cura imersa de 28 dias, para os dois cimentos analisados (CP I – S 32 e CP II – Z 32). A resistência aos 28 dias (f_{c28}) é o parâmetro de referência do concreto, logo a projeção dessa resistência, assim como o efeito das substituições, pode estabelecer correlações de dosagens para os diversos tipos de cimento.

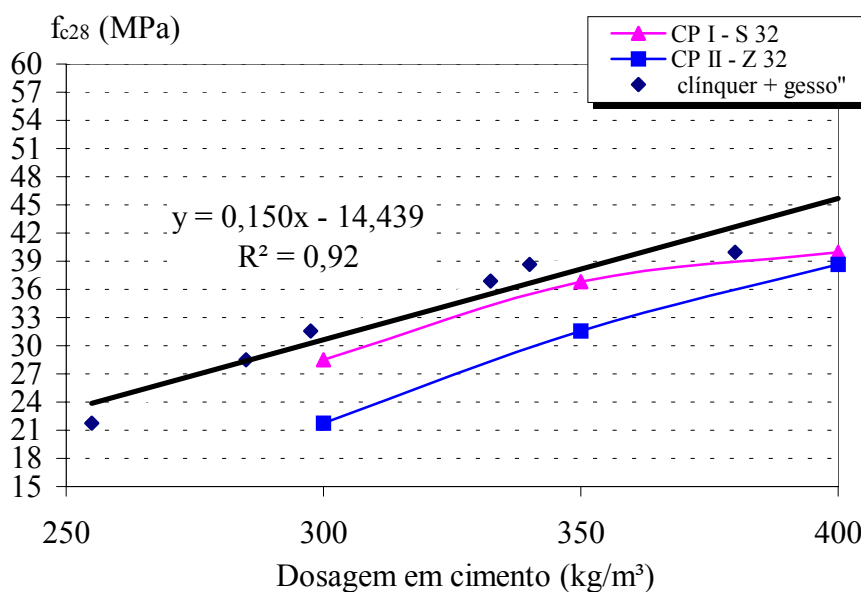


FIGURA 4.18 - Tendência da reta da resistência à compressão aos 28 dias do concreto com CP I – S 32 e CP II – Z 32 em função da dosagem nominal de clínquer e gipsita para cura imersa de 28 dias.

Como a relação a/c é um parâmetro de referência para a tecnologia do concreto, a figura 4.19 demonstra a interação da resistência à compressão aos 28 dias de cura imersa (f_{c28}) com a relação a/c para as dosagens em cimento elaboradas neste trabalho.

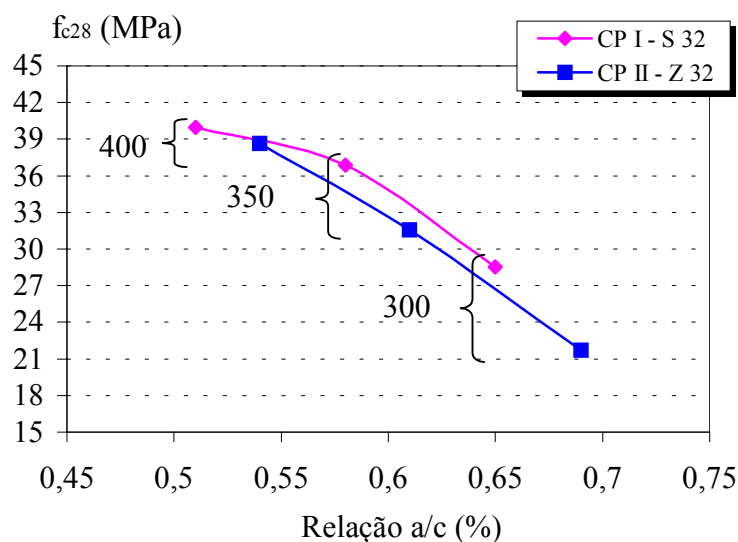


FIGURA 4.19 - Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com 300, 350 e 400 kg/m³ de CP I – S e CP II – Z em função da relação a/c para cura imersa de 28 dias.

4.2 INFLUÊNCIA DA CURA E DA DOSAGEM EM CIMENTO NA DURABILIDADE DO CONCRETO

A durabilidade é definida como sendo a capacidade do material manter suas características físico-químicas e suas performances mecânicas, durante um certo período de tempo de sua vida útil previsto para estar em serviço. Neste trabalho, a durabilidade é avaliada em função da contribuição da cura úmida como um meio eficaz para impedir a saída prematura da água evaporável do concreto, a fim de que a hidratação se realize, diminuindo a vulnerabilidade da sua rede porosa e aumentando, assim, o desempenho apresentado em todas as etapas de sua vida útil.

Neste capítulo, são analisados e correlacionados os resultados das medidas de perda de massa, de absorção de água por capilaridade e do fenômeno de carbonatação aos 120 dias dos concretos com cimento CP I – S 32 e CP II – Z 32 para diferentes dosagens (300, 350 e 400 kg/m³), condições (por imersão e plástico adesivo) e durações de cura (1, 3, 7 e 28 dias) para avaliar a consequência da dessecação do concreto na sua durabilidade.

4.2.1 PERDA DE MASSA

A secagem natural do concreto tem conseqüências importantes no comportamento mecânico das estruturas e na durabilidade. O fenômeno da secagem das estruturas do concreto depende da espessura das peças e das condições climáticas ambientais. Pode-se dizer que durante a maior parte da vida útil do concreto, a secagem fica restrita à sua superfície e aos fatores que facilitam a evaporação. Esses efeitos são mais intensos nas idades mais recentes do concreto não protegido e podem ser atenuados pela cura.

4.2.1.1 INFLUÊNCIA DA CURA

As evoluções das perdas de massa aparente cujas medidas foram tomadas a partir do fim de cura até a idade de 120 dias, podem ser visualizadas nas figuras 4.20 e 4.21. A cinética das curvas facilita a interpretação do fenômeno e as tabelas de resultados estão no anexo 2.

De acordo com AÏTCIN (2000), na medida em que a água deixa o concreto, meniscos se desenvolvem em capilares cada vez mais finos e, por conseguinte, as forças capilares desenvolvidas dentro do concreto ficam cada vez mais fortes, tornando mais difícil a evaporação da água. Isso explica a forma das curvas de perda de massa versus tempo de dessecação.

Os concretos mais fracamente dosados (300 kg/m^3) foram mais sensíveis à dessecação, pois se caracterizam por uma estrutura globalmente mais porosa que facilitam a saída da água. Esses concretos conservam uma estrutura de grossos poros capilares mesmo após 28 dias de cura imersa. Assim, uma sensível perda de massa pode significar uma sensível variação da permeabilidade (QUENARD e CARCASSES, 1997) e, embora o estudo desse trabalho não contemple a permeabilidade, há fortes correlações entre esta e a perda de massa, bem como, com a absorção de água por capilaridade. Estudos recentes seguem a tendência de analisar a porosidade indiretamente por ensaios que possam ser correlacionados.

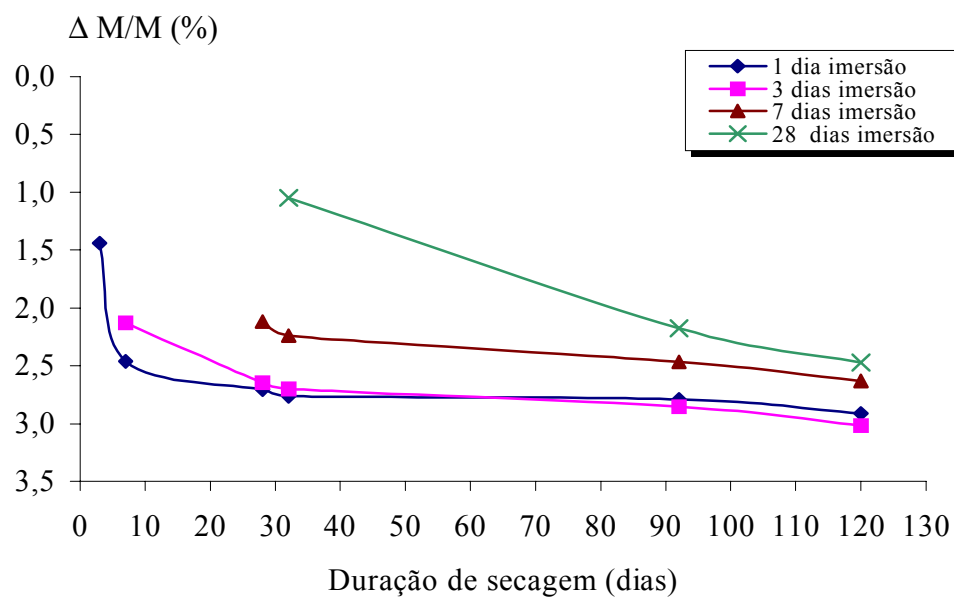


FIGURA 4.20 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 300 kg/m³ de CP II – Z 32, após cura imersa, em função da secagem até a idade de 120 dias.

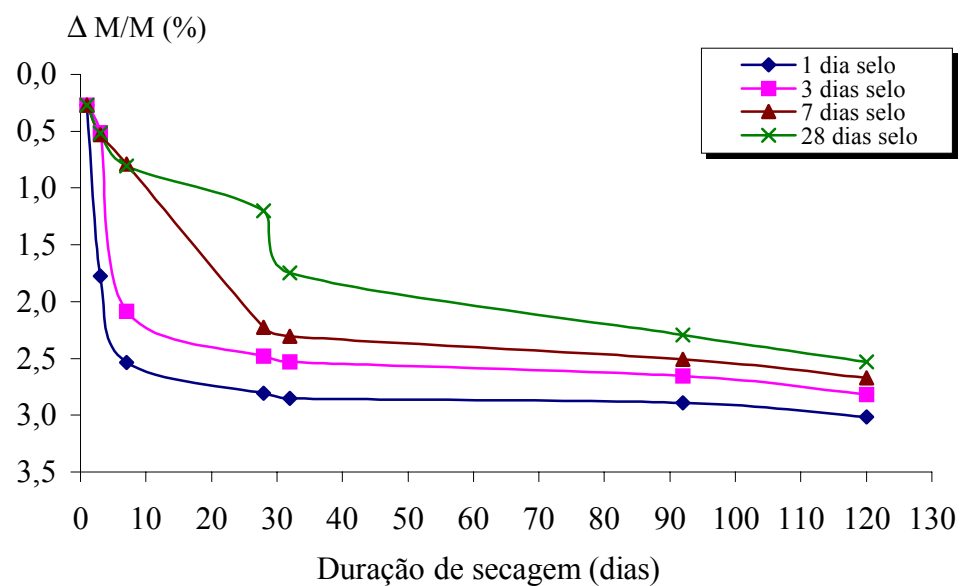


FIGURA 4.21 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 300 kg/m³ de CP II – Z 32, após cura com selo, em função da secagem até a idade de 120 dias.

As figuras 4.22 e 4.23 permitem visualizar as mesmas tendências das perdas de massa para o concreto com CP I – S 32 (300 kg/m³).

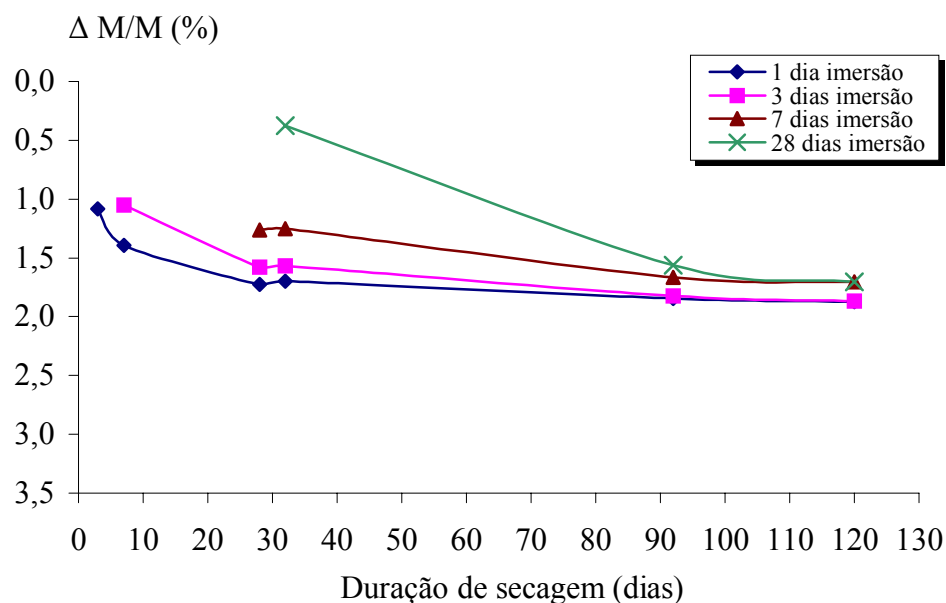


FIGURA 4.22 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 300 kg/m³ de CPI - S 32, após cura imersa, em função da secagem até a idade de 120 dias.

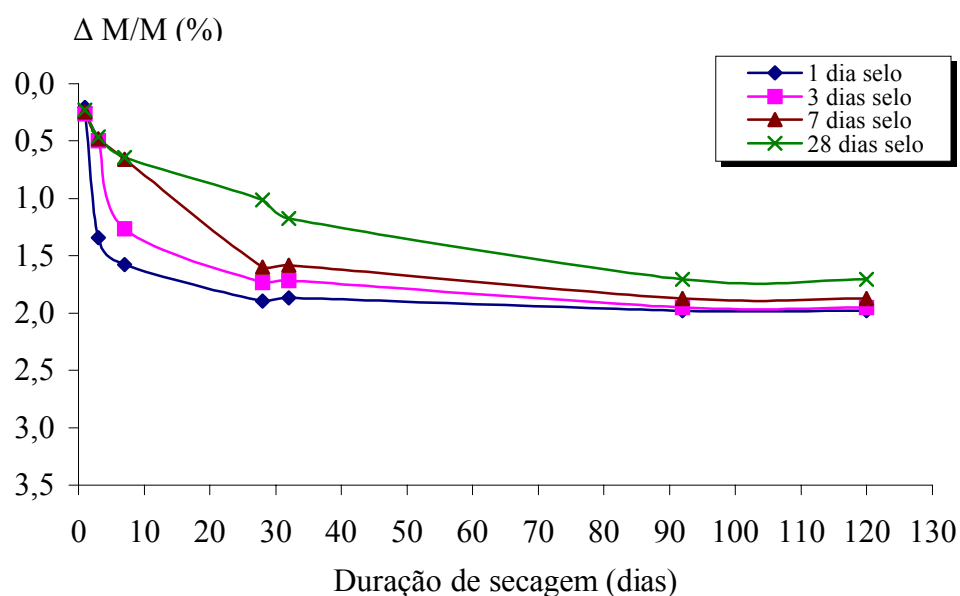


FIGURA 4.23 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 300 kg/m³ de CPI - S 32, após cura com selo, em função da secagem até a idade de 120 dias.

Observa-se pelos resultados obtidos que a perda de massa: (i) é mais intensa nos primeiros dias quando ocorre a dessecação e, sobretudo após períodos de cura curtos, (iii) diminui, devido à não evaporação, com o prolongamento da cura e (iv) ocorre através da superfície livre do topo dos corpos-de-prova mesmo durante o tempo com o lacre (selo) que simula as fôrmas de moldagem.

4.2.1.2 PERDA DE MASSA RELACIONADA À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A representação gráfica das variáveis quantitativas, em uma análise estatística, ajuda a compreender o comportamento conjunto dessas variáveis quanto à existência ou não de associabilidade (BUSSAB e MORETTIN, 1987). O coeficiente de correlação quantifica essa associação, assumindo valores entre -1 e $+1$, e descreve, num único número, o grau de relacionamento entre duas variáveis. Através da análise dos pontos, em um gráfico de dispersão, é possível verificar se a relação é do tipo linear. O coeficiente de correlação mede quanto os dados aproximam-se de uma reta. Entretanto, MAGALHÃES e LIMA (2000) afirmam que coeficiente de correlação zero não prova a independência das variáveis, mas pode apenas indicar que o relacionamento não é do tipo linear.

Assim, a figura 4.24 permite relacionar a perda de massa aparente com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com CP I – S 32, com duas dosagens (300 e 400 kg/m^3) e duas formas de curas (imersa e selada) de 1, 3, 7 e 28 dias de duração. Esse cimento é um referencial e possibilita identificar uma linha de tendência para o fenômeno da perda de massa em relação à resistência. A figura 4.25 permite, igualmente, relacionar a perda de massa com a resistência do concreto com CP II – Z 32, nas mesmas condições.

O grau de associabilidade entre a perda de massa e a resistência à compressão aos 120 dias está quantificada com os valores de coeficiente de correlação de $-0,85$ (cura imersa) e $-0,89$ (cura com selo), no anexo 2 (tabela A2.8), o que sugerem uma grande dependência das variáveis envolvidas. O sinal negativo indica que quando a resistência aumenta, a perda de massa diminui.

Além da relação linear entre duas variáveis, é necessário verificar sua relação de causalidade, isto é, quantificar qual é a mudança observada em uma das variáveis quando se modificam os valores da outra (MAGALHÃES e LIMA, 2000). Essa análise estatística é denominada de regressão.

Considerando-se os dados agregados em termos do tipo de cura e quantidade de cimento, fez-se análises de regressões lineares simples para os dois tipos de cimento (figuras 4.24 e 4.25). Observa-se que $R^2 \cong 0,92$, logo, através do modelo de regressão permite-se dizer que 92 % da variabilidade da perda de massa aparente pode ser explicada pelos diferentes valores da resistência à compressão considerados. Portanto, a resistência à compressão aos 120 dias pode ser considerada como um parâmetro confiável na determinação da perda de massa no concreto. O resíduo de 8 % pode ser considerado como resultado de flutuações aleatórias.

Dessa forma, determina-se que a resistência à compressão aos 120 dias de 35 MPa corresponde à perda de massa aparente de 1,7 % do concreto com CP I – S e de 2,3 % do CP II – Z. Assim, para um aumento de 29 % na resistência à compressão, de 35 MPa para 45 MPa, corresponde uma redução de, aproximadamente, 30 % nas perdas de massas (de 1,7 % para 1,2 % do CP I e de 2,3 % para 1,6 % do CP II).

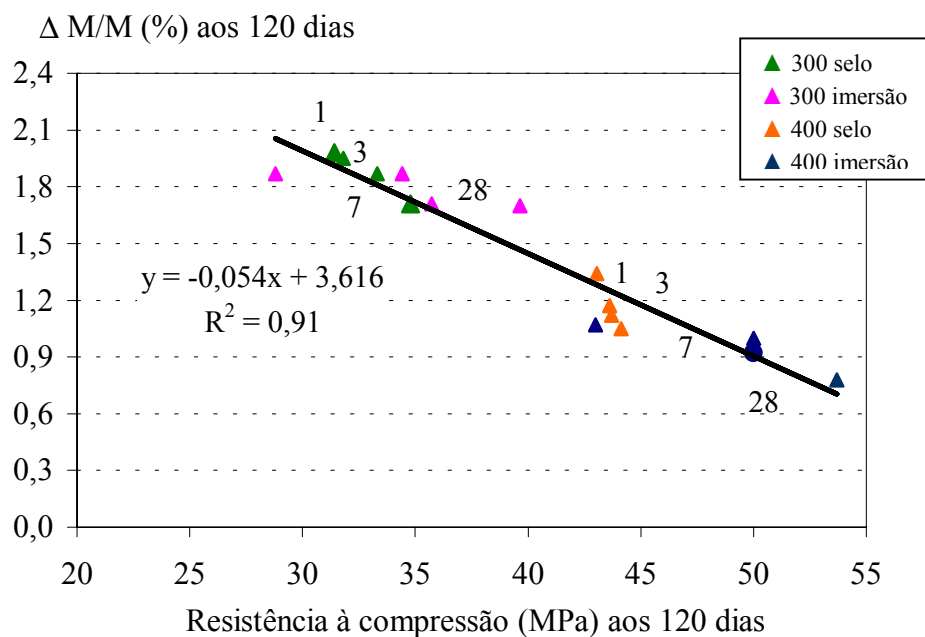


FIGURA 4.24 – Correlação da perda de massa aparente com a resistência à compressão do concreto aos 120 dias, com duas dosagens de CP I – S 32 para curas de imersão e selada de 1, 3, 7 e 28 dias.

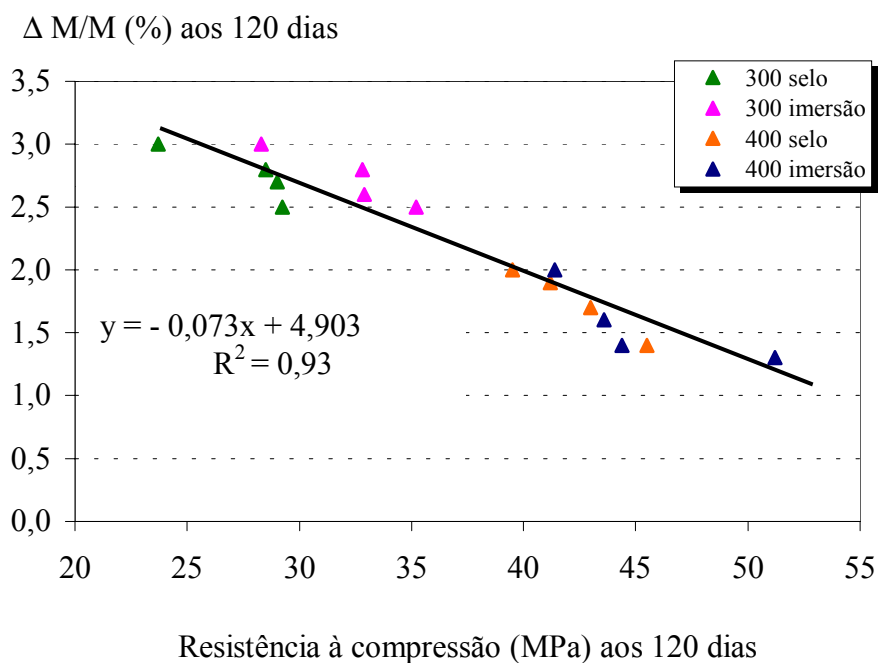


FIGURA 4.25 - Correlação da perda de massa aparente com a resistência à compressão do concreto aos 120 dias com duas dosagens de CP II – Z 32 para curas de imersão e selada de 1, 3, 7 e 28 dias.

4.2.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

O estudo do fenômeno de carbonatação é importante porque ele provoca uma modificação lenta na estrutura do concreto, mudando características como a porosidade e a proteção das armaduras.

4.2.2.1 INFLUÊNCIA DA CURA

No fenômeno da carbonatação, a influência da cura processa-se em função do tempo e das condições, conforme ilustra a figura 4.26. Os valores para a profundidade de carbonatação do concreto na cura imersa são menores que os da cura com selo. Observa-se ainda que com a cura prolongada de 1 ou 3 dias para 28 dias, obtêm-se reduções de 40 % (imersão) e 26 % (com selo), na profundidade carbonatada. As tabelas com os valores médios encontram-se no anexo 2.

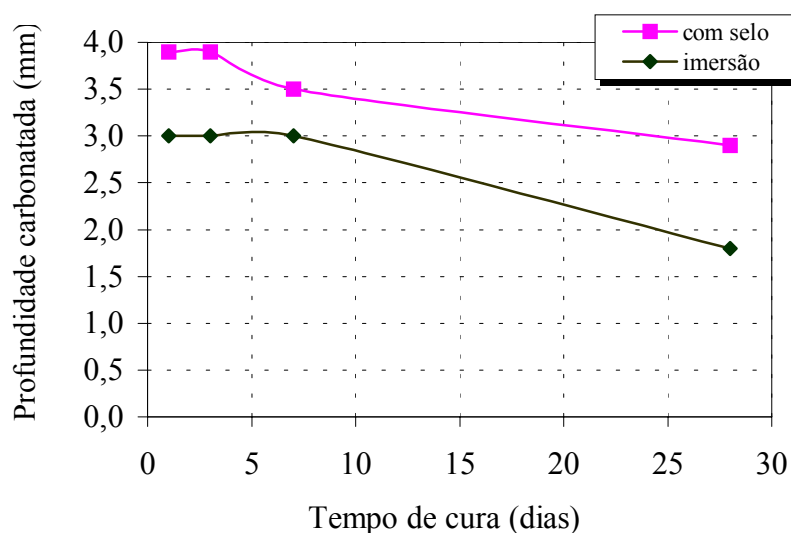


FIGURA 4.26 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias do concreto com 300 kg/m³ de CP I - S 32 em função da duração e da condição de cura.

A profundidade carbonatada pode ser também relacionada a outros parâmetros como o tipo e dosagem do cimento (figura 4.27).

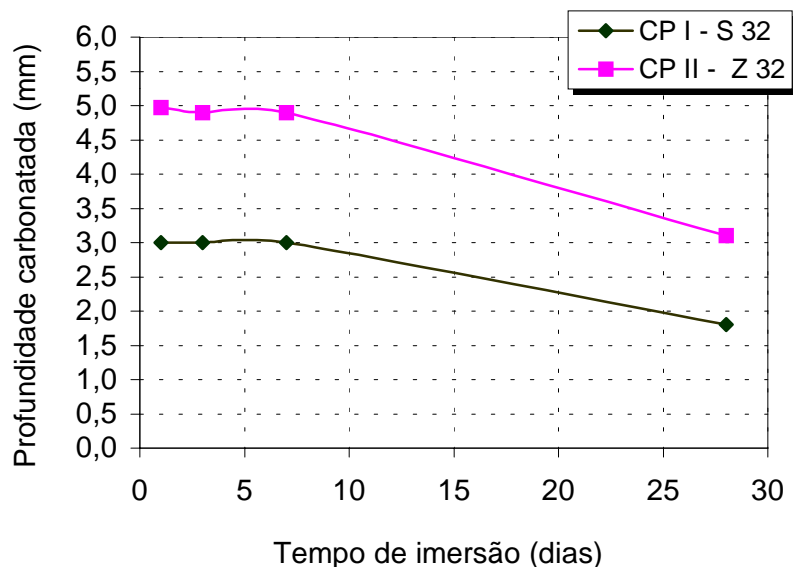


FIGURA 4.27 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias do concreto com 300 kg/m³ de CP I – S 32 e CP II – Z 32 em função da duração da cura imersa.

Os resultados obtidos para a profundidade de carbonatação aos 120 dias de concretos com mesma dosagem (300 kg/m³), mas de diferentes cimentos (CP II – Z 32 e CP I – S 32) demonstram que a profundidade carbonatada do cimento composto com cinza volante é mais elevada que a do cimento comum com adições. Isso porque há, aproximadamente, somente 255 kg /m³ de clínquer (15 % é substituição) ou porque a reação pozolânica reduziu o teor de CH.

4.2.2.2 CARBONATAÇÃO RELACIONADA À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As figuras 4.28 e 4.29 relacionam a profundidade de carbonatação com a resistência à compressão do concreto, com duas dosagens em cimento do CP I – S e do CP II – Z, respectivamente, na idade de 120 dias, para as duas formas de cura.

Para as dosagens mais ricas, 400 kg/m³ do CP – I (figura 4.28), constatou-se que não houve carbonatação nos concretos submetidos a 28, 7, ou mesmo 3 dias de cura, tanto para o processo de imersão como com lacre, ou seja, aos 120 dias de idade, a profundidade de carbonatação do concreto executado com alto percentual em cimento não é identificada pela solução de fenolftaleína.

A carbonatação do concreto com CP II - Z (figura 4.29) indica que a profundidade de carbonatação está diretamente relacionada com o tempo de cura desse cimento, seja na imersão ou com o lacre, sendo que, até para as dosagens mais ricas, períodos mais longos de cura contribuem significativamente para a diminuição da carbonatação.

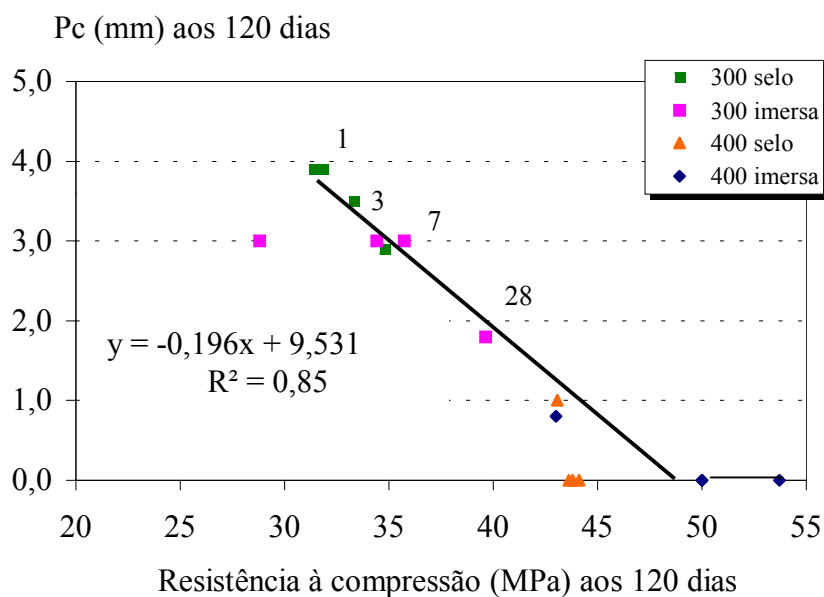


FIGURA 4.28 – Correlação da profundidade de carbonatação aos 120 dias com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m³ de CP I – S 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.

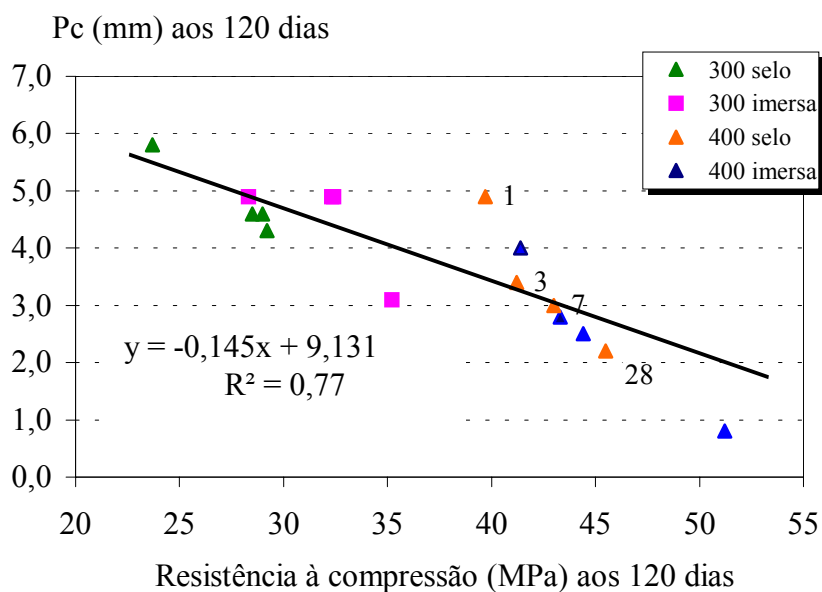


FIGURA 4.29 - Correlação da profundidade de carbonatação aos 120 dias com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m³ de CP II - Z 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada

Através do modelo de regressão pode-se afirmar que os diferentes valores da resistência à compressão considerados nas figuras 4.28 e 4.29, implicam em 85 % (CP I – S) e 77 % (CP II – Z) na variabilidade da profundidade carbonatada do concreto.

Dessa forma, verifica-se que a resistência à compressão aos 120 dias de 35 MPa corresponde à profundidade carbonatada de 2,6 mm para o concreto com CP I - S e de 4,1 mm para o CP II – Z. Assim, um aumento de 29 % na resistência à compressão aos

120 dias de 35 MPa para 45 MPa acarreta uma redução de aproximadamente 73 % na profundidade carbonatada do CP I (de 2,6 mm para 0,7 mm) e de 36 % (4,1 mm para 2,6 mm) do CP II - Z.

4.2.2.3 PROFUNDIDADE CARBONATADA RELACIONADA À PERDA DE MASSA

As figuras 4.30 e 4.31 que relacionam os resultados dos ensaios de carbonatação e da perda de massa para os concretos confeccionados com os dois tipos de cimento, na idade de 120 dias, mostram que também existe boa proporcionalidade entre essas duas grandezas.

Logo, através do modelo de regressão, a variabilidade da profundidade carbonatada pode ser explicada em 91 % (CP I – S) e 74 % (CP II – Z), pelos diferentes valores da perda de massa aparente considerados.

Assim, pode-se estimar que um concreto que, aos 120 dias, apresenta 2,0 % de perda de massa aparente, terá 3,6 mm de profundidade carbonatada quando confeccionado com CP I – S e 3,4 mm com o CP II – Z.

Constata-se que uma redução de 25 % na perda de massa aparente, de 2,0 % para 1,5 %, aos 120 dias, acarreta uma redução de 50 % na profundidade carbonatada do CP I – S (de 3,6 mm para 1,8 mm) e de 30 % do CP II – Z (de 3,4 mm para 2,4 mm).

Porém, é importante ressaltar que 2,0 % de perda de massa corresponde à resistência de 30 MPa do CP I – S e de 40 MPa do CP – II – Z.

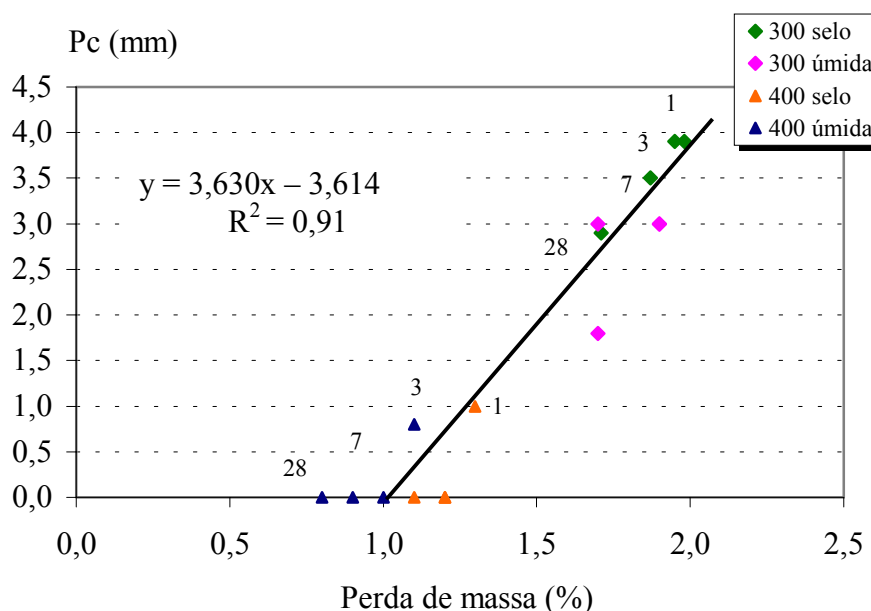


FIGURA 4.30 – Correlação da profundidade carbonatada aos 120 dias com a perda de massa aparente aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m³ de CP I – S para as curas imersa e selada de 1, 3, 7 e 28 dias.

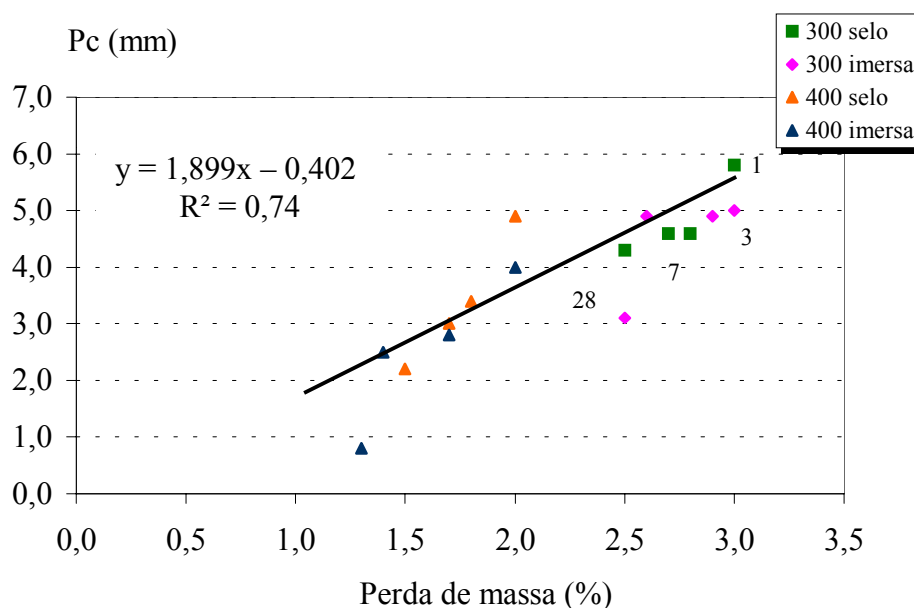


FIGURA 4.31 - Correlação da profundidade carbonatada aos 120 dias com a perda de massa aparente aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m³ de CP II – Z 32 para as curas imersa e selada de 1, 3, 7 e 28 dias.

A correlação da profundidade carbonatada com a perda de massa aparente permite assegurar as correlações já observadas desses dois parâmetros do concreto com a resistência à compressão aos 120 dias. Demonstra-se, como exemplo, que para a resistência de 35 MPa os valores correspondentes de 1,7 % versus 2,6 mm e de 2,3 % versus 4,1 mm da perda de massa aparente e da profundidade carbonatada, do CP I – S e do CP II – Z, respectivamente, estão também correlacionados.

DIAFAT (1996), através de resultados obtidos semelhantes aos deste trabalho, coloca em evidência que a relação entre a perda de massa e a profundidade carbonatada depende do tipo de cimento e conclui que a perda de massa pode ser um indicador interessante para a durabilidade do concreto.

4.2.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Em relação à durabilidade do concreto a zona essencial é a que se situa na superfície, pois é nessa camada periférica que os poros capilares maiores estão concentrados. O ensaio de absorção de água por capilaridade permite seguir a evolução do diâmetro médio dos poros capilares.

4.2.3.1 INFLUÊNCIA DA CURA

As figuras 4.32 e 4.33 apresentam a cinética de absorção de água por capilaridade aos 120 dias dos concretos com 300 kg/m³ do CP I – S 32 e do CP II – Z 32 com cura imersa em função da raiz quadrada do tempo. As curvas resultantes do ensaio de absorção de água por capilaridade permitem demonstrar os efeitos benéficos de uma cura prolongada, sobretudo em função da dosagem e do tipo do cimento. As tendências da cinética de absorção de água por capilaridade aos 120 dias, com dosagem de 400

kg/m³ para as mesmas condições, estão no anexo 1 e as tabelas de resultados estão no anexo 2.

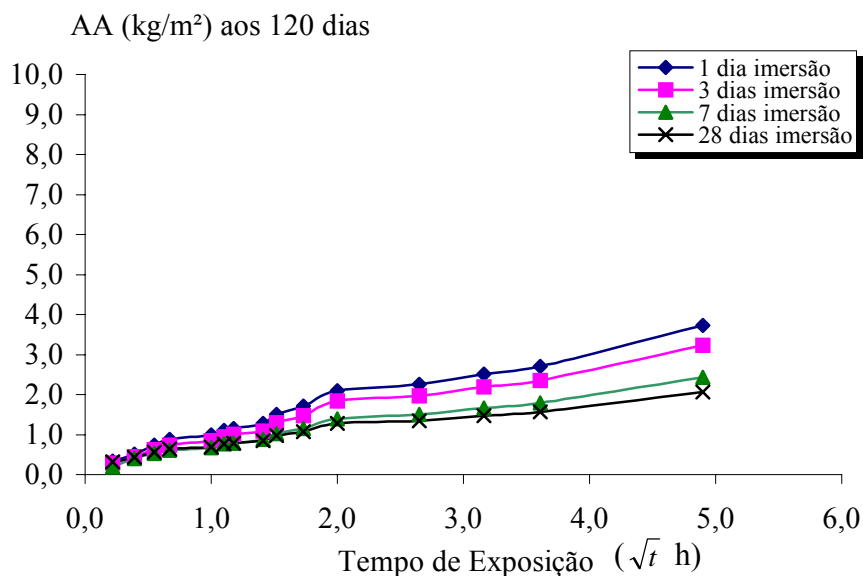


FIGURA 4.32 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 300 kg/m³ do CP I – S 32 e cura imersa em função da raiz quadrada do tempo.

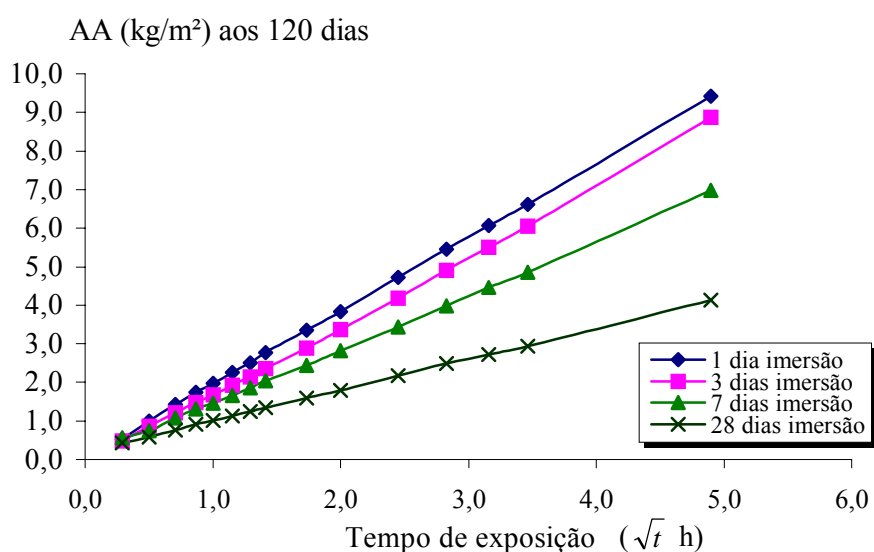


FIGURA 4.33 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 300 kg/m³ do CP II – Z 32 e cura imersa em função da raiz quadrada do tempo.

A absorção de água por capilaridade é sempre maior para os períodos de cura mais curtos e a cura imersa é mais importante para o cimento composto com menor dosagem em cimento, tendo em vista a significativa diferença na quantidade de água absorvida entre os concretos com CP I – S 32 e CP II – Z 32 (figura 4.34).

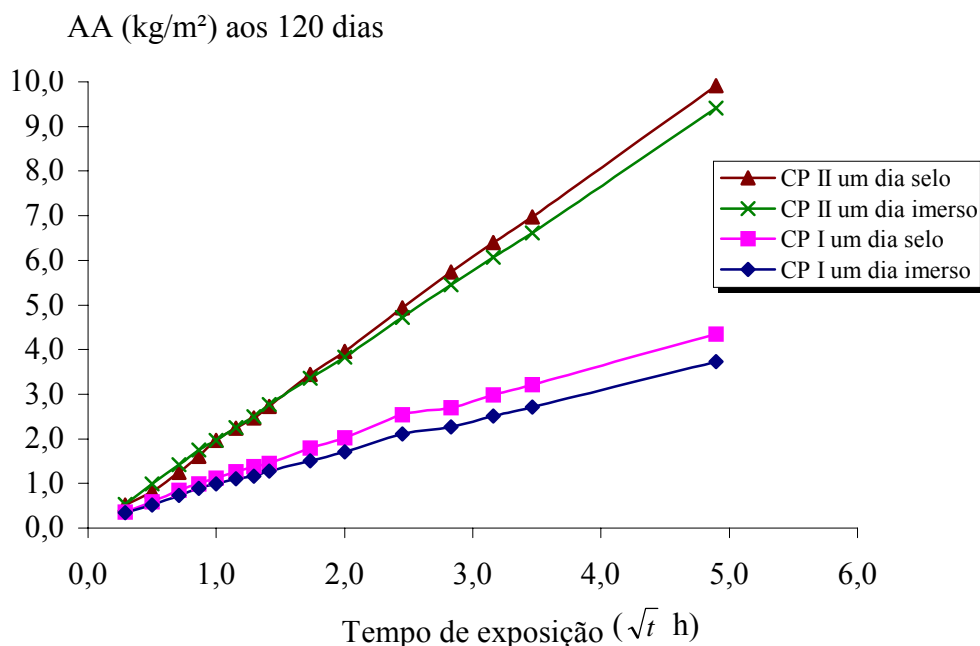


FIGURA 4.34 - Influência da cura na absorção de água por capilaridade aos 120 dias dos concretos com dosagem de 300 kg/m³ de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para um dia de duração da cura imersa e selada.

4.2.3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE RELACIONADA À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As figuras 4.35 e 4.36 permitem visualizar a relação existente entre a absorção de água por capilaridade, em 1 hora, e a resistência à compressão para diferentes condições de cura e dosagens em cimento, para os concretos com CP I – S 32 e CP II – Z 32, aos 120 dias de idade.

Observa-se que as dosagens menos ricas em cimentos (300 kg/m³) são as mais afetadas na dessecação precoce. Pode-se esperar reduções de até 35 % (CP I) e 50 % (CP II) na absorção capilar quando a cura (imersa ou selada) é prolongada de 1 para 28 dias.

Outra observação interessante em relação aos resultados é que, embora as resistências obtidas aos 3 e 7 dias (para todos os concretos) sejam semelhantes, o mesmo não ocorre em relação à porosidade capilar, que é sempre maior quanto menor é o tempo de cura. Enquanto que 7 dias de cura imersa é suficiente para obter uma porosidade capilar igual à obtida com 28 dias de cura imersa, constata-se que reduzindo a cura de 7 para 3 dias, a porosidade capilar tem um acréscimo em torno de 27 %.

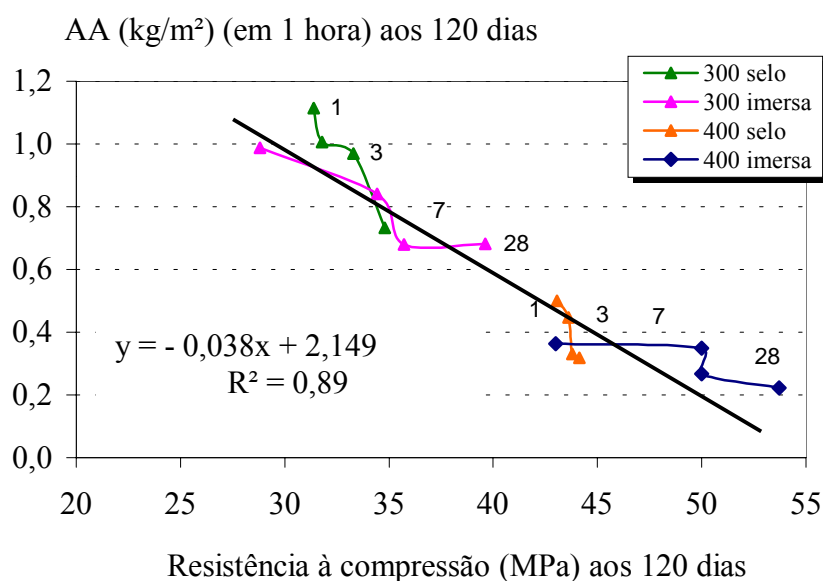


FIGURA 4.35 - Correlação da quantidade de água absorvida, em uma hora, aos 120 dias com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m³ de CP I – S 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias das curas imersa e selada.

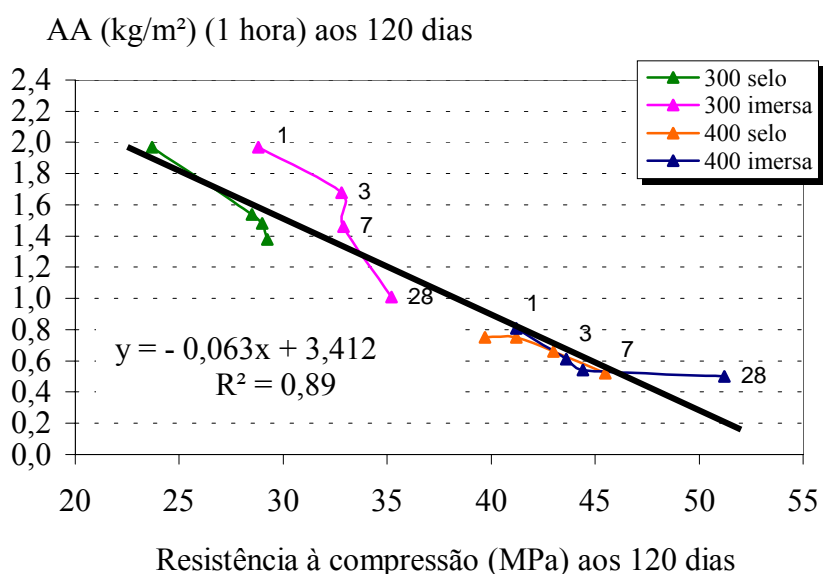


FIGURA 4.36 - Correlação da quantidade de água absorvida, em uma hora, aos 120 dias com a resistência à compressão aos 120 dias do concreto com 300 e 400 kg/m³ de CP II – Z 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias das curas imersa e selada.

Através do modelo de regressão, a variabilidade da absorção de água por capilaridade do CP I – S e do CP II – Z pode ser explicada em 89 % pelos valores da resistência à compressão aos 120 dias.

Assim, verifica-se que a resistência à compressão aos 120 dias de 35 MPa corresponde à absorção de água por capilaridade (em 1 hora) de 0,8 kg/m² para o concreto com CP I – S e de 1,2 kg/m² com CP II – Z. É possível verificar, ainda, que um aumento de 29 % na resistência à compressão de 35 MPa para 45 MPa acarreta uma redução de

aproximadamente 50 % na absorção de água por capilaridade do CP I e do CP II (de 0,8 kg/m² para 0,4 kg/m² e de 1,2 kg/m² para 0,6 kg/m²).

A tabela 4.2 correlaciona alguns valores das absorções de água por capilaridade, extraídos das retas das tendências (figura 4.35 e 4.36), com a resistência à compressão.

TABELA 4.2 – Correlação da resistência à compressão com a absorção de água por capilaridade do concreto.

Resistência à compressão aos 120 dias (MPa)	Absorção de água por capilaridade em uma hora aos 120 dias (kg/m ²)	
	CP I - S 32	CP II - Z 32
30	1,0	1,5
35	0,8	1,2
40	0,6	0,9
45	0,4	0,6
50	0,3	0,3

Os valores (tabela 4.2) mostram que para especificar concretos com diferentes tipos de cimento, quando a absorção de água por capilaridade é usada como parâmetro de durabilidade, esse deve ser formulado de outra maneira em relação à dosagem de aglomerante e água, principalmente para relação a/c elevada, ou seja, baixa dosagem em aglomerante. A tabela 4.2 registra que dois concretos com a mesma resistência à compressão aos 120 dias terão durabilidades diferentes (medida pela absorção de água por capilaridade) para cimentos diferentes.

Por exemplo, ao especificar uma absorção capilar de 1 kg/m², aos 120 dias, será necessário formular um concreto de 30 MPa usando CP I – S 32 ou de aproximadamente 40 MPa usando CP II – Z 32.

Para a resistência à compressão de 40 MPa corresponde uma absorção de água por capilaridade de 0,6 kg/m² do CP I S- 32 e de 0,9 kg/m² do CP II – Z 32, o equivalente a uma diferença de 50 % em relação ao CP I – S 32. No entanto, observa-se também que as diferenças no parâmetro de durabilidade do concreto, para cimentos diferentes, se atenuam quando a relação a/c é baixa (resistência alta). Por exemplo, para uma absorção por capilaridade de 0,3 kg/m² a resistência correspondente é de 50 MPa para ambos os cimentos.

A figura 4.37 mostra que também se pode estabelecer interações de absorção de água por capilaridade, em uma hora, aos 120 dias e resistência do concreto ao final de cura. DIAFAT, (1996) constatou o mesmo tipo de relação para concretos com 90 e 360 dias de idade.

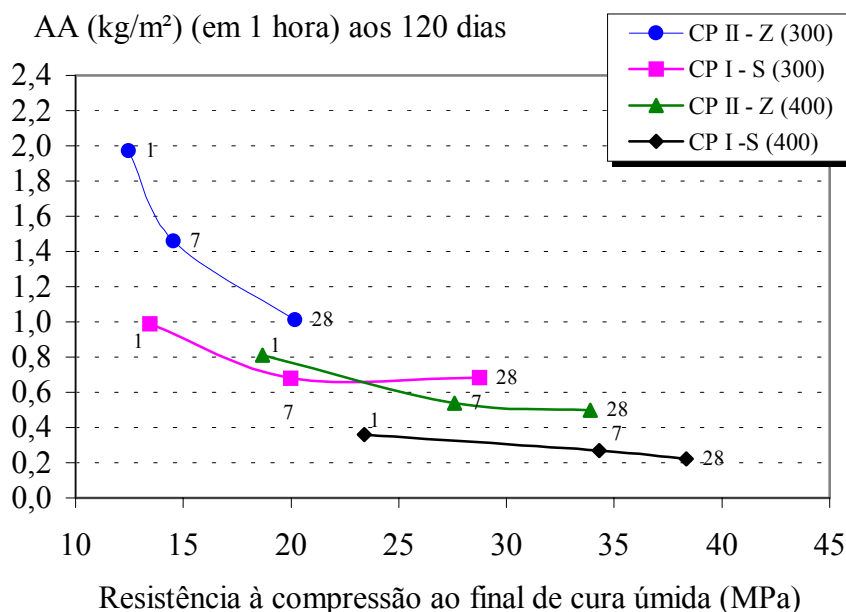


FIGURA 4.37 – Absorção de água por capilaridade, em uma hora, aos 120 dias dos concretos em função da resistência à compressão ao final de cura imersa de 1, 7 e 28 dias para dois tipos e duas dosagem de cimento.

BALAYSSAC (1992) e DIAFAT (1996) demonstraram em suas pesquisas que a resistência à compressão ao final de cura estabelece interações significativas com a absorção de água por capilaridade e com a profundidade carbonatada semelhantes às deste trabalho e, por isso, permite prever e controlar a durabilidade do concreto. Além disso, comprovaram que essa resistência do concreto agrega as interações da dosagem do cimento e da duração da cura.

4.2.3.3 RELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA E A PERDA DE MASSA

As figuras 4.38 e 4.39 permitem visualizar a relação existente entre a absorção de água por capilaridade em 1 hora e a perda de massa aparente do concreto com CP I – S 32 para diferentes condições de cura e dosagens em cimento, aos 120 dias de idade. Os resultados mostram que existe semelhança nas tendências apresentadas para o concreto confeccionado com o CP I e com o CP II.

Como esperado, verifica-se que é estabelecida uma relação tipicamente linear entre a absorção de água e a perda de massa. Esse resultado mostra diretamente a importância da dessecação sobre a característica da durabilidade de um concreto. O ensaio de perda de massa pode ser um elemento tão importante quanto à absorção capilar nas previsões e diagnósticos de avaliação da durabilidade dos concretos.

O modelo de regressão explica em 94 % (CP I – S e CP II –Z) a variabilidade da perda de massa aparente do concreto pelos diferentes valores considerados da absorção de água por capilaridade.

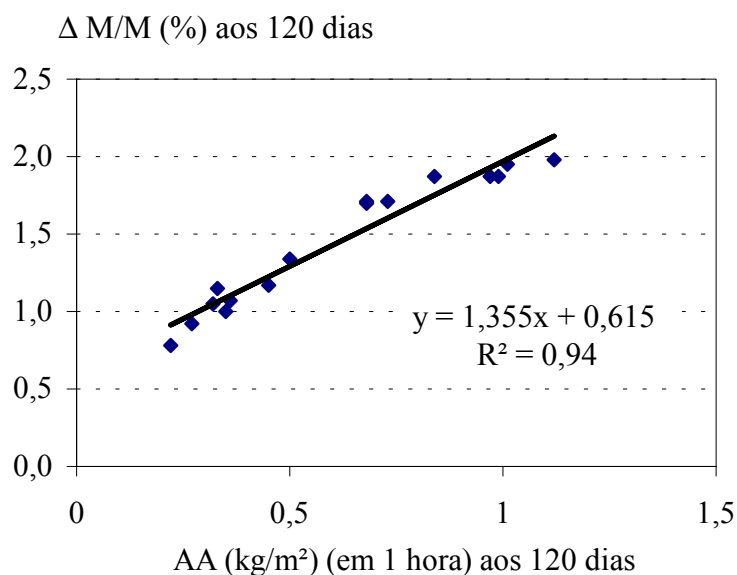


FIGURA 4.38 - Correlação da absorção de água por capilaridade (em uma hora) com a perda de massa aparente do concreto com 120 dias, com 300 e 400 kg/m³ de CP I – S 32 e com durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.

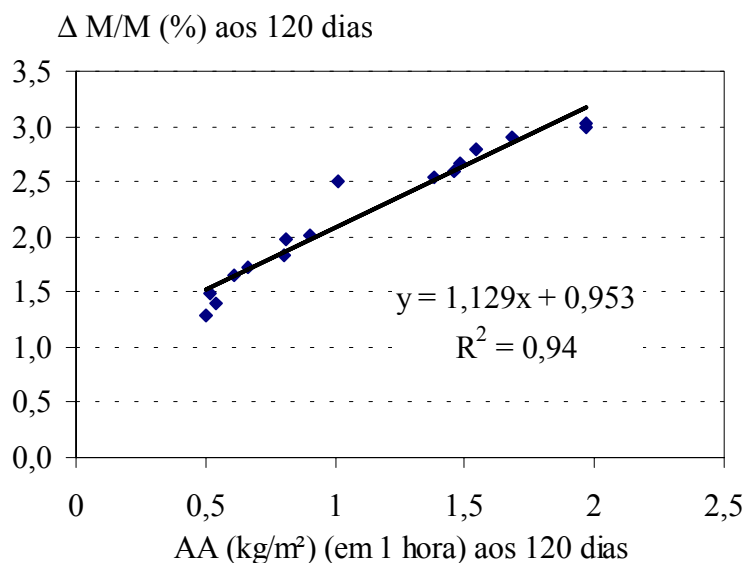


FIGURA 4.39 - Correlação da absorção de água por capilaridade (em uma hora) com a perda de massa aparente do concreto com 120 dias, com 300 e 400 kg/m³ de CP II – Z 32 e com durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.

A correlação da perda de massa aparente com a absorção de água por capilaridade permite assegurar as correlações já observadas desses dois parâmetros do concreto com a resistência à compressão aos 120 dias. Demonstra-se, como exemplo, que para a resistência de 35 MPa os valores correspondentes de 0,8 kg/m² versus 1,7 % e de 1,2 kg/m² versus 2,3 % da absorção de água por capilaridade e da perda de massa aparente, do CP I – S e do CP II – Z, respectivamente, estão também correlacionados.

4.2.3.4 RELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA CAPILAR E CARBONATAÇÃO

As figuras 4.40 e 4.41 que relacionam os resultados dos ensaios de carbonatação e de absorção de água na idade de 120 dias mostram que existe semelhança nas tendências apresentadas, tanto para o concreto confeccionado com o CP I como com o CP II.

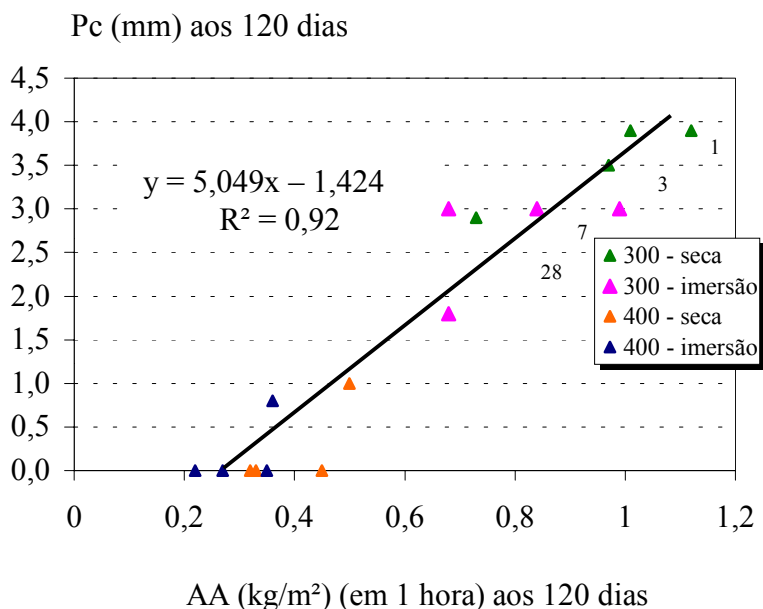


FIGURA 4.40– Correlação da profundidade carbonatada com a absorção de água por capilaridade (em uma hora) do concreto com 120 dias de idade e duas dosagens do CP I – S 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.

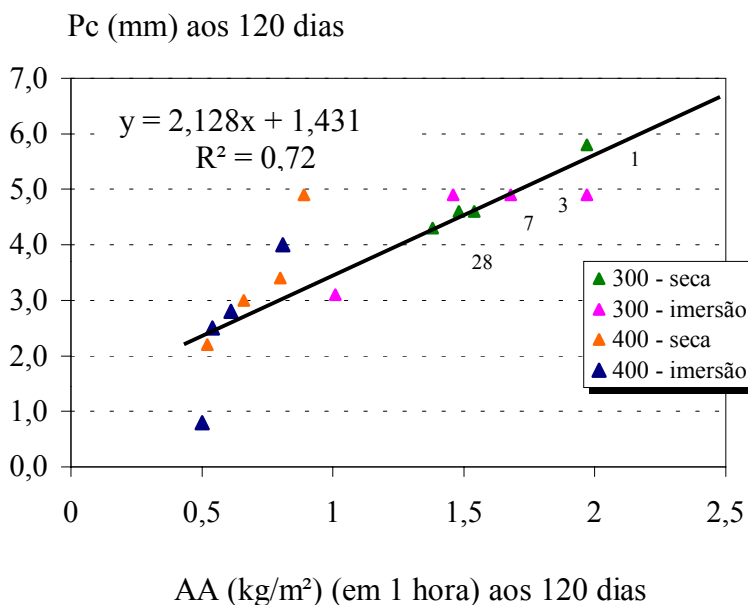


FIGURA 4.41 - Correlação da profundidade carbonatada com a absorção de água por capilaridade (em uma hora) do concreto com 120 dias de idade e duas dosagens do CP II – Z 32 para durações de 1, 3, 7 e 28 dias de cura imersa e selada.

Logo, o modelo de regressão explica em 92 % (CP I – S) e 72 % (CP II –Z) a variabilidade da profundidade carbonatada pelos diferentes valores da absorção de água capilar considerados.

Verificam-se relações lineares típicas entre a absorção de água por capilaridade em uma hora e a profundidade carbonatada. Portanto, o ensaio de absorção de água, que permite caracterizar a dimensão dos poros capilares maiores, pode ser utilizado como um meio eficaz para diagnosticar a durabilidade de um concreto em relação à carbonatação.

DIAFAT (1996) apresenta resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho no que se refere às interações de absorção de água por capilaridade em uma hora e a profundidade carbonatada, com concretos nas idades de 90 e 360 dias. Concluí que a existência de proporcionalidade entre esses dois parâmetros evidencia que o ensaio de absorção de água por capilaridade em uma hora (absorção inicial) pode ser o melhor indicador da durabilidade do concreto porque engloba todos os demais parâmetros como: a dosagem de cimento, a duração da cura e a resistência à compressão do concreto.

Os valores estimados da absorção de água por capilaridade, da perda de massa aparente e da profundidade carbonatada correlacionados com a resistência à compressão do concreto aos 120 dias estão na tabela 4.3.

TABELA 4.3 - Resistência à compressão e as características de qualidade do concreto.

Tipo de cimento	CP I -S		CP II -Z	
Resistência à compressão aos 120 dias (MPa)	35	45	35	45
Absorção por capilaridade em 1 hora aos 120 dias (kg/m²)	0,8	0,4	1,2	0,6
Perda de massa aparente aos 120 dias (%)	1,7	1,2	2,3	1,6
Profundidade carbonatada aos 120 dias (mm)	2,6	0,7	4,1	2,7

Portanto, evidencia-se na análise dos resultados que o tipo do cimento é fator preponderante e interfere diretamente no comportamento do concreto. Para estimar a durabilidade é necessário conhecer o comportamento dos componentes das fases do cimento. O cimento pozolânico com suas reações tardias tem sua microestrutura e sua rede porosa mais suscetível aos efeitos de uma cura prolongada, sobretudo para baixas dosagens em cimento.

4.2.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A figura 4.42 é a representação gráfica da análise térmica, aos 120 dias, de uma amostra da pele do concreto (do CP – II Z 32 com 300 kg/m³) submetido à condição de cura com selo, por 28 dias. A figura 4.43 representa o miolo desse mesmo concreto.

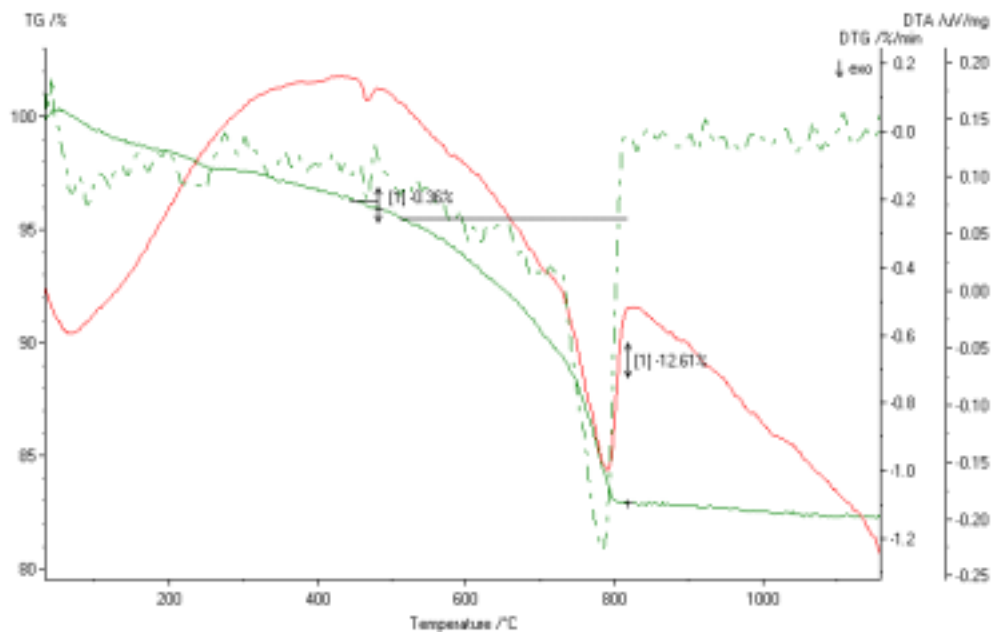


FIGURA 4.42 – Curva de caracterização das perdas de massa aos 120 dias da pele do concreto com 300 kg/m² de CP II – Z 32 para 28 dias de cura com selo.

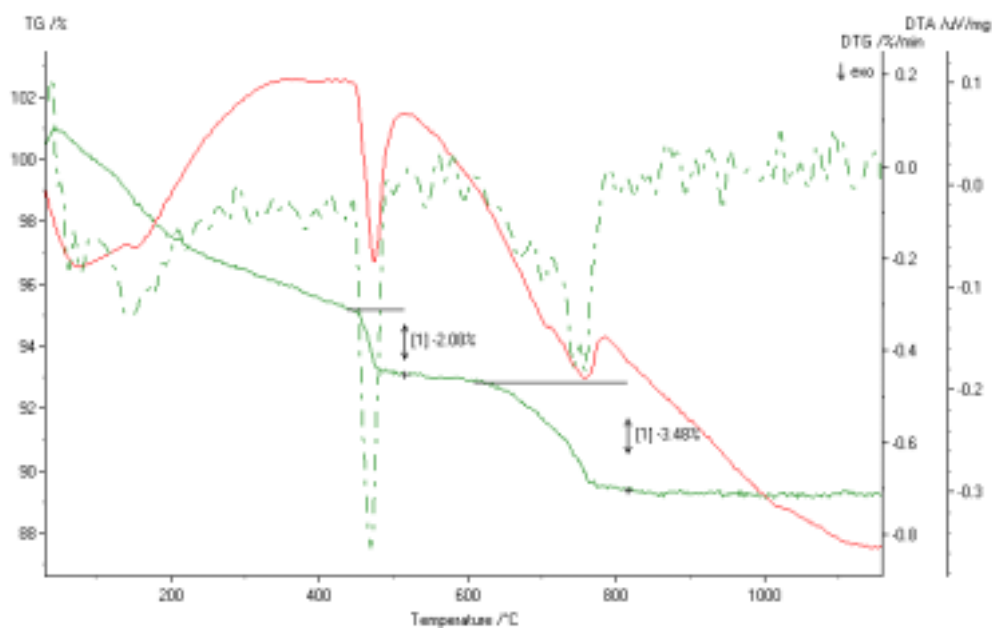


FIGURA 4.43 - Curva de caracterização das perdas de massa aos 120 dias do miolo do concreto com 300 kg/m² de CP II – Z 32 para 28 dias de cura com selo.

Assim, através das ilustrações (figuras 4.42 e 4.43) podem-se comparar as quantidades de carbonatação existente na pele (12,6 %) e no miolo (3,5 %) do concreto.

A tabela 4.4 fornece os resultados numéricos das análises termogravimétricas do CP I - S 32 e do CP II - Z 32, dosados com 300 kg/m³. Os resultados numéricos para 400 kg/m³ estão apresentados no anexo 2.

TABELA 4.4 - Perdas de massa dos concretos com CP I – S 32 e CP II Z 32 na análise termogravimétrica.

Dosagem 300 kg/m ²		Condição de cura											
		Imersão						Selada					
Perda de massa aos 120 dias (%)	Amostra	Miolo			Pele			Miolo			Pele		
		Dias de cura											
		28	3	1	28	3	1	28	3	1	28	3	1
		CPI – S 32	Água ligada	9,0	8,0	7,6	6,0	5,1	4,8	8,4	7,8	7,6	5,9
CaOH ₂	2,8		2,5	2,6	1,5	0,8	0,9	2,8	2,8	2,8	1,0	0,6	0,5
CaCO ₃	2,1		1,5	2,0	8,5	11,0	8,9	2,0	2,0	2,1	10,7	10,9	11,0
CPII – Z 32	Água ligada	7,6	7,2	6,4	4,9	4,3	3,3	7,6	7,1	6,1	4,7	4,6	3,9
	CaOH ₂	2,3	2,4	2,0	0,8	0,2	0,0	2,1	2,3	2,2	0,4	0,5	0,4
	CaCO ₃	3,7	3,9	4,0	11,7	14,7	12,8	3,5	3,5	3,6	12,6	13,1	12,3

Através dos resultados da análise termogravimétrica pode-se estabelecer comparações entre os concretos, com as seguintes interpretações:

- maior tempo de cura reverte em maior perda de massa até 550 °C, possivelmente uma maior porcentagem de água ligada, seja na pele ou no miolo do concreto, com CP I ou CP II;
- maior dosagem em cimento (300 kg/m³ com o CP I equivalem, efetivamente, a 285 kg/m³, e com o CP II, a 255 kg/m³) se traduz em maior porcentagem de água ligada;
- não foram observadas diferenças significativas para cura imersa e selada, nesse caso, acredita-se que o problema foi devido à espessura muito fina das amostras das camadas da pele do concreto e, nas camadas mais profundas (denominadas miolo, seio ou coração do concreto), os danos das condições da cura inadequada não são perceptíveis;

- d) no miolo do concreto não há variação de quantidade de carbonato em função do tempo de cura mostrando que esse concreto permanece protegido quaisquer que sejam as condições de conservação;
- e) a quantidade de água ligada na pele é inferior em relação ao miolo do concreto, mostrando menor grau de hidratação;
- f) no miolo do CP II – Z há menor quantidade de CH devido ao consumo do CH pela pozolana ou pelo fato que há menor quantidade de cimento (clínquer).

Os valores de água ligada obtidos por análise termogravimétrica no miolo do concreto com CP I –S e CP II –Z foram plotados em gráficos para visualização da sua interação com as demais características (resistência à compressão, perda de massa aparente, absorção de água por capilaridade e profundidade carbonatada) nas figuras 4.44, 4.45, 4.46 e 4.47.

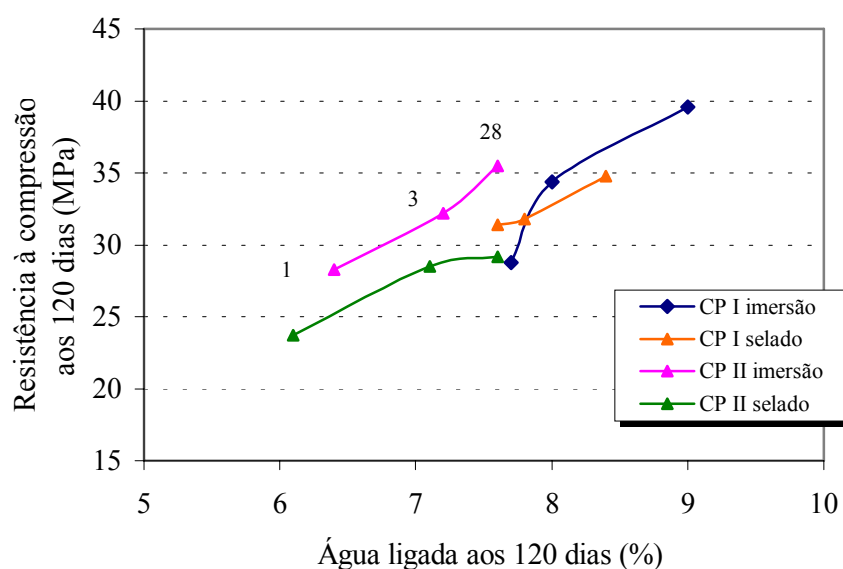


FIGURA 4.44 – Relação entre resistência à compressão e água ligada do miolo do concreto aos 120 dias com 300 kg/m^2 de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para 1, 3 e 28 dias de cura imersa e selo.

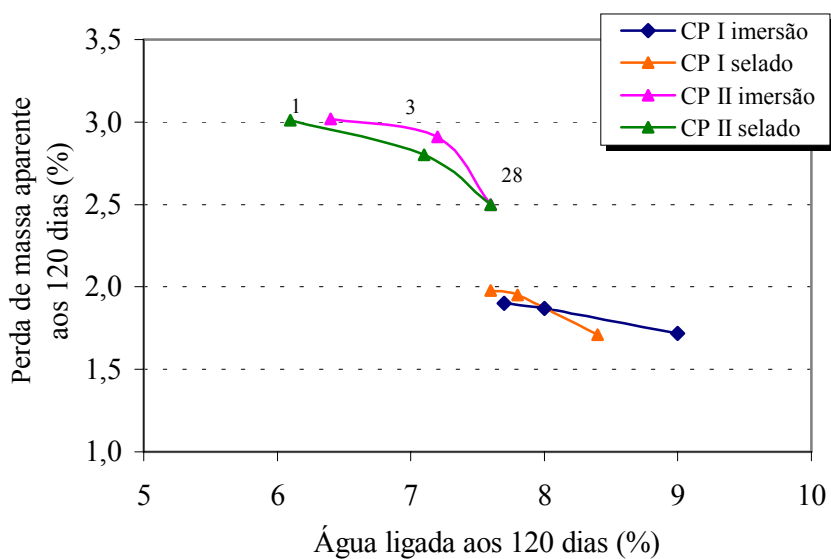


FIGURA 4.45 – Relação entre perda de massa aparente e água ligada do miolo do concreto aos 120 dias com 300 kg/m^2 de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para 1, 3 e 28 dias de cura imersa e selo.

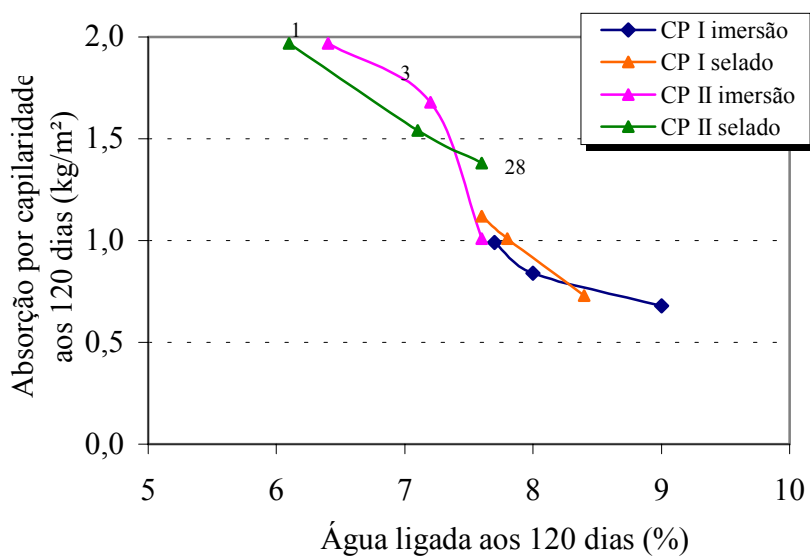


FIGURA 4.46 – Relação entre absorção de água por capilaridade e água ligada do miolo do concreto aos 120 dias com 300 kg/m^2 de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para 1, 3 e 28 dias de cura imersa e selo.

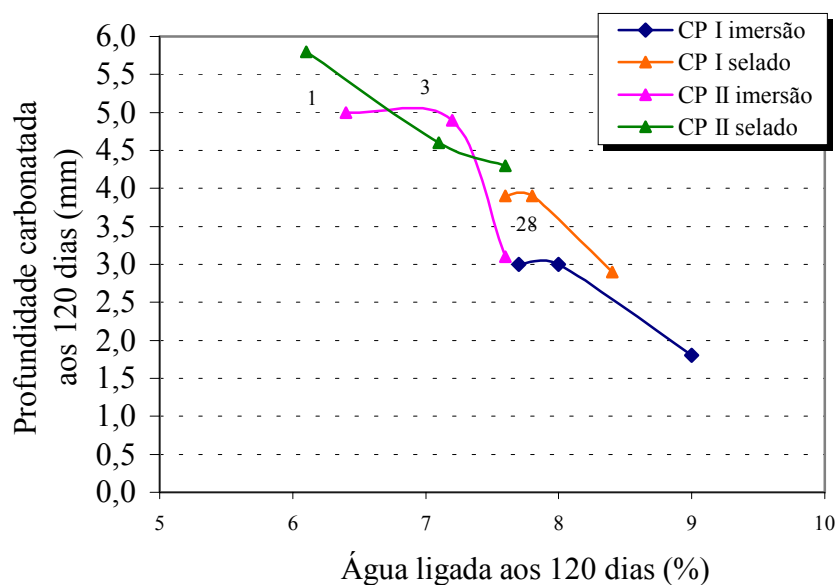


FIGURA 4.47 – Relação entre profundidade carbonatada e água ligada do miolo do concreto aos 120 dias com 300 kg/m² de CP I – S 32 e CP II – Z 32 para 1, 3 e 28 dias de cura imersa e selo.

Observa-se que a quantidade de água ligada aumenta com o tempo de cura e é sempre maior para o CP I – S 32, independente da condição de cura. Uma conservação mais longa na água favorece a hidratação e aumenta a quantidade dos produtos de hidratação até mesmo do miolo do concreto. A resistência à compressão aumenta com o acréscimo de água ligada, assim como as características negativas de perda de massa aparente, absorção de água por capilaridade e profundidade carbonatada, diminuem.

4.2.5 POROSIMETRIA

Este trabalho concentrou-se no estudo de poros que possuem, na sua maioria, diâmetro superior a 10 nm (poros capilares). Outros poros, como é o caso dos nanoporos (porosidade interna dos hidratos do cimento), não são abordados e não são importantes nem para o desempenho mecânico nem para a durabilidade.

Os resultados apresentados na figura 4.48 são os valores obtidos através do MIP para as amostras elaboradas com diferentes valores da dosagem em cimento. Com as curvas plotadas, as características dimensionais em relação à quantidade e tamanho dos poros dos concretos podem ser visualizadas.

Nessa investigação, todas as amostras com diferentes dosagens em cimento (300 e 400 kg/m³) apresentam poros com diâmetros entre 6 nm e 100 µm, mas em concentrações diferentes. Podemos observar na ascensão das curvas que a porosidade do concreto se concentra entre 10 nm e 1 µm, sendo que, o concreto com maior dosagem em cimento e, conseqüentemente, menor relação a/c possui a maior concentração de poros entre 10 nm e 50 nm (concreto com 400 kg/m³ do CP I tem, efetivamente, 380 kg/m³, enquanto que, do CP II tem 340 kg/m³). Por comparação, também os poros do miolo do concreto com CP I e 400 kg/m³ são mais refinados que os poros do miolo desse concreto e 300 kg/m³.

Não há evidência do refino da porosidade devido à ação pozolânica para o CP II – Z (400), comparado com o CP I – S (400).

O fato de ocorrer um cruzamento, da curva do concreto com CP I 300 (pele) com as demais curvas na faixa de aproximadamente 50 nm (figura 4.48), pode ser atribuído a uma possível “colmatação” (refinamento dos poros nesse concreto).

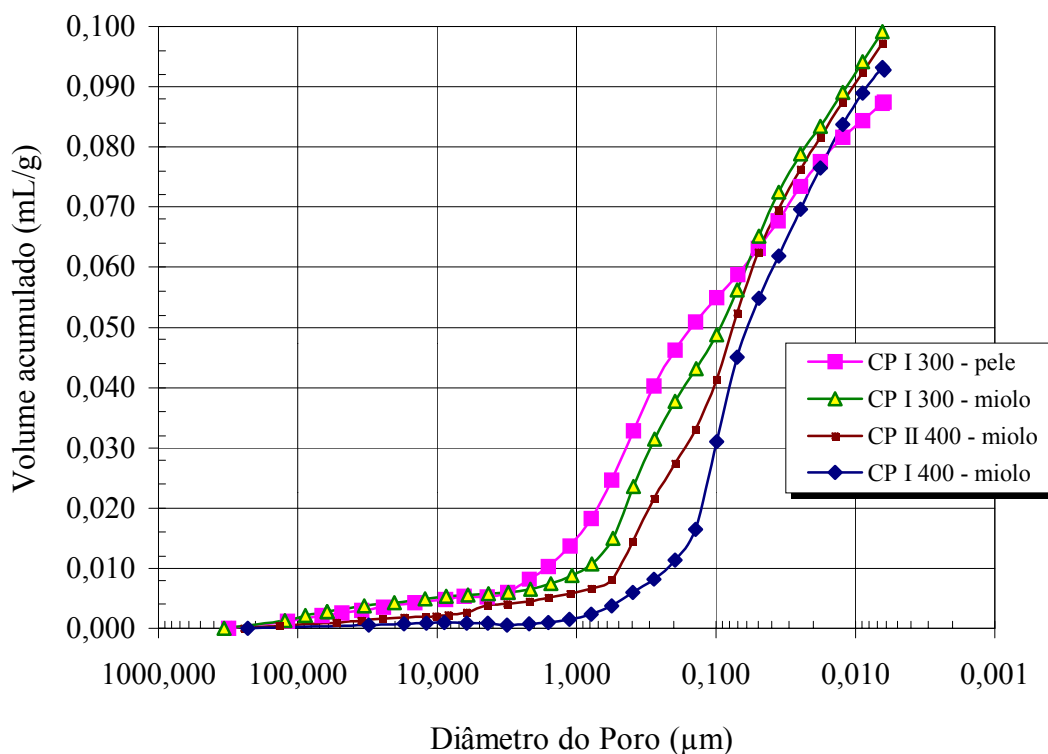


FIGURA 4.48 - Volume acumulado em função do diâmetro dos poros, aos 120 dias de idade, de amostras do miolo e da pele dos concretos, com CP II – Z 32 e CP I – S 32, submetidos a um dia de cura imersa.

A tabela 4.5 fornece as características dos concretos obtidas com o ensaio do MIP e a tabela 4.6 demonstra os intervalos de porosidade obtidos das curvas.

TABELA 4.5 - Características físicas do concreto detectadas pelo MIP.

Concreto com cura por imersão de 1 dia e (idade de 120 dias)	CP I – S 32			CP II – Z 32
	Miolo		Pele	Miolo
	300	400	300	400
Porosidade total (%)	19,6	18,4	18,2	19,9
Densidade aparente do esqueleto (sólido) (g/ml)	2,456	2,411	2,559	2,550
Densidade aparente total (g/ml)	1,974	1,967	2,091	2,042
Diâmetro médio dos poros (μm)	0,09	0,07	0,23	0,08

TABELA 4.6 - Intervalos de porosidade da pele e do miolo do concreto.

Concreto com cura por imersão de 1 dia e (idade de 120 dias)		CP I – S 32			CP II – Z 32	
		Miolo		Pele	Miolo	
		300	400	300	400	
Diâmetro dos poros	< 10 nm	Porosidade (%)	7,2	6,5	3,4	7,2
	10 nm – 50 nm-		28,2	34,4	24,2	28,9
	50 nm – 100 nm		15,2	25,8	9,2	21,6
	100 nm - 1 μm		40,3	31,1	61,5	33,0
	> 1 μm		9,1	2,2	1,7	9,3

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados permitiram, ainda, tirar certas conclusões que abrem algumas perspectivas, em particular nos diversos tipos de correlações que podem ser colocados em evidência. Numa síntese, essas correlações estabelecem como a resistência à compressão e a dosagem em cimento podem ser estimadas a partir de valores definidos para caracterizar a durabilidade.

Dessa forma, pode-se almejar um parâmetro de qualidade desejável para o concreto como, por exemplo, uma profundidade máxima de carbonatação (P_c) e correlacioná-lo com a absorção de água por capilaridade (AA). A absorção capilar em uma hora é um indicador importante da durabilidade em relação à carbonatação, pois a correlação desses dois ensaios mostra que existe uma relação linear.

Tomando-se, como exemplo, as profundidades carbonatadas de 3,0; 5,0 e 5,5 mm, aos 120 dias, na figura 4.49, verificam-se as correspondentes absorções capilares de 0,83, 1,3 e 1,4 kg/m^2 em 1 hora, aos 120 dias, do concreto com CP I – S 32.

Na figura 4.50, verifica-se que para o concreto com CP II – Z 32 as profundidades carbonatadas de 3,0, 5,0 e 5,5 mm correspondem as absorções capilares de 0,75; 1,7 e 1,9 kg/m^2 , respectivamente.

Observa-se pelos resultados que, inicialmente, para a mesma profundidade carbonatada de 3 mm, o CP I - S pode apresentar maior absorção capilar (0,83 kg/m^2) que o CP II – Z (0,75 kg/m^2). Com isso, verifica-se que para profundidades carbonatadas iguais, concretos com cimentos diferentes têm absorções capilares diferente. Entretanto, nesse caso, essa proporção muda à medida que a absorção capilar aumenta, sendo que o CP I – S passa a apresentar menor absorção capilar que o CP II. Portanto, esses ensaios analisados isoladamente não caracterizam a durabilidade, pois dependem, efetivamente, da quantidade real de clínquer no cimento, ou seja, do tipo de cimento.

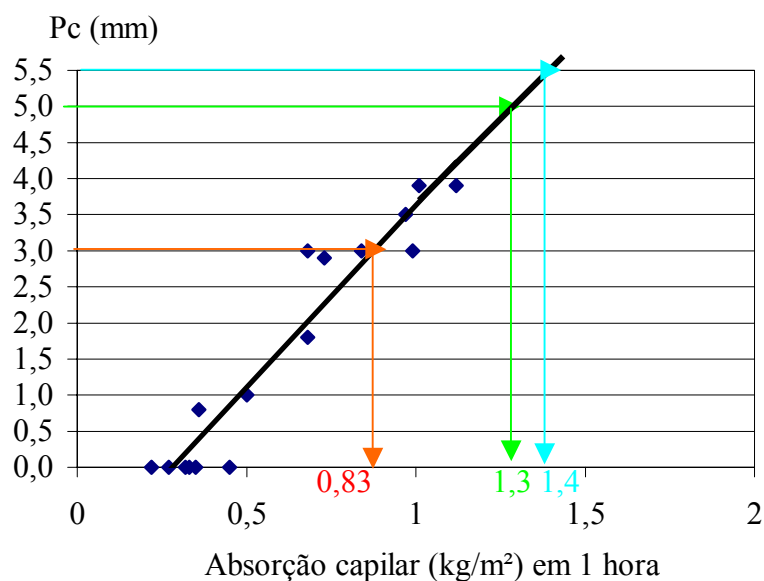


FIGURA 4.49 – Correlação da absorção capilar e da profundidade carbonatada do concreto com CP I – S 32, aos 120 dias.

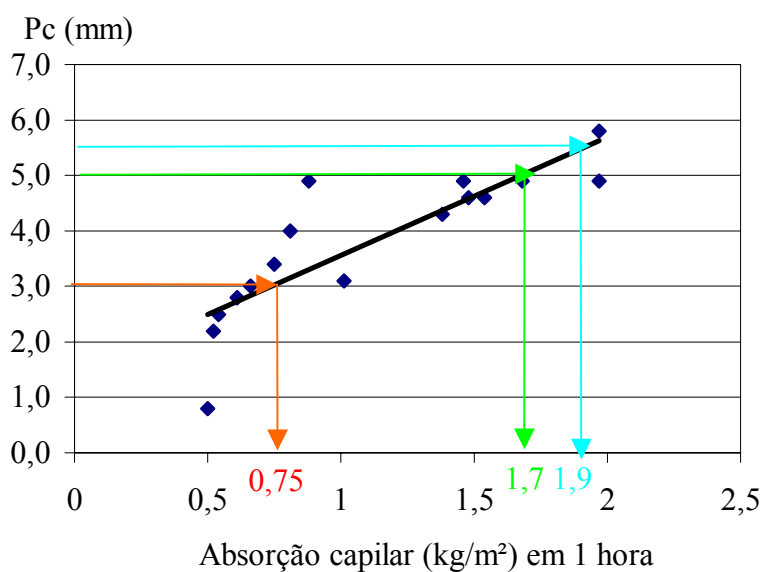


FIGURA 4.50 – Correlação da absorção capilar e a profundidade carbonatada do concreto com CP II – Z 32, aos 120 dias.

As figuras 4.51 e 4.52 indicam para qual resistência à compressão, aos 120 dias, os concretos dosados com CP I – S 32 e CP II – Z 32, respectivamente, deverão ser elaborados para satisfazer o item exigido para a durabilidade (profundidade de carbonatação igual a 3,0 mm).

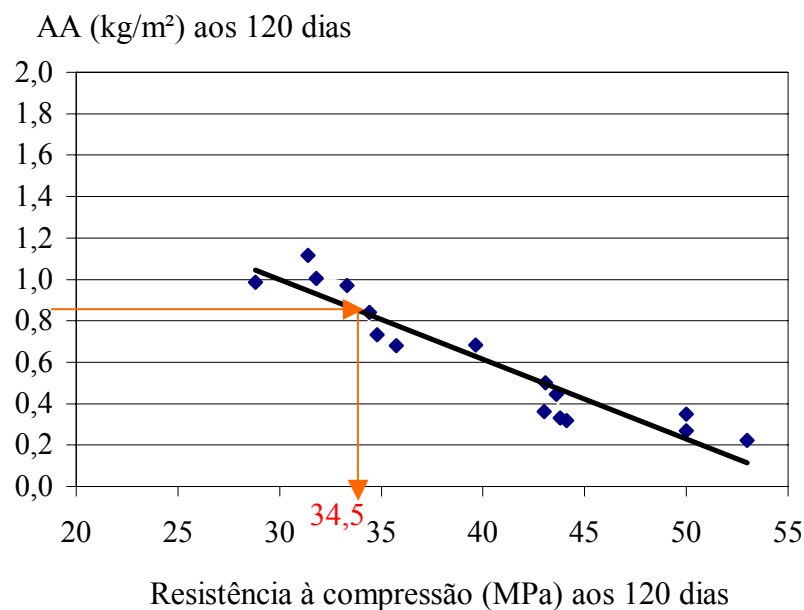


FIGURA 4.51 – Correlação da resistência à compressão e da absorção capilar do concreto com CP I – S 32.

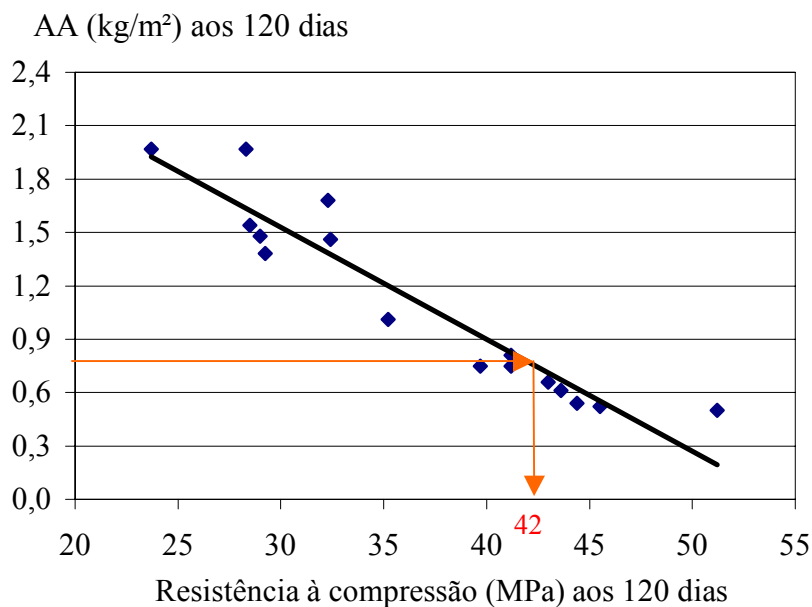


FIGURA 4.52 – Correlação da resistência à compressão e da absorção capilar do concreto com CP II – Z 32.

As correlações mostram que para o concreto elaborado com CP I – S 32, corresponde uma resistência aos 120 dias de 34,5 MPa (figura 4.51), enquanto que para o concreto elaborado com o cimento CP II – Z 32, de 42 MPa (figura 4.52). Essa diferença de eficácia ocorre devido às quantidades reais em cimento e à presença de pozolanas, cujo assunto foi longamente discutido nesse trabalho.

Nas figuras 4.53 e 4.54 podemos verificar qual dosagem em cimento e qual tempo de cura são necessários para atingir as resistências almejadas com o cimento CP I – S e CP II – Z, respectivamente.

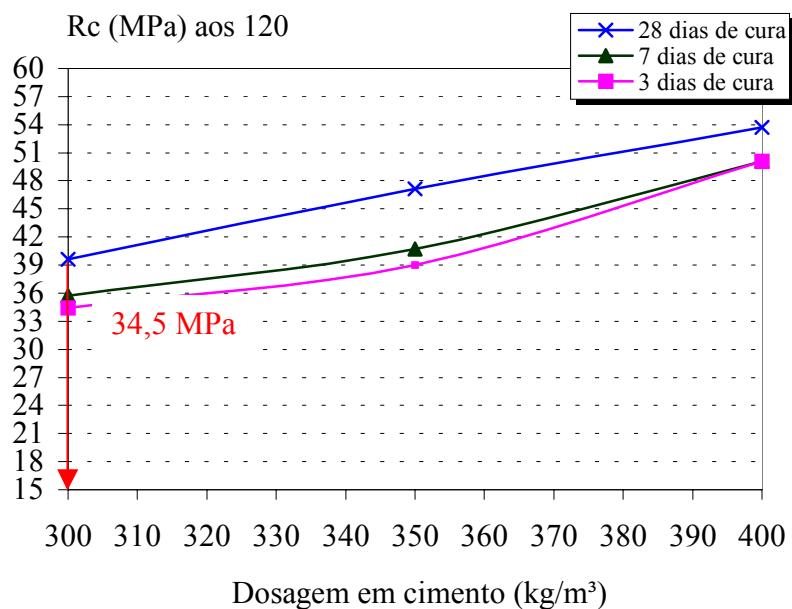


FIGURA 4.53 – Correlação da resistência à compressão e da dosagem em cimento do concreto com CP I – S 32.

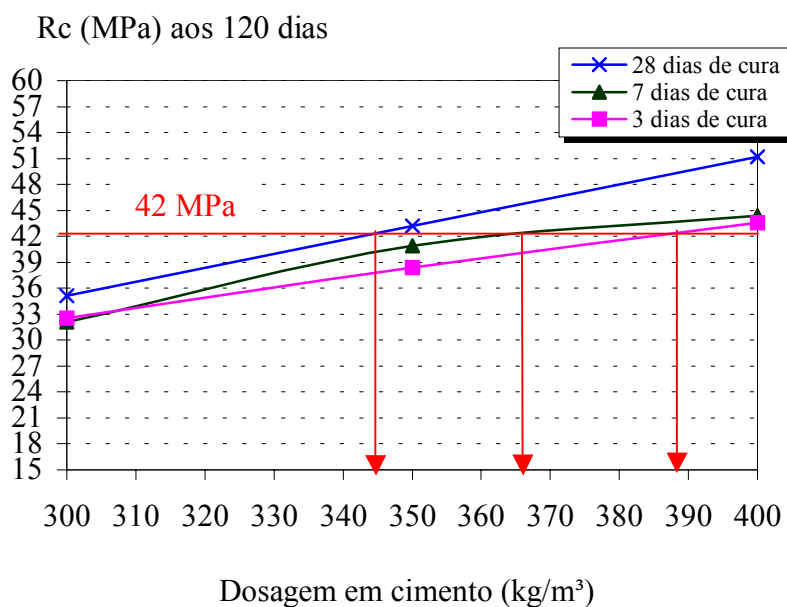


FIGURA 4.54 – Correlação da resistência à compressão e da dosagem em cimento do concreto com CP II – Z 32.

Assim, através da análise dos resultados, verifica-se que a resistência aos 120 dias almejada para o concreto com CP II – Z, de 42 MPa pode ser obtida com qualquer um dos três tempos de cura avaliados, mas com dosagem extra de 45 kg de cimento, para 3

dias de cura, ou 25 kg para 7 dias de cura, em relação aos 28 dias. Enquanto que, para o cimento CP I – S 32 (figura 4.53), 3 dias de cura imersa já são suficientes para atingir o valor da resistência (34,5 MPa) e o padrão de durabilidade almejado ($P_c = 3$ mm).

Nas figuras 4.55 e 4.56, estabelecem-se relações entre a absorção capilar e a resistência ao final de cura para possibilitar a aplicação prática dos resultados.

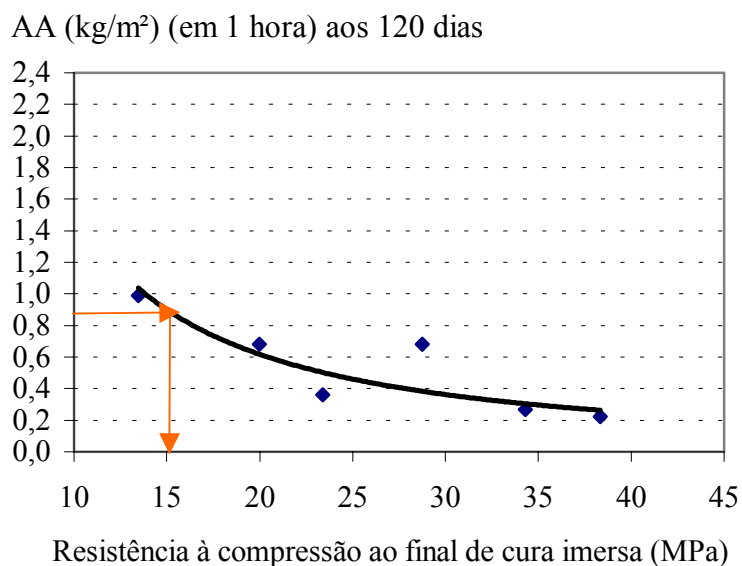


FIGURA 4.55 – Correlação da resistência à compressão ao final de cura e da absorção capilar do concreto com CP I – S 32.

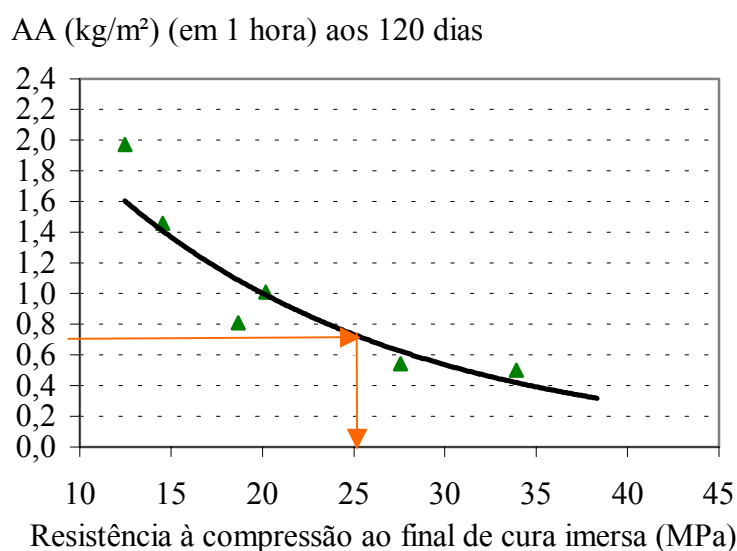


FIGURA 4.56 – Correlação da resistência à compressão ao final de cura e da absorção capilar do concreto com CP II – Z 32.

Dessa forma, verifica-se que o concreto com CP I – S 32 deverá apresentar uma resistência de 15 MPa, e com CP II – Z, de 25 MPa, ao final de cura, com as

possibilidades de dosagens e durações de curas já demonstrados (figura 4.53 e 4.54) para alcançar os parâmetros estabelecidos.

Através da figura 4.57 verifica-se que a resistência final de cura imersa atinge, com aproximação, o resultado previsto para o concreto com CP – I S aos 120 dias, ou seja, confirma-se que o concreto com 15 MPa, aos 3 dias de cura e 300kg/m³, alcança os parâmetros almejados de durabilidade.

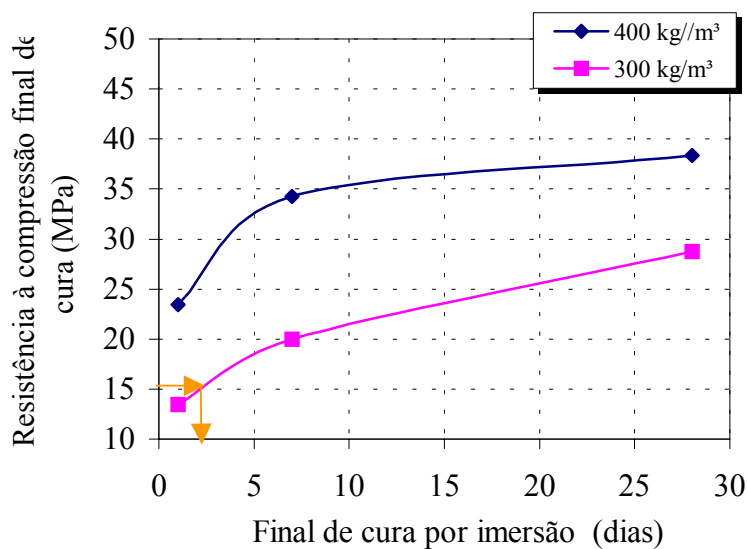


FIGURA 4.57– Resistência à compressão final cura em função da cura imersa do concreto com CP I – S 32.

Pode-se, também, na figura 4.58, verificar e confirmar os resultados obtidos para o concreto com CP II – Z. O concreto com 25 MPa, aos 3 dias de cura e 400kg/m³, atinge os parâmetros almejados de durabilidade aos 120 dias.

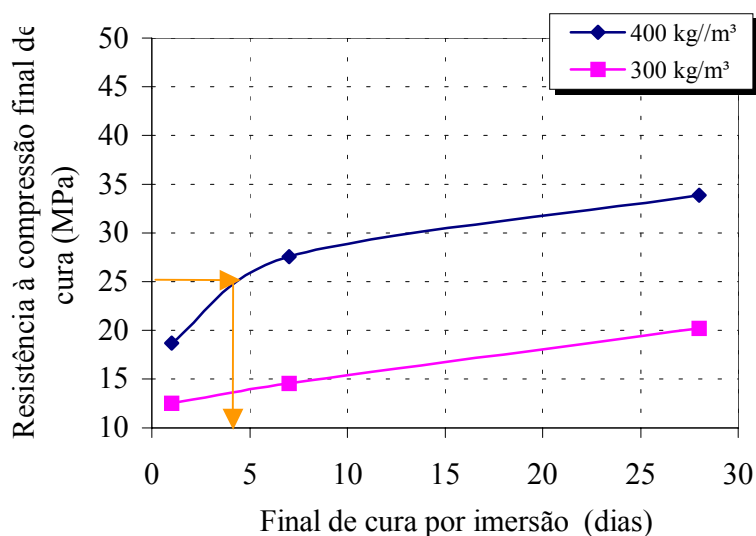


FIGURA 4.58 – Resistência à compressão final de cura em função da cura imersa do concreto com CP II – Z 32.

Assim como os resultados obtidos evidenciam que o tipo de cimento (quantidade de clínquer) tem um papel preponderante na resistência e na durabilidade do concreto, sobretudo a resistência final de cura estabelece condições reais para avaliar a durabilidade do concreto a curto e em longo prazo. Essa resistência pode ser usada como referência para dosagem, visto que, especificar concretos em função da cura realmente praticada na obra pode aproximá-lo dos resultados obtidos em laboratório, através da projeção (evolução) desses dados, trazendo mais segurança e economia para a tecnologia do concreto.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi reunir informações sobre as características mecânicas, microestruturais e de durabilidade de concretos de uso corrente em consequência de uma cura higrométrica. Dessa forma, avaliou-se a importância da duração da cura imersa para concretos com dois tipos e três dosagens em cimento, visando estabelecer correlações entre os ensaios realizados e contribuir com a indicação de ensaios simples como a perda de massa aparente e absorção de água por capilaridade para especificar a durabilidade.

Uma das questões às quais este trabalho se propôs foi a de avaliar como a cura e a dosagem em cimento compensam seus efeitos para uma dada resistência a uma certa idade, pois os efeitos da cura não são independentes da quantidade real de clínquer no cimento. Esses efeitos puderam ser estimados, e as principais conclusões sobre as contribuições da cura para a resistência à compressão do concreto podem ser resumidas nos seguintes destaques:

- a) a evolução da resistência está condicionada à duração da cura imersa, sendo que os concretos submetidos à dessecação precoce não atingem a resistência almejada, especificada em projeto, nas idades posteriores;
- b) a contribuição da cura imersa é mais eficaz para os concretos com baixa dosagem em cimento (a/c alta); porém, para solucionar o problema da dessecação proveniente da ausência ou insuficiência de cura é pouco significativo aumentar a quantidade de cimento;
- c) o lacre de plástico adesivo, como se os corpos-de-prova estivessem nas próprias formas de moldagem, pouco contribui para melhorar a resistência e os indicadores de durabilidade, portanto, não impede a evaporação da água;
- d) certamente que uma cura de 28 dias não é jamais realizada na prática, mas ela é indispensável para definir a classe do concreto e demonstrar os efeitos de uma cura prolongada;
- e) a presença de água em excesso nos poros capilares, no momento do ensaio da resistência medida aos 28 dias, após 28 dias de cura imersa, altera os resultados causando déficit nessa resistência. Dessa forma, impede que sejam realizadas correlações comparativas, pois, para os outros tempos de cura (1, 3 ou 7 dias), o concreto tem menor quantidade de água nos poros capilares e, conseqüentemente, maior resistência à compressão;
- f) a resistência ao final de cura apresenta condições para avaliar a durabilidade do concreto, pois estabelece uma relação tipicamente linear com a resistência aos 120 dias;
- g) para o cimento composto (CP II – Z), as reações de hidratação ocorrem (ou se completam) nas idades mais avançadas, devido à presença de pozolana; logo essas reações foram mais afetadas pela dessecação precoce e dosagens menos ricas (lembrando que uma dosagem de 300 kg/m³ de cimentos “comerciais” CP

- I-S e CP II-Z equivalem, efetivamente, a uma dosagem real em cimento - clínquer e gipsita - de 285 kg/m^3 para o CP I - S, e somente 255 kg/m^3 para o CP II - Z);
- h) como esperado, a resistência do concreto varia com a dosagem em cimento e depende, basicamente, da quantidade real de clínquer. Assim, são obtidas resistências iguais, aos 120 dias, para menor tempo de cura imersa, quando se aumenta a dosagem em cimento (mesmo para diferentes tipos de cimento);
 - i) 3 e 7 dias de cura imersa contribuíram igualmente para a resistência dos concretos aos 120 dias, tanto de CP I - S como do CP II - Z, para todas as dosagens ($300, 350$ e 400 kg/m^3), demonstrando que 3 dias pode ser um tempo de cura adequado para a evolução da resistência à compressão;
 - j) prolongar a cura imersa até 28 dias, em relação a cura de 3 e 7 dias, majora em, aproximadamente, 10 % as resistências avaliadas aos 120 dias para todas as dosagens ($300, 350$ e 400 kg/m^3), tanto do CP II - Z como do CP I - S; isso demonstra que, nas idades posteriores, a resistência à compressão dos concretos com esses cimentos tendem a evoluir na mesma proporção;
 - k) concretos com CP II - Z 32 somente alcançam resistências mais elevadas aos 120 dias, comparável a uma resistência do CP I - S 32, por exemplo, de 48 MPa, com a cura imersa prolongada até 28 dias, mesmo para maiores dosagens em cimento;
 - l) concretos dosados com cimentos diferentes, mas com resistências à compressão semelhantes aos 120 dias, apresentam comportamentos distintos em relação a outras características, como por exemplo, a absorção de água por capilaridade, demonstrando que a durabilidade e a resistência têm comportamentos diferenciados em relação aos parâmetros estudados (efeitos da cura e da dosagem em cimento);
 - m) concretos com baixas dosagens em cimento podem ser duráveis (profundidade carbonatada baixa) se sua cura for longa; ao mesmo tempo, eles têm durabilidade pouco satisfatória se por falta de cura sofrem uma dessecação inicial excessiva;
 - n) somente a cura imersa contribui significativamente para melhorar as propriedades do concreto; assim, a perda da água pelos capilares deve ser controlada, e a perda por dessecação deve ser reabastecida por água vinda do exterior (irrigação).

Um simples ensaio de perda de massa aparente, devido à evaporação da água, foi utilizado para mostrar a influência da cura sobre a qualidade do concreto. Baseado nas medidas dessa avaliação verifica-se que:

- a) a medida de perda de massa aparente permite avaliar a capacidade do concreto em reter a água necessária à hidratação do cimento. É um indicador da porosidade do concreto;
- b) os concretos mais fracamente dosados em cimento (300 kg/m^3) são mais sensíveis à dessecação, pois se caracterizam por uma estrutura globalmente mais porosa;
- c) a perda de massa ocorre pelos topos dos corpos-de-prova, mesmo durante o tempo com lacre nas laterais;
- d) com o prolongamento da cura imersa a perda de massa diminui;

- e) a perda de massa é maior nas idades mais recentes até os 28 dias, diminuindo de intensidade após esse período;
- f) comparada à ausência de cura, a cura imersa de 28 dias pode levar a um acréscimo de até 25 % na resistência aos 120 dias do concreto com CP II – Z 32 e 400 kg/m³, enquanto que a perda de massa sofre redução de até 55 % (de 2,0 % para 1,3 %). Assim, a cura contribuiu de maneira diferente nas propriedades e características do concreto, sendo mais significativa para melhorar os percentuais de durabilidade do que de resistência. Dessa forma, avalia-se que a tendência de relacionar os parâmetros da qualidade do concreto com ensaios que dependem diretamente do nível de hidratação (porosidade) são mais adequados para diagnosticar a durabilidade;
- g) a perda de massa pode contribuir para especificar a durabilidade do concreto devido a sua simplicidade de controle e previsão, visto que estabelece relações lineares com outros ensaios que necessitam ser acelerados, ou ter idades mais avançadas.

Os resultados obtidos com a absorção de água por capilaridade mostram que um aumento mínimo na duração da cura imersa tem efeito positivo na diminuição da porosidade capilar. Consta-se, assim, que:

- a) esse efeito benéfico é tanto mais marcante quanto a dosagem em cimento é fraca, isto é, para dosagens mais fracas em cimento, a dessecação precoce majora, significativamente, a absorção capilar (verifica-se até 45 % de acréscimo);
- b) a cura imersa de três dias parece ser de duração interessante para um grande número de dosagens e para os dois cimentos utilizados, pois, levando-se em conta os fatores técnicos e econômicos, a cura de 3 dias melhora sensivelmente os índices de durabilidade quando comparada, por exemplo, à ausência de cura;
- c) para o cimento composto (CP II – Z 32), há uma redução de 60 % na porosidade capilar quando a cura imersa é prolongada de 3 para 28 dias;
- d) 7 dias de cura imersa parecem adequados para reduzir a porosidade de um concreto no nível de porosidade próximo de 28 dias de cura;
- e) o lacre de plástico adesivo não contribui para amenizar a porosidade capilar;
- f) para resistências maiores, aos 120 dias, em torno de 52 MPa, ou seja, baixa relação água cimento ($a/c \leq 0,50$), os concretos com os cimentos CP I – Z 32 e CP II – Z 32 apresentam absorções capilares semelhantes (aproximadamente 0,2 kg/m²);
- g) para resistências menores, os concretos têm absorções capilares diferentes quando o tempo de cura é menor. Tomando como exemplo uma resistência de 40 MPa, aos 120 dias, o concreto com CP I – S apresentou uma absorção capilar de 0,6 kg/m², enquanto que, com CP II – Z, apresentou 0,9 kg/m². Portanto, o concreto com CP II – Z apresentou uma absorção capilar 50 % maior do que o concreto com CP I – S, para a mesma resistência à compressão.

Para caracterizar a durabilidade dos concretos, foram realizadas medidas de profundidade de carbonatação com o propósito de evidenciar a eficácia da cura e da dosagem em cimento. Levando-se em conta os resultados, verifica-se que a cura tem um papel relevante, pois, como previsto, o aumento da duração da cura diminui de maneira significativa a profundidade carbonatada dos concretos, sobretudo quando eles são fracamente dosados. Observa-se ainda que:

- a) para as dosagens fracas em cimento (300 kg/m^3) 1, 3 ou até mesmo 7 dias de cura imersa não são relevantes para diminuir a profundidade carbonatada;
- b) o tempo de cura imersa por 28 dias reduz, em até 60 %, a profundidade carbonatada dos concretos com idade de 120 dias;
- c) a duração da cura imersa é mais relevante para a durabilidade do que para a resistência à compressão; enquanto que as resistências podem ser equiparadas com maiores dosagens em cimento, o mesmo não ocorre quando o parâmetro analisado é de durabilidade;
- d) para as mesmas condições de cura e igual dosagem em cimento o concreto com CP II – Z apresentou maior profundidade de carbonatação que o CP I – S;
- e) concretos com diferentes cimentos (CP II e CP I) e diferentes absorções capilares apresentaram profundidades carbonatadas iguais;
- f) o CP I – S apresenta maior absorção capilar que o cimento composto com pozolana quando as profundidades carbonatadas são maiores.

Ensaio de análise termogravimétrica, da pele e do miolo do concreto, foram avaliados a fim de definir as quantidades de alguns materiais constituintes da estrutura microscópica e avaliar o grau de hidratação. As interpretações dos resultados estão descritas a seguir:

- a) a quantidade de água ligada na pele é sempre inferior em relação ao miolo do concreto, mostrando problemas de hidratação, mas a porcentagem de água ligada, seja na pele ou no miolo do concreto com CP I ou CP II, é maior quando o tempo de cura imersa e a dosagem em cimento são maiores;
- b) nas camadas mais profundas (denominadas miolo, seio ou coração do concreto), os danos das condições da cura inadequada não são, ainda, perceptíveis na idade de 120 dias;
- c) o miolo do concreto permanece protegido quaisquer que sejam as condições de conservação, visto que não há variação de quantidade de carbonato no interior do concreto em função do tempo de cura;
- d) o miolo do CP II - Z apresenta menor quantidade de CH devido ao maior consumo, desse composto, pela pozolana; ou porque há menos quantidade de clínquer no cimento pozolânico.

A porosimetria, que define as dimensões dos poros abertos, além de seus volumes, foi avaliada através do ensaio do porosímetro por intrusão de mercúrio (MIP) para aprofundar o estudo deste trabalho que, em síntese, trata da porosidade. Os resultados permitiram detectar o volume e as dimensões dos poros abertos com diâmetros entre 6 nm e $100 \mu\text{m}$. As conclusões desse ensaio têm os seguintes destaques:

- a) os poros com diâmetros entre 6 nm e $100 \mu\text{m}$ estão presentes em todos os concretos avaliados, mas em concentrações diferentes;
- b) a porosidade dos concretos concentra-se entre 10 nm e $1 \mu\text{m}$, sendo que o concreto com maior dosagem em cimento e, conseqüentemente, menor relação a/c possui a maior concentração de poros entre 10 nm e 50 nm;
- c) por comparação, os poros do miolo do concreto com CP I – S e 400 kg/m^3 são mais refinados que os poros do miolo com CP I – S e 300 kg/m^3 ;
- d) não há evidência do refino da porosidade devido à pozolana do CP II – Z.

Sugestões para futuras pesquisas

A autora, a partir das observações realizadas ao longo da pesquisa, enumera uma lista de sugestões para que, no futuro, novos trabalhos possam ser desenvolvidos, conforme se indica a seguir:

- a) avaliar a resistência à compressão e as demais características e propriedades, em concretos especificados e dosados com quantidades reais de clínquer no cimento;
- b) avaliar a resistência à compressão e as demais características e propriedades com outros processos de cura;
- c) avaliar a resistência à compressão e as demais características e propriedades em idades mais avançadas;
- d) avaliar a resistência à compressão e as demais características e propriedades em concretos aditivados;
- e) comparar método do indicador colorante (solução de fenolftaleína) com outro método de determinação da profundidade carbonatada (microscópio eletrônico de varredura);
- f) avaliar o diâmetro dos poros da pasta do concreto endurecido através de outro método (microscópio eletrônico de varredura);
- g) avaliar a porosidade do concreto em amostras de pastas (isentas de grãos de agregados), e em amostras com fragmentos de pasta fixados no agregado;
- h) avaliar a amostra, por análise termogravimétrica, em diferentes profundidades do concreto de recobrimento.

ANEXO 1

Gráficos e complementares da resistência à compressão

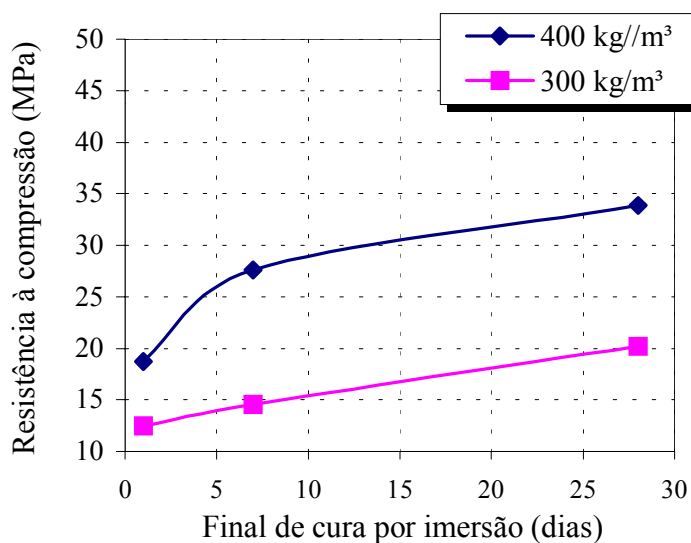


FIGURA A1.1 - Resistência à compressão ao final de cura do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função do final de cura por imersão.

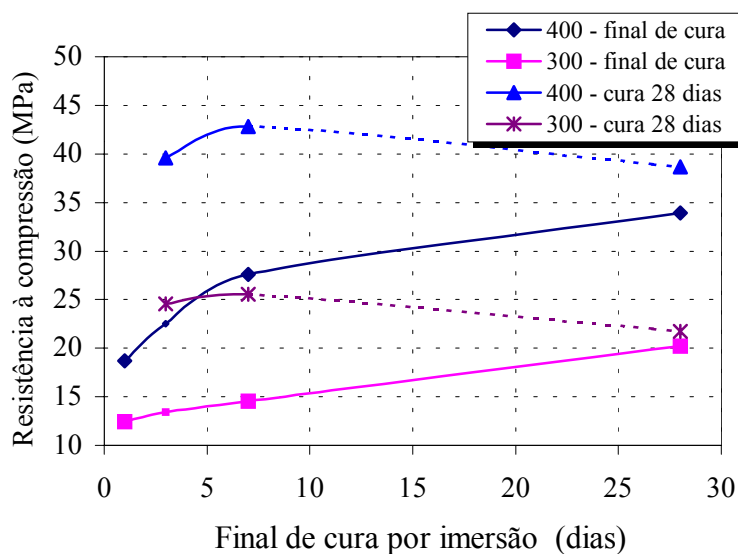


FIGURA A1.2 - Comparação das curvas da resistência à compressão ao final de cura e aos 28 dias do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função da duração da cura imersa.

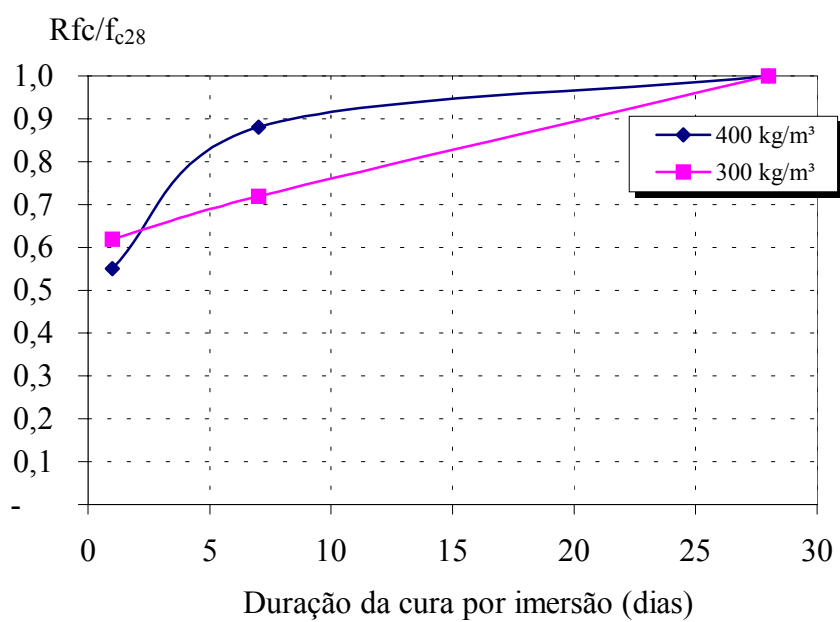


FIGURA A1.3 - Variação da relação resistência em fim de cura/resistência aos 28 dias do concreto com duas dosagens do CP II – Z 32 em função da duração da cura imersa.

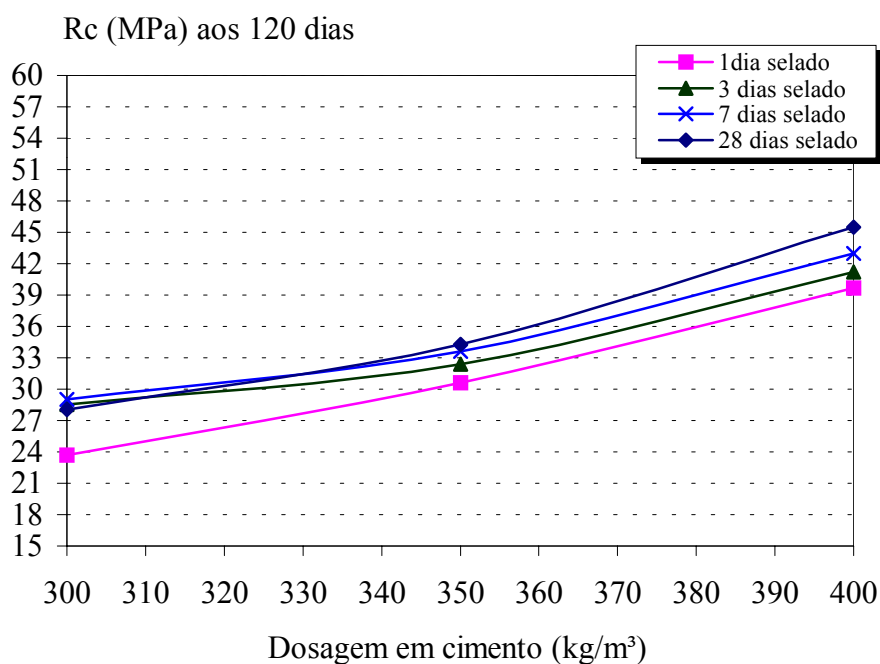


FIGURA A1.4 – Resistência à compressão aos 120 dias do concreto em função das dosagens do CP II – Z 32 para diferentes durações de cura com selo.

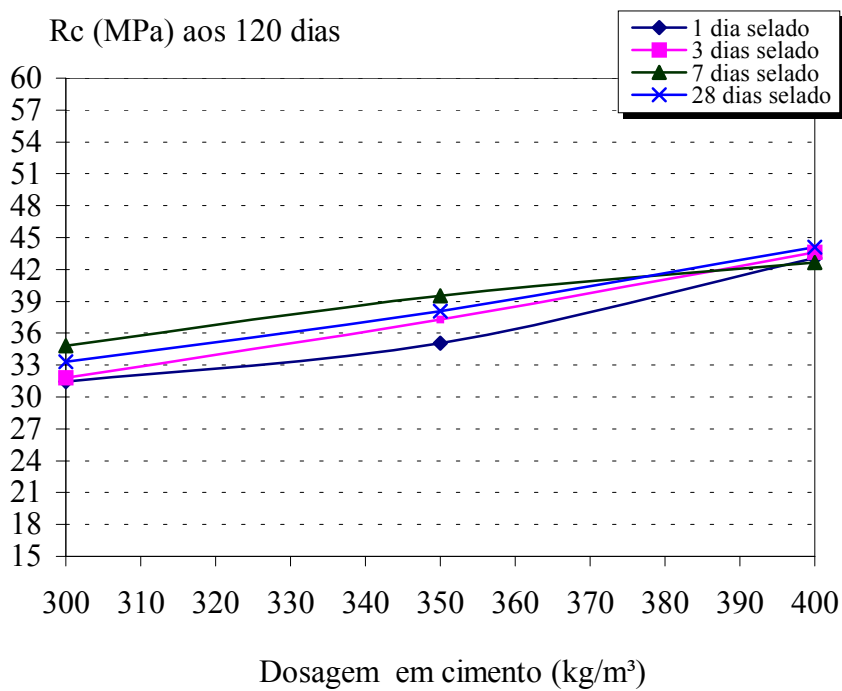


FIGURA A1.5 - Resistência à compressão aos 120 dias do concreto em função das dosagens do CP I – S 32 para diferentes durações de cura com selo.

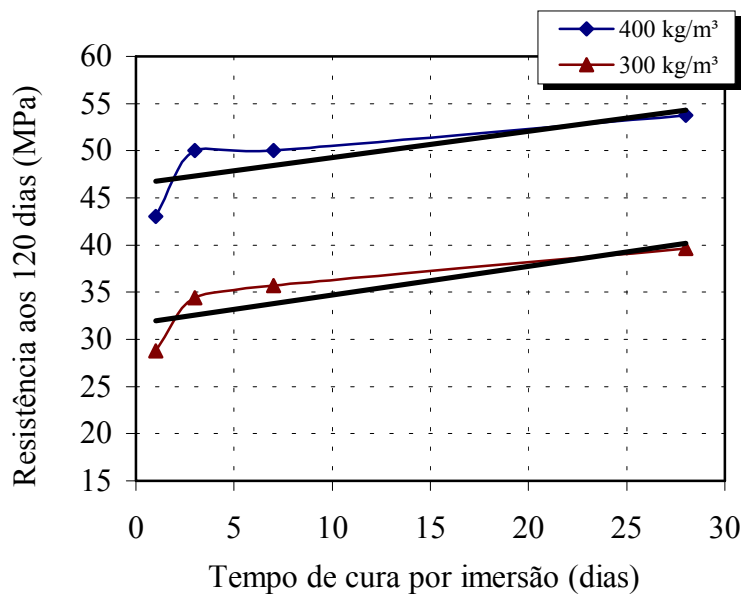


FIGURA A1.6 – Tendência das curvas da resistência aos 120 dias do concreto com duas dosagens do CPI – S 32 em função da cura imersa.

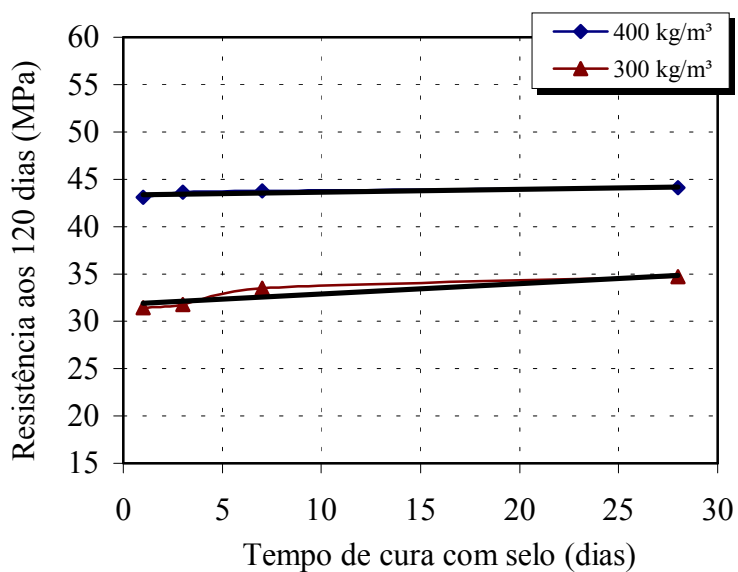


FIGURA A1.7 Tendência das curvas da resistência aos 120 dias do concreto com duas dosagens do CPI – S 32 em função da cura com selo.

Gráficos complementares da perda de massa

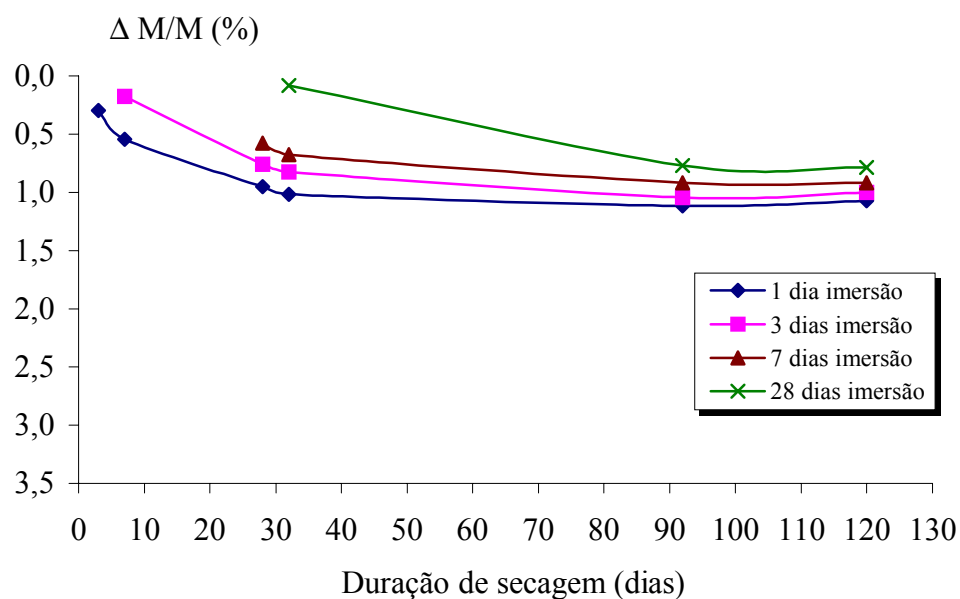


FIGURA A1.8 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 400 kg/m³ de CPI - S 32, após cura imersa, em função da secagem até a idade de 120 dias.

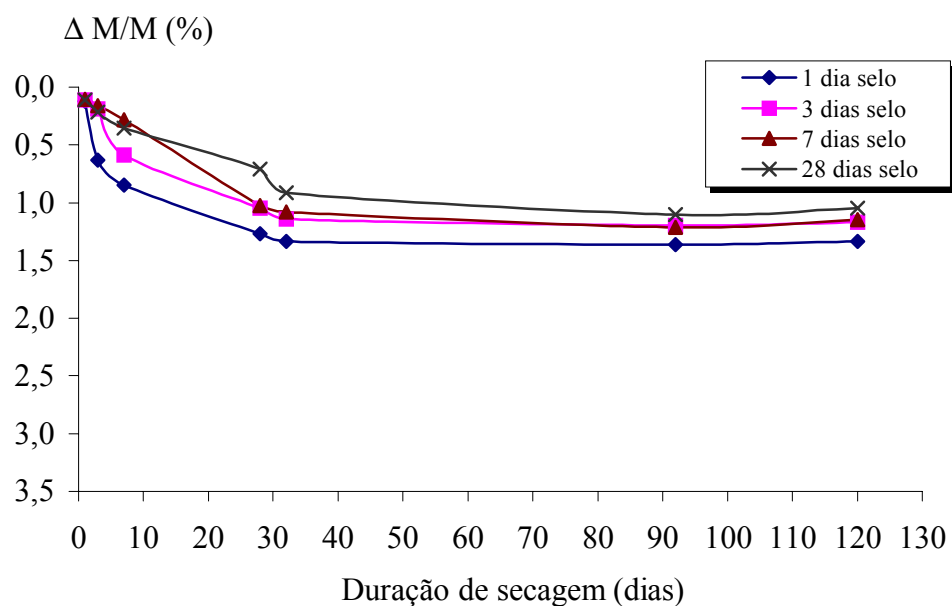


FIGURA A1.9 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 400 kg/m³ de CPI - S 32, após cura com selo, em função da secagem até a idade de 120 dias.

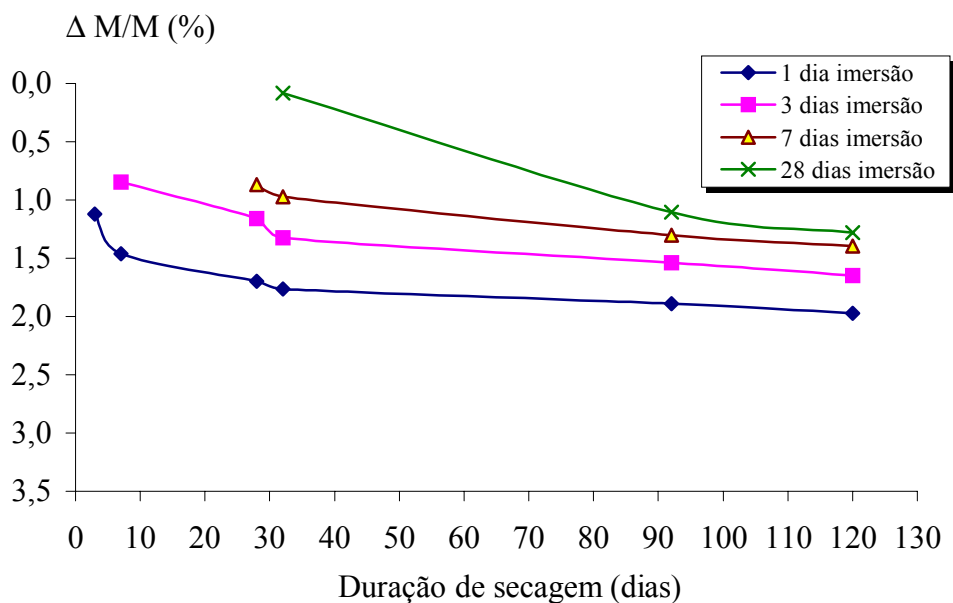


FIGURA A1.10 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 400 kg/m³ de CP II – Z 32, após cura imersa, em função da secagem até a idade de 120 dias.

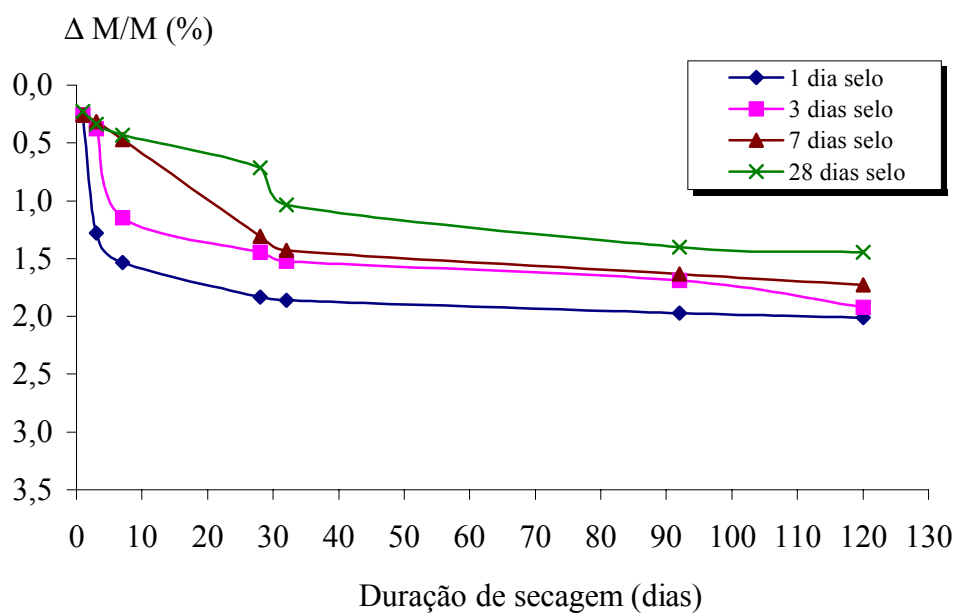


FIGURA A1.11 - Evolução da perda de massa aparente do concreto com 400 kg/m³ de CP II – Z 32, após cura com selo, em função da secagem até a idade de 120 dias.

Gráficos complementares da profundidade carbonatada

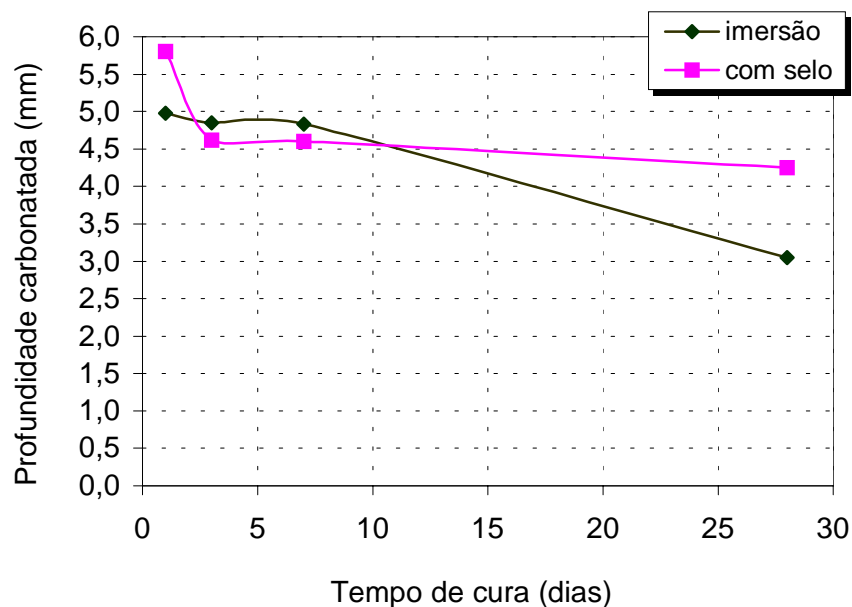


FIGURA A1.12 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias do concreto com 300 kg/m³ de CP II - Z 32 em função da duração e da condição de cura.

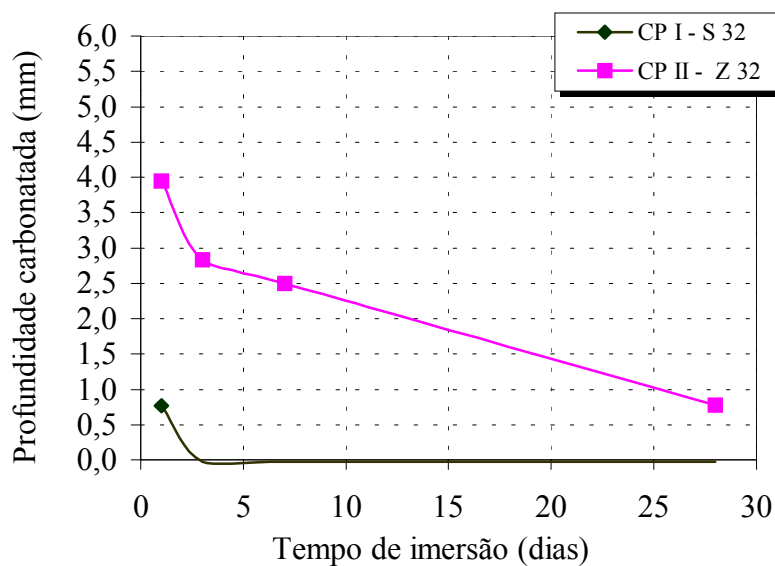


FIGURA A1.13 - Profundidade de carbonatação aos 120 dias do concreto com 400 kg/m³ de CP I - S 32 e CP II - Z 32 em função da duração da cura imersa.

Gráficos complementares da absorção de água por capilaridade.

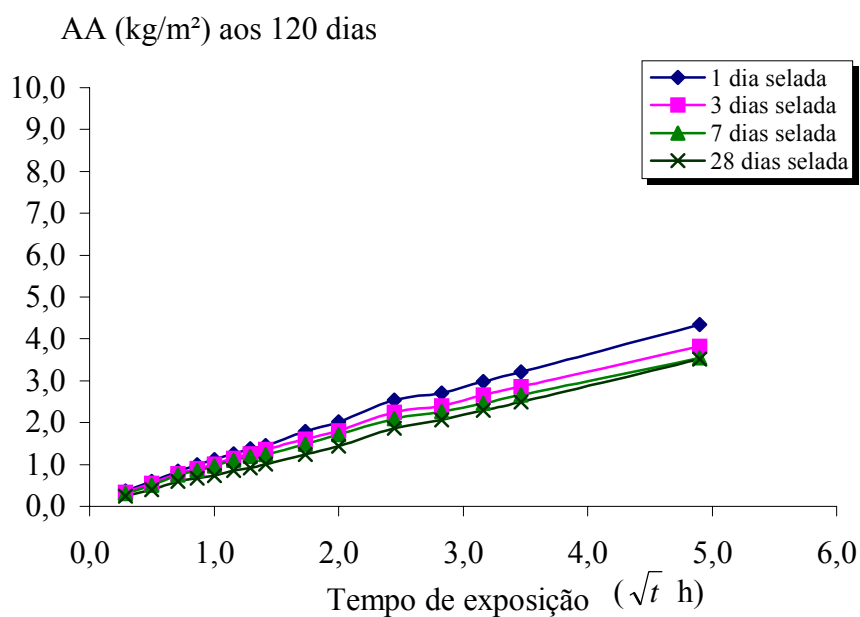


FIGURA A1.14 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 300 kg/m³ do CP I – S 32 e cura selada de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.

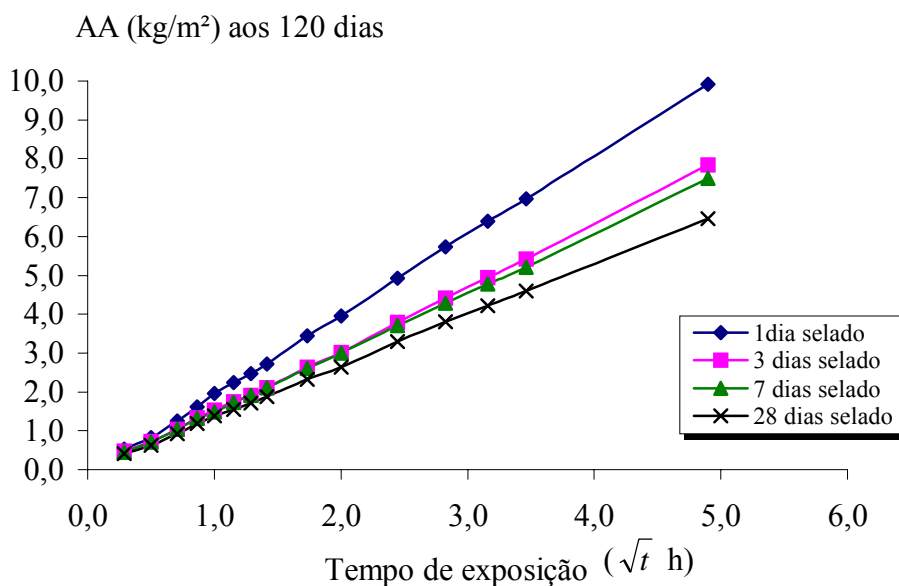


FIGURA A1.15 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 300 kg/m³ do CP II – Z 32 e cura selada de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.

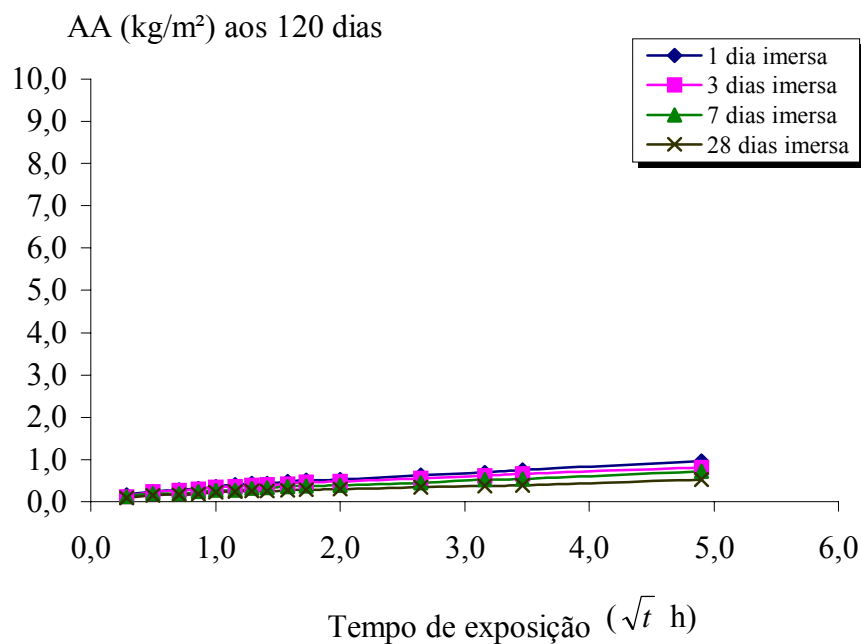


FIGURA A1.16 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 400 kg/m³ do CP I – S 32 e cura imersa de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.

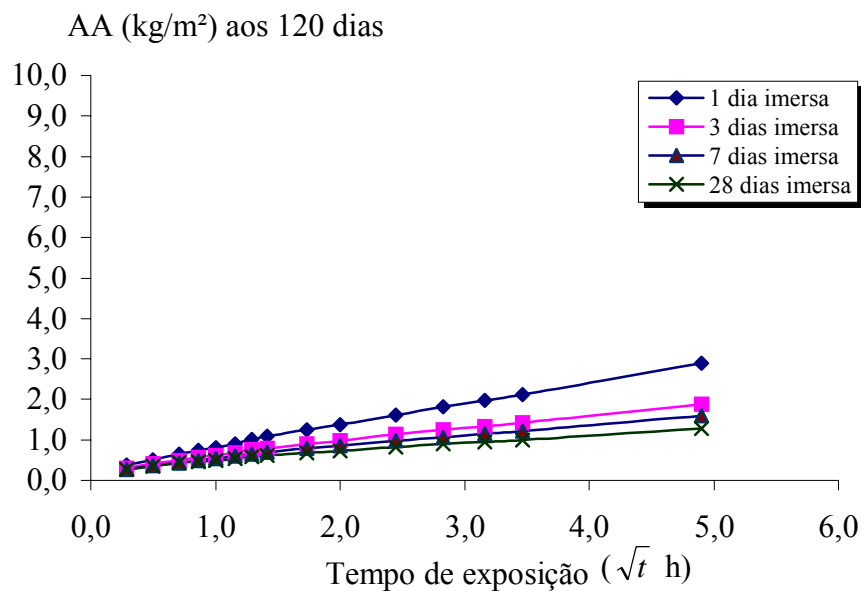


FIGURA A1.17 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 400 kg/m³ do CP II– Z 32 e cura imersa de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.

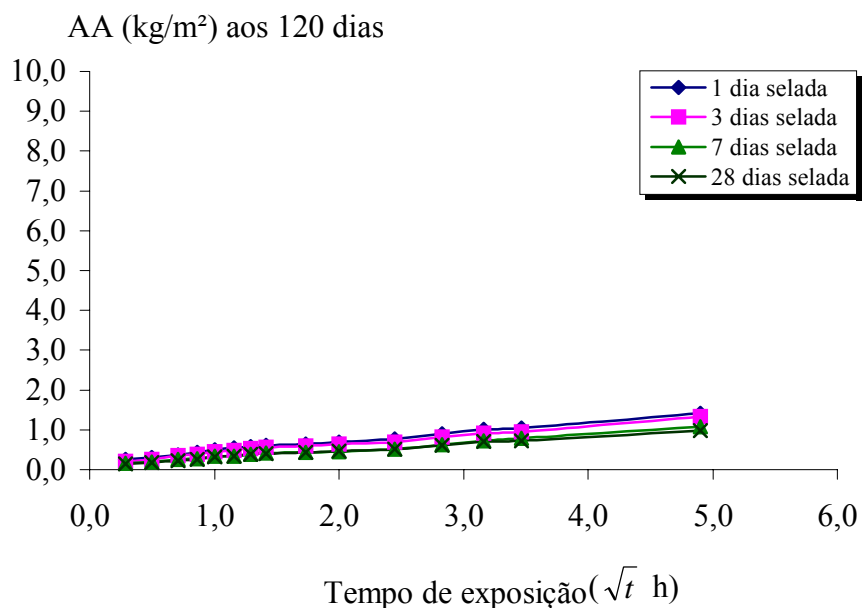


FIGURA A1.18 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 400 kg/m³ do CP I – S 32 e cura selada de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.

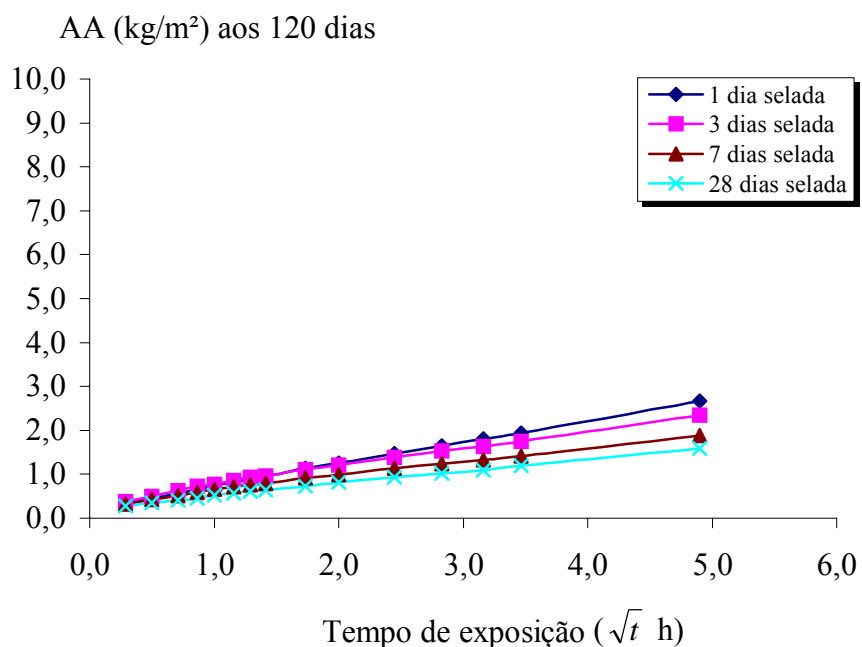


FIGURA A1.19 - Evolução da absorção de água por capilaridade do concreto com 400 kg/m³ do CP II – Z 32 e cura selada de 1, 3, 7, e 28 dias em função da raiz quadrada do tempo de exposição.

ANEXO 2

TABELA A2.1 – Média das resistências à compressão aos 28 (R_{c28}) e 120 dias (R_{c120}) em MPa.

Dosagem:		300 kg/m ²				350 kg/m ²				400 kg/m ²				
		CP I – S		CP II – Z		CP I – S		CP II – Z		CP I – S		CP II – Z		
Cura		28	120	28	120	28	120	28	120	28	120	28	120	
		Duração (dias)	1	Imersão	27,5	28,8	28,3						37,8	43,0
3	31,8		34,4		24,6	32,3	39,1	39,0	32,3	38,4	39,7	50,0	39,6	43,3
7	34,0		35,7		25,6	32,4	39,3	40,6	34,3	40,9	41,0	50,0	42,8	44,4
28	28,5		39,6		21,7	35,2	36,9	47,2	31,1	43,2	39,9	53,7	38,7	51,2
1	Selo		27,2	31,4	21,2	23,7	28,4	34,0	23,1	30,6	32,4	43,1	31,3	39,7
3			29,1	31,8	23,5	28,5	30,0	35,1	24,9	32,4	39,8	43,6	35,3	41,2
7			29,0	33,3	24,2	29,0	31,6	39,5	25,5	33,6	39,1	43,8	37,2	43,0
28			28,8	34,8	23,1	29,2	30,6	38,1	25,6	34,3	37,2	44,1	36,5	45,5

Observação: os valores em itálico e negrito correspondem às resistências à compressão aos 28 dias de cura imersa (f_{c28}) em MPa.

TABELA A2.2 – Média das resistências ao final de cura (R_{fc}) e evolução com a idade (R_{ei}).

CPI – S 32		Cura					
DOSAGEM (kg/m ²)	Idade (dias)	Imersão	Selo	Imersão	Selo	Imersão	Selo
		1 dia		7 dias		28 dias	
Resistência (MPa)							
300	1	<i>(13,5)</i>					
	3	19,6					
	7	23,1		<i>(20,0)</i>	<i>(19,5)</i>		
	28	27,5		32,5	23,9	<i>(28,8)</i>	<i>(26,4)</i>
	30	26,9		32,2	27,4	31,3	29,7
	120	28,8		37,5	31,7	38,8	36,5
	400	1	<i>(23,4)</i>				
3		29,7					
7		32,6		<i>(34,2)</i>	<i>(27,2)</i>		
28		37,8		44,8	36,9	<i>(38,3)</i>	<i>(35,1)</i>
30		36,4		40,6	35,9	38,2	33,9
120		43,0		47,4	42,3	44,8	40,5
CP II – Z 32							
300	1	<i>(12,5)</i>					
	3	15,0					
	7	19,8		<i>(14,5)</i>	<i>(14,8)</i>		
	28	26,2		22,1	21,9	<i>(20,2)</i>	<i>(18,9)</i>
	30	24,4		22,6	21,7	19,8	21,5
	120	28,3		22,6	23,7	29,8	24,3
	400	1	<i>(18,7)</i>				
3		25,8					
7		29,4		<i>(27,6)</i>	<i>(27,8)</i>		
28		36,8		36,9	34,2	<i>(34,4)</i>	<i>(34,8)</i>
30		33,1		37,0	34,6	33,9	33,3
120		41,2		44,3	38,0	44,7	37,5

Observação: os valores em itálico e negrito correspondem às resistências à compressão ao final de cura (R_{fc}).

TABELA A2.3 – Médias dos resultados das perdas de massa aparente aos 120 dias $\Delta M/M$ (%).

CURA (dias)	CP I – S 400													
	Selo							Imersa						
	Idade (dias)													
	1	3	7	28	32	92	120	3	7	28	32	92	120	
1	0,1	0,6	0,9	1,3	1,3	1,4	1,3	0,3	0,5	1,0	1,0	1,1	1,1	
3	0,1	0,2	0,6	1,1	1,1	1,2	1,2		0,2	0,8	0,8	1,0	1,0	
7	0,1	0,2	0,3	1,0	1,1	1,2	1,2			0,6	0,7	0,9	0,9	
28	0,1	0,2	0,4	0,7	0,9	1,1	1,1				0,1	0,8	0,8	
	CP I – S 300													
1	0,2	1,3	1,6	1,9	1,9	2,0	2,0	1,1	1,4	1,7	1,7	1,9	1,9	
3	0,3	0,5	1,3	1,7	1,7	2,0	2,0		1,1	1,6	1,6	1,8	1,9	
7	0,3	0,5	0,7	1,6	1,6	1,9	1,9			1,3	1,3	1,7	1,7	
28	0,2	0,5	0,6	1,0	1,2	1,7	1,7				0,4	1,6	1,7	
	CP II – Z 400													
1	0,3	1,3	1,5	1,8	1,9	2,0	2,0	1,1	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	
3	0,3	0,4	1,1	1,4	1,5	1,7	1,9		0,9	1,2	1,3	1,5	1,7	
7	0,3	0,3	0,5	1,3	1,4	1,6	1,7			0,9	1,0	1,3	1,4	
28	0,2	0,3	0,4	0,7	1,0	1,4	1,4				0,1	1,1	1,3	
	CP II – Z 300													
1	0,3	1,8	2,5	2,8	2,9	2,9	3,0	1,4	2,5	2,7	2,8	2,8	2,9	
3	0,3	0,5	2,1	2,5	2,5	2,7	2,8		2,1	2,6	2,7	2,9	3,0	
7	0,3	0,5	0,8	2,2	2,3	2,5	2,7			2,1	2,2	2,5	2,6	
28	0,3	0,5	0,8	1,2	1,7	2,3	2,5				1,0	2,2	2,5	

TABELA A2.4 – Médias dos resultados da absorção de água por capilaridade aos 120 dias AA (kg/m²).

Cura (dias)	Intervalo de tempo \sqrt{t} (h)		0,29	0,50	0,71	0,87	1,00	1,16	1,29	1,41	1,73	2,00	2,45	2,83	3,16	3,46	4,90	
		CPI – S 32	300	Imersão	0,34	0,52	0,73	0,89	0,99	1,10	1,16	1,27	1,51	1,71	2,10	2,26	2,52	2,71
3	0,28				0,45	0,62	0,74	0,84	0,95	1,01	1,10	1,30	1,47	1,83	1,97	2,19	2,36	3,24
7	0,20				0,39	0,53	0,61	0,68	0,76	0,78	0,89	1,03	1,16	1,39	1,51	1,66	1,80	2,44
28	0,31				0,43	0,57	0,64	0,68	0,77	0,79	0,85	0,97	1,07	1,27	1,35	1,48	1,57	2,07
1	Selo		0,36	0,59	0,84	0,99	1,12	1,26	1,38	1,45	1,79	2,03	2,54	2,70	2,99	3,22	4,35	
3			0,34	0,55	0,78	0,90	1,01	1,15	1,26	1,36	1,61	1,81	2,24	2,41	2,66	2,86	3,82	
7			0,31	0,51	0,75	0,85	0,97	1,10	1,20	1,24	1,49	1,71	2,10	2,27	2,46	2,66	3,55	
28			0,25	0,40	0,59	0,67	0,73	0,85	0,92	1,01	1,24	1,44	1,87	2,06	2,29	2,50	3,52	
1	400	Imersão	0,17	0,24	0,28	0,33	0,36	0,40	0,43	0,45	0,48	0,52	0,53	0,64	0,69	0,75	0,96	
3			0,13	0,24	0,27	0,31	0,35	0,36	0,40	0,41	0,42	0,47	0,48	0,56	0,62	0,66	0,82	
7			0,12	0,19	0,20	0,24	0,27	0,27	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,45	0,52	0,54	0,73	
28			0,10	0,15	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26	0,26	0,27	0,29	0,31	0,34	0,38	0,39	0,52	
1		Selo	0,26	0,30	0,38	0,44	0,50	0,54	0,59	0,61	0,65	0,69	0,76	0,91	1,01	1,05	1,42	
3			0,22	0,26	0,36	0,38	0,45	0,48	0,53	0,56	0,59	0,64	0,69	0,82	0,92	0,96	1,33	
7			0,16	0,19	0,25	0,28	0,33	0,34	0,39	0,41	0,44	0,45	0,52	0,63	0,73	0,78	1,08	
28			0,15	0,17	0,22	0,26	0,32	0,34	0,39	0,41	0,43	0,46	0,52	0,62	0,70	0,73	0,99	

Cura (dias)	Intervalo de tempo \sqrt{t} (h)		0,29	0,50	0,71	0,87	1,00	1,16	1,29	1,41	1,73	2,00	2,45	2,83	3,16	3,46	4,90	
	CP II – Z 32		300	Imersão	0,54	0,99	1,42	1,75	1,97	2,26	2,50	2,76	3,36	3,83	4,72	5,45	6,08	6,61
0,48					0,86	1,22	1,48	1,68	1,92	2,14	2,36	2,88	3,36	4,18	4,91	5,51	6,05	8,87
0,56					0,75	1,08	1,31	1,47	1,66	1,85	2,04	2,45	2,82	3,43	3,99	4,46	4,87	6,98
0,44					0,58	0,77	0,91	1,01	1,13	1,24	1,35	1,59	1,80	2,17	2,48	2,73	2,94	4,13
Selo				0,52	0,82	1,25	1,61	1,97	2,24	2,47	2,73	3,45	3,96	4,93	5,74	6,40	6,98	9,92
				0,48	0,73	1,03	1,33	1,54	1,75	1,90	2,11	2,64	3,01	3,80	4,41	4,94	5,41	7,85
				0,45	0,70	1,03	1,32	1,48	1,73	1,91	2,12	2,61	3,01	3,71	4,29	4,77	5,21	7,50
				0,42	0,63	0,92	1,19	1,38	1,55	1,71	1,89	2,33	2,64	3,30	3,80	4,22	4,59	6,45
400			Imersão	0,38	0,51	0,64	0,74	0,81	0,90	1,01	1,10	1,25	1,38	1,62	1,81	1,98	2,12	2,90
				0,29	0,41	0,48	0,57	0,61	0,68	0,76	0,79	0,90	0,98	1,14	1,26	1,33	1,43	1,88
				0,27	0,37	0,43	0,50	0,54	0,60	0,65	0,69	0,78	0,85	0,98	1,06	1,15	1,22	1,60
				0,27	0,35	0,45	0,46	0,50	0,54	0,58	0,61	0,68	0,73	0,83	0,90	0,94	1,00	1,29
			Selo	0,33	0,45	0,57	0,64	0,75	0,82	0,91	0,95	1,13	1,25	1,47	1,65	1,80	1,94	2,66
				0,38	0,50	0,62	0,73	0,78	0,87	0,93	0,97	1,11	1,21	1,39	1,53	1,63	1,75	2,34
				0,32	0,43	0,52	0,58	0,66	0,71	0,76	0,79	0,92	0,99	1,13	1,24	1,33	1,41	1,89
				0,28	0,34	0,41	0,46	0,52	0,57	0,62	0,64	0,73	0,82	0,93	1,03	1,10	1,19	1,59

TABELA A2.5 – Dados referentes às determinações da profundidade carbonatada.

CPI - S 400 Leituras efetuadas em dois corpos de prova rompidos por tração diametral totalizando quatro faces medidas.		Média (mm)
AU1	0,0; 0,5; 1,0; 1,5 (nitidez após 15 min)	0,8
AU3	sem vestígios	
AU7	sem vestígios	
AU28	sem vestígios	
AS1	0,5; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0	1,0
AS3	Sem vestígios com leve coloração (clara transparente de 1 mm após 15 min) observou-se que as laterais demoram mais tempo para colorir do que a parte central e ficam sempre mais claras que o miolo	
AS7		
AS28		
CPI - S 300 Leituras efetuadas em dois corpos de prova rompidos por tração diametral totalizando quatro faces medidas		Média (mm)
BU1	1,5 (1); 2,0 (8); 2,5 (2); 3,0 (6); 4,0 (2)	3,0
BU3	2,0 (2); 2,5 (2); 3,0 (4); 3,5 (1); 4,0 (2)	3,0
BU7	2,0 (12); 2,5(1); 3,0 (1); 3,5 (2); 4,0 (7); 4,5 (1); 5,0 (2)	3,0
BU28	1,0 (2); 1,5 (6); 2,0 (6) 2,5 (1)	1,8
BS1	4,0 (4); 5,0 (5); 2,0 (2); 3,0 (2); 4,5 (2)	3,9
BS3	3,0 (6); 3,5 (1); 4,0 (6); 4,5 (1); 5,0 (2)	3,9
BS7	2,0 (3); 3,0 (3); 3,5 (2); 4,0 (2); 5,0 (1)	3,5
BS28	12,0 (9); 2,5 (3); 3,0 (3); 4,0 (1); 5,0 (1)	2,9

TABELA A2.6 – Médias dos resultados da profundidade carbonatada Pc (mm).

Cimento		Cura				
Tipo	Dosagem (kg/m ³)	Tipo	Duração (dias)			
			1	3	7	28
CP I – S 32	300	úmida	3,0	3,0	3,0	1,8
	400		0,8	-	-	-
	300	seca	3,9	3,9	3,5	2,9
	400		1,0	-	-	-
CP II – Z 32	300	úmida	5,0	4,9	4,9	3,1
	400		4,0	2,8	2,5	0,8
	300	seca	5,8	4,6	4,6	4,3
	400		4,9	3,4	3,0	2,2

TABELA A2.7 - Perdas de massa através da análise térmica (%)

Dosagem 400 kg/m ²		Condição de cura											
		Imersão						Selada					
Perda de massa aos 120 dias (%)		Amostra											
		Miolo			Pele			Miolo			Pele		
		Dias de cura											
		28	3	1	28	3	1	28	3	1	28	3	1
CP I – S 32	Água ligada	8,7	6,9	4,1	7,7	5,3	4,6	7,7	-	-	5,6	5,1	-
	CaOH ₂	2,3	2,0	1,2	1,7	1,3	0,7	2,4	-	-	1,2	1,1	-
	CaCO ₃	1,6	1,6	1,8	4,6	5,2	9,2	2,3	-	-	8,1	7,2	-
CP II – Z 32	Água ligada	-	-	-	-	-	-	6,6	7,0	7,2	4,8	3,8	4,0
	CaOH ₂	-	-	-	-	-	-	2,3	2,3	2,5	1,2	0,9	0,8
	CaCO ₃	-	-	-	-	-	-	3,1	3,6	3,3	8,4	10,0	9,5

Tabela A2.8 – Análise estatística bidimensional - Coeficiente de correlação linear (R).

	TIPO	Quantidade	T cura	R120u	R120s	PM120u	PM120s	AA120u	AA120s	Pc120u	Pc120s	Rfcúmida	Rfcselo
TIPO	1												
Quant cimento	0	1											
Tempo de cura	0	0	1										
R 120úmida	-0,21	0,86	0,38	1,00									
R 120selo	-0,26	0,92	0,14	0,91	1,00								
PM 120úmida	0,59	-0,75	-0,20	-0,85	-0,89	1,00							
PM 120selo	0,62	-0,72	-0,22	-0,85	-0,89	0,98	1,00						
AA 120úmida	0,52	-0,70	-0,28	-0,83	-0,87	0,94	0,94	1,00					
AA 120selo	0,46	-0,78	-0,24	-0,87	-0,90	0,92	0,94	0,91	1,00				
Pc 120úmida	0,60	-0,65	-0,37	-0,84	-0,78	0,94	0,94	0,91	0,87	1,00			
Pc 120selo	0,61	-0,66	-0,24	-0,83	-0,79	0,91	0,90	0,85	0,84	0,96	1,00		
R fcura úmida	-0,35	0,65	0,59	0,94	0,79	-0,82	-0,83	-0,78	-0,82	-0,87	-0,86	1,00	
R fcura selo	-0,21	0,81	0,46	0,93	0,85	-0,84	-0,83	-0,81	-0,85	-0,81	-0,70	0,94	1

Observa-se pelos resultados da correlação linear que o tipo do cimento aparece como uma variável com pequena influência tanto na resistência como nas demais variáveis dependentes (perda de massa e absorção por capilaridade). Isto se explica pelo fato que, nesse caso, o “*tipo*” de cimento equivale a substituições de até 15 % no cimento, o que provavelmente não acarrete mudanças sensíveis nas variáveis dependentes.

A perda de massa e a absorção por capilaridade têm alto coeficiente de correlação linear, demonstrando que essas duas grandezas medem basicamente a mesma coisa.

Como dito anteriormente, o coeficiente de correlação zero não prova a independência das variáveis, mas pode apenas indicar que o relacionamento não é do tipo linear.

Tabela A2.9 – Estatística de regressão linear simples - resistência à compressão.

R múltiplo	0,2132			
R-Quadrado	0,0454		(imersão)	
Observações	48			
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	45,3138	3,6296	12,4846	2,23E-16
TIPO de cimento	-3,3971	2,2955	-1,4799	0,145726
R múltiplo	0,2431			
R-Quadrado	0,0591		(selada)	
Observações	48			
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	41,6679	3,1820	13,09475	3,99E-17
TIPO de cimento	-3,4221	2,0125	-1,70042	0,095805
R múltiplo	0,8646			
R-Quadrado	0,7475		(imersão)	
Observações	48			
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	19,5525	1,8669	10,47333	9,16E-14
<i>Quantidade cimento</i>	13,7771	1,1807	11,66836	2,41E-15
R múltiplo	0,9180			
R-Quadrado	0,8428		(selada)	
Observações	48			
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	17,1567	1,3006	13,1918	3,04E-17
<i>Quantidade cimento</i>	12,9188	0,8225	15,70586	4,17E-20
R múltiplo	0,3766			
R-Quadrado	0,1418		(imersão)	
Observações	48			
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	37,4982	1,4689	25,52857	8,34E-29
Tempo de cura	0,2790	0,1012	2,757146	0,008334
R múltiplo	0,1288			
R-Quadrado	0,0166		(selada)	
Observações	48			
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	35,7134	1,3885	25,72056	6,04E-29
Tempo de cura	0,0842	0,0956	0,88079	0,38301

Valores de P inferiores a 0,05 indicam relações estatísticas significativas, para um intervalo de confiança de 95 %. Para valores de P maiores que 0,05, não se prova a relação.

P > 0,05 para tipo de cimento e resistência à compressão, não se prova a relação.

P < 0,05 para quantidade de cimento e resistência à compressão, prova-se a relação.

P < 0,05 para tempo de cura por imersão e resistência à compressão, prova-se a relação.

P > 0,05 para tempo de cura selada e resistência à compressão, não se prova a relação.

Tabela A2.10 – Estatística de regressão linear simples - perda de massa aparente.

R múltiplo	0,5883			
R-Quadrado	0,3461		(imersão)	
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	0,5673	0,3172	1,78810886	0,08386378
TIPO de cimento	0,7995	0,2006	3,9848128	0,00039811
R múltiplo	0,62493			
R-Quadrado	0,39054			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	0,7922	0,2647	2,99234852	0,00549466
TIPO de cimento	0,7341	0,1674	4,38454173	0,00013149
R múltiplo	0,74688			
R-Quadrado	0,55783		(imersão)	
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	3,289	0,2609	12,6078828	1,6073E-13
Quantidade cimento	-1,015	0,1650	-6,15197181	9,1242E-07
R múltiplo	0,7222			
R-Quadrado	0,5216		(selada)	
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	3,1659	0,2346	13,4972303	2,7993E-14
Quantidade cimento	-0,8484	0,1484	-5,71873786	3,0676E-06
R múltiplo	0,2006			
R-Quadrado	0,0403		(imersão)	
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	1,8901	0,1640	11,5222758	1,5292E-12
Tempo de cura	-0,0127	0,0113	-1,12178118	0,27085434
R múltiplo	0,2211			
R-Quadrado	0,0489		(selada)	
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	2,0111	0,1412	14,247437	6,831E-15
Tempo de cura	-0,0121	0,0097	-1,24189537	0,22389686

$P < 0,05$ para o tipo de cimento e perda de massa aparente, prova-se a relação.

$P < 0,05$ para a quantidade de cimento e perda de massa, prova-se a relação.

$P > 0,05$ para o tempo de cura (úmida e selada) e perda de massa, não se prova a relação.

Tabela A2.11 – Estatística de regressão linear simples - absorção de água por capilaridade.

R múltiplo	0,5237			
R-Quadrado	0,2743			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	0,0232	0,2468	0,0940	0,92575873
TIPO de cimento	0,5255	0,1561	3,3672	0,00209653
R múltiplo	0,4591			
R-Quadrado	0,2108			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	0,2604	0,2472	1,0532	0,30066887
TIPO de cimento	0,4426	0,1564	2,8308	0,00820948
R múltiplo	0,7030			
R-Quadrado	0,4942			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	1,8695	0,2060	9,0749	4,1722E-10
Quantidade cimento	-0,7054	0,1303	-5,4139	7,24E-06
R múltiplo	0,7781			
R-Quadrado	0,6054			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	2,0495	0,1748	11,7244	9,9505E-13
Quantidade cimento	-0,7501	0,1106	-6,7849	1,5917E-07
R múltiplo	0,2754			
R-Quadrado	0,0759			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	0,9367	0,1188	7,8815	8,5247E-09
Tempo de cura	-0,0128	0,0082	-1,5693	0,12706436
R múltiplo	0,2433			
R-Quadrado	0,0592			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	1,0307	0,1152	8,9460	5,7281E-10
Tempo de cura	-0,0109	0,0079	-1,3744	0,17948943

P < 0,05 para tipo de cimento e absorção de água capilar, prova-se a relação.

P < 0,05 para quantidade de cimento e absorção de água capilar, prova-se a relação.

P > 0,05 para tempo de cura (úmida e selada) e absorção de água capilar, não se prova a relação.

Tabela A2.12 – Estatística de regressão linear simples - perda de massa aparente e absorção de água por capilaridade.

R múltiplo	0,9433			
R-Quadrado	0,8899			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	-0,4189	0,0847	-4,9479	2,6991E-05
PM120úmida	0,6965	0,0447	15,5694	6,4866E-16
R múltiplo	0,9432			
R-Quadrado	0,8896			
Observações	32			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	-0,5412	0,0987	-5,48457846	5,9309E-06
PM120selada	0,7740	0,0498	15,549295	6,7148E-16

$P < 0,05$ para perda de massa e absorção de água capilar (úmida e selada), logo, prova-se a relação.

REFERÊNCIAS

ACKER, P.; ATTOULOU, A.; MENSI, R. **Séchage du béton**: analyse et modélisation, Materials and Structures, vol. 121, 1988, p.3-12.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. PINI, São Paulo, 2000, 667p.

_____. **Cements of yesterday and today Concrete tomorrow**. Cement and Concrete Research, vol.30, 2000, p.1349-1359.

ALMEIDA, I.R. **Os materiais constituintes e as principais características de durabilidade do concreto**. Curso de durabilidade, 43º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Foz do Iguaçu, 2001, 29p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto**: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **Agregados - determinação da composição granulométrica**: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Câmara úmida e tanques para cura de corpos de prova de argamassa e concreto** – especificações: NBR 9479. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**: NBR 5738, 1994.

_____. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR NM 67, 1998.

_____. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **Cimento Portland comum**: NBR 5732, EB-1. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland composto**: NBR 11578, EB-2138. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Agregado em estado compactado seco – determinação da massa unitária**: NBR 7810, EB1. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman**: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da massa específica de agregados graúdos por meio da balança hidrostática**: NBR 9937, 1987.

BALAYSSAC, J.P. **Relations entre performances mécaniques, microstructure et durabilité des bétons**. Thèse de doctorat - Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 1992, 183p.

BALAYSSAC, J.P.; DÉTRICHÉ, C.H.; DIAFAT, N. **Influence de la durée d'une cure humide sur les caractéristiques mécaniques de bétons d'usage courant**. Materials and Structures/Matériaux et constructions, vol.30, 1997, p.284-292.

BALAYSSAC, J.P.; DÉTRICHÉ, C.H.; GRANDET, J. **Intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage**. Materials and Structures/Matériaux et Durabilité des Construction, Toulouse, France, vol.26, 1993, p.226-230.

BALLIM, Y. **Curing and durability of OPC, fly ash and blast-furnace slag concretes**. Materials and Structures, vol.26, 1993, p.238-244.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D.J. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review**. Construction and Building Materials, vol.15, 2001, p.93-103.

BUSSAB W.O; MORETTIN P.A. **Métodos quantitativos**: estatística básica. São Paulo, 1987, 321p.

CARDE, C. **Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques due à la lixiviation des matériaux cimentaires**. Thèse de doctorat - Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 1996, 241p.

_____. **Absorption capillaire**. In: AFREM. Durabilité des bétons. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Toulouse, France, 1997, p.65-74.

CHAUSSADENT, T. **Analyse des mécanismes de carbonatation des bétons**. In: AFREM. Durabilité des bétons. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Toulouse, France, 1997, p.75-86.

DAL MOLIN, D.C.C. **Permeabilidade, difusibilidade e porosidade do concreto: novas propostas de ensaio**. In: Curso de durabilidade, 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu, 2001, 13p.

DAL MOLIN, D.C.C.; ANDRADE, J. **Considerações sobre a avaliação da durabilidade do concreto através da resistência à compressão**. In: Curso de durabilidade, 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu, 2001, 13p.

DIAFAT, N. **Étude de règles de compensation entre durée de cure et dosage en ciment.** Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, France, 1996, 150p.

DIAMOND, S. **Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials.** Cement and Concrete Research, vol.30, 2000, p.1517-1525.

_____. **The microstructure of cement paste in concrete.** In : Congr. Int. de Química do cimento, Rio de Janeiro, Brasil, vol.1, 1986, p.122-147.

DIAMOND, S.; LEEMAN, M.E. **Porosity distributions in hardened cement paste by SEM image analysis.** Materials Research Society, vol.370, 1995, p.217-226.

DELOYE, F.X. **L'analyse du béton durci.** In: Le béton hydraulique. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1982, p.531-541.

ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK. Ceramics and glasses. Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee, vol.4, 1991, p.561-563.

FOLLIOT, A; BUIL M. **La structuration progressive de la pierre de ciment.** In: Le béton hydraulique. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1982, p.223-236.

GARBOCZI, E.J. **Summary of concrete modeling for non-cement research.** Monografia publicada pelo NIST, <http://cisk.ctb.nist.gov/garboz/monograph>, 1997.

HELENE, P.R.L. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto: – princípios gerais – mecanismos de deterioração.** Prescrições da nova NBR – 6118 (NB-1/2001). In: Curso de durabilidade, 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu, 2001, 35p.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e controle do concreto.** PINI, São Paulo, 1992, 349p.

HO, D.W.S.; CHIRGWIN, G.J. **A Performance specification for durable concrete.** Construction and Building Materials, Australia, vol.10, nº.5, 1996, p.375-379.

JENNING, H.; SUJATA, K. **Cementing the future.** vol.8, nº.1, <http://www.nwu.edu/ACBM>, 1996.

LEVY, S.; HELENE, P. **Cura : como quando e por quê.** Técnica - Revista de Tecnologia da Construção, nº.20, Editora Pini, São Paulo, 1996, p.18-21.

LO, Y.; LEE, H.M. **Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy.** Building and environment, vol.37, 2002, p.507-514.

LORENZETTI, U.V.; GLEIZE, P.; FREDEL, M.C. **Influência da relação água/cimento sobre as propriedades físicas e mecânicas de argamassas.** In: 5^o Congresso Brasileiro do Cimento, ABCP, Anais, São Paulo, 1999.

MAGALHÃES M.N.; LIMA A.C.P. **Noções de probabilidade e estatística.** São Paulo, 2000, 379p.

MARTYS, N.S.; FERRARIS, C.F. **Capillary transport in mortars and concrete.** Cement and Concrete Research, vol.27, n^o.5, 1997, p.747-1997.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** PINI, São Paulo, 1994, 573p.

MOURET, M. **Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud.** Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1997, 283p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** PINI, São Paulo, 1997, 738p.

NOLAN, É.; ALI, M.A.; BASHEER, P.A.M.; MARSH, B.K. **Testing the effectiveness of commonly-used site curing regimes.** Materials and Structures/Matériaux et Construction, vol.30, 1997, p.53-60.

OLIVEIRA, L.A.P. **Durabilidade do concreto: considerações sobre métodos de dosagem.** III Congreso Ibero Americano de Patologia da la Construcción, Havana, Cuba, 1995, 9p.

O'REILLY, V.A. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho.** PINI, São Paulo, 1998, 122p

PARROTT, L.J. **Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete** Materials and Structures/Matériaux et Construction, vol.29, 1996, p.164-173.

POON. C.S.; WONG, Y.L.; LAM, L. **The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly-ash cement pastes and mortars.** Construction and Building Materials, vol.11, 1997, p.383-393.

PRATT, P.L. **Physical methods for studying microstructure.** Materials and Structure, vol.21, 1988, p.106-117.

PRICE, W.H. **Factors influencing concrete strength.** J. of ACI, 22(6) , 1952, p.413-432.

QUENARD, D.; CARCASSES, M. **Perméabilité.** In: AFREM. Durabilité des bétons. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Toulouse, France, 1997, p.41-58.

REED J.S. **Principles of ceramic processing**. 1995, p.123-125.

REGATTIERI, C.E.X. **Contribuição ao estudo da influência da dosagem do concreto na absorção capilar e penetração de íons cloretos**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo PCC/USP, CPGEC, São Paulo, 1999, 231p.

REGOURD, M. **L'hydratation du ciment Portland**. In: Le béton hydraulique. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, p.193-221.

_____. **L'eau**. In: Le béton hydraulique. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, p.193-221.

ROUGEAU, P. **Essai de carbonatation accélérée**. In: AFREM. Durabilité des bétons. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Toulouse, France, 1997, p.87-94.

TAYLOR H.F.W. **Cement chemistry**. Academic Press, 1992, 475p.

