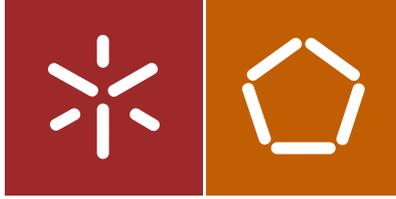




Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Phelipe Marconi Freitas Mattos

Durabilidade do Betão Auto-Compactável de  
Elevado Desempenho Face ao Ataque Químico



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Phelipe Marconi Freitas Mattos

Durabilidade do Betão Auto-Compactável de  
Elevado Desempenho Face ao Ataque Químico

Dissertação de Mestrado  
Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil  
Área de Especialização Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Luis Barroso de Aguiar

julho de 2017

*Os grandes desafios requerem elevado desempenho,  
mas permitem a realização dos maiores sonhos.*



---

## AGRADECIMENTOS

Desenvolvido este trabalho, é imperativo o agradecimento a diversos intervenientes sem os quais não seria possível a realização desta investigação.

Inicialmente a Deus, pelas oportunidades providas e pela presença constante.

À minha família, imensa gratidão por todo apoio para alcançar meu objetivo. Especialmente a meus pais Guilherme e Iara e minhas irmãs Gabrielle e Marcelle, os quais nunca medem esforços para contribuírem para o meu crescimento.

À minha namorada Raissa, pelo carinho e paciência despendidos, sempre solícita e disposta a buscar minha felicidade.

Ao sócio, companheiro nesta jornada e, acima de tudo, amigo, Diego Costa, pela coragem de sonharmos juntos a construção de um mundo melhor.

Ao professor Dr. José Barroso de Aguiar, mestre na arte de ensinar, obrigado pela paciência e ensinamentos ao longo deste trabalho. Ao professor Dr. Normando Perazzo Barbosa, obrigado pelo incentivo. Ao professor Dr. José Marcílio Filgueiras Cruz, obrigado pelos ensinamentos e princípios partilhados.

Aos colegas e amigos do curso, do laboratório, da Universidade do Minho e de Guimarães, muito obrigado.

Aos verdadeiros amigos, serei sempre grato.

---

## RESUMO

A aplicação do betão na construção civil continua sendo intensa e, tendo em vista a existência de impacto sustentável negativo deste material, o desenvolvimento e o conhecimento de novos tipos que minimizem tais ações é imperativo face às novas preocupações mundiais no contexto da sustentabilidade. Surge então o betão auto-compactável de elevado desempenho (BACED) como uma possibilidade viável em termos de comportamentos técnico, ambiental, social e econômico. No entanto, algumas preocupações de cunho patológico surgem e o conhecimento acerca da durabilidade do material se faz necessário. Este trabalho, portanto, visa ao entendimento do comportamento dessa nova tipologia de material cimentício mediante a ação de três agentes químicos específicos: os cloretos, os sulfatos e o dióxido de carbono, com o intuito de avaliar as alterações de desempenho a partir de mudanças na dosagem de cimento e de variações de temperatura nos primeiros dias de cura do betão para o ataque de sulfatos. Do ponto de vista deste, avalia-se com maior ênfase a formação da etringita secundária – Delayed Ettringite Formation (DEF), composto expansivo que pode comprometer consideravelmente as condições de serviço do elemento de construção. Os estudos experimentais decorrem da investigação de três composições distintas, uma de referência convencional com dosagem de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup> e duas caracterizadas como auto-compactáveis de elevado desempenho, sendo uma com dosagem do ligante de 500 kg/m<sup>3</sup> e outra de 600 kg/m<sup>3</sup>. As condições de cura foram também variadas entre as 24h e 48h de vida do material, submetendo os provetes a temperaturas de 20°C, 50 °C e 80°C. Os resultados apontam que os BACED em estudo confirmam a auto-compactabilidade e o elevado desempenho. Para o ensaio de cloretos, o de dosagem de 600 kg/m<sup>3</sup> apresentou menor difusão dos íons, seguido pelo de 500 kg/m<sup>3</sup> e pelo de 400 kg/m<sup>3</sup>. Em termos do ensaio de sulfatos, na análise de DEF há considerável redução da etringita primária em monossulfato, sendo o BC\_400 e o BACED\_600 os que apresentaram maior suscetibilidade à formação do composto tardio devido à temperatura de cura; no ataque por fonte externa de sulfatos, os BACED indicaram perda de massa similar, abaixo da apresentada pelo betão de referência. Quanto à carbonatação, o BACED\_500 é mais suscetível que o BACED\_600, porém ambos indicam menor carbonatação que o BC\_400.

**Palavras-chave:** betão, auto-compactável, elevado desempenho, cloretos, etringita, dióxido de carbono.



---



---

## ABSTRACT

The application of concrete in construction remains strong and, given the existence of negative sustainable impact of this material, the development and knowledge of new types that minimize such actions is imperative given the new global concerns in the context of sustainability. Then arise the high performance self-compacting concrete as a viable possibility in terms of technical, environmental, social and economic behaviors. However, some pathologies concerns knowledge about the durability of the material is required. This study therefore aims at understanding the behavior of this new type of cementitious materials by the attack of three specific chemical agents: chlorides, sulfates and carbon dioxide, in order to assess the behavioral changes from cement content and temperature variations in the first days of curing of the concrete. From the point of view of sulfates, it was evaluated with greater emphasis on the formation of secondary ettringite – Delayed Ettringite Formation (DEF), expansive compound that may affect considerably the service conditions of the construction element. Experimental studies occurs from the investigation of three different compositions, a conventional reference with 400 kg/m<sup>3</sup> cement content and two characterized as high-performance self-compacting concrete, one with dosage of the binder of 500 kg/m<sup>3</sup> and another with 600 kg/m<sup>3</sup>. The cure conditions also varied between 24h and 48h of life of the material, subjecting the sample to 20°C temperature, 50°C and 80°C. The results show that the high-performance self-compacting concretes studied confirm the self-compactness and the high performance. For the test of chlorides, the dosage of 600 kg/m<sup>3</sup> showed lower diffusion of ions, followed by 500 kg/m<sup>3</sup> and the 400 kg/m<sup>3</sup>. In terms of sulfates test, in DEF analysis there is considerable reduction of primary ettringite in monosulfate, and the conventional concrete and the concrete with 600 kg/m<sup>3</sup> are those with the highest susceptibility to the formation of secondary ettringite; about the attack by an external source of sulphates, the high-performance self-compacting concretes indicated similar mass loss, considerably below presented by the reference concrete. About the carbonation, the HPSC\_500 exposes greater susceptibility than HPSC\_600, but both showed better than convencional concrete.

**Key words:** concrete, self-compacting, high performance, chlorides, ettringite, carbon dioxide.



---



---

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Justificativa temática .....	2
1.2	Objetivos .....	5
1.3	Estrutura do trabalho.....	5
<b>2</b>	<b>Revisão da literatura.....</b>	<b>7</b>
2.1	<b>Betão.....</b>	<b>7</b>
2.1.1	Betão Convencional – BC .....	12
2.1.2	Betão Auto-compactável – BAC .....	13
2.1.2.1	Composição do betão auto-compactável.....	14
2.1.2.2	Propriedades do BAC no estado fresco.....	17
2.1.2.3	Propriedades do BAC no estado endurecido.....	19
2.1.3	Betão de Elevado Desempenho – BED .....	20
2.1.3.1	Composição do betão de elevado desempenho .....	23
2.1.3.2	Viabilidade e aplicações do BED.....	25
2.1.4	Betão auto-compactável de elevado desempenho – BACED.....	26
2.1.4.1	Composição do betão auto-compactável de elevado desempenho.....	26
2.1.4.2	Viabilidade e aplicações do BACED .....	27
2.2	<b>Durabilidade e patologia de estruturas de betão .....</b>	<b>28</b>
2.2.1	Histórico .....	28
2.2.2	Definições.....	29
2.2.2.1	Desempenho .....	29
2.2.2.2	Durabilidade .....	30
2.2.2.3	Vida Útil.....	30
2.2.3	Manifestações patológicas em estruturas de betão .....	32
2.2.4	Reações por ação de cloretos.....	34
2.2.5	Reações por ação dos sulfatos .....	36
2.2.6	Formação de etringita secundária (DEF – <i>Delayed Ettringite Formation</i> ).....	38
2.2.6.1	Mineral etringita.....	38
2.2.6.2	Etringita primária .....	39
2.2.6.3	Etringita secundária (DEF – <i>Delayed Ettringite Formation</i> ) .....	40
2.2.6.4	Mecanismo de expansão por DEF.....	48
2.2.6.5	Fatores que controlam a expansão por ocasião da DEF.....	50



2.2.6.6	Sintomatologia devido à expansão por DEF .....	51
2.2.7	Fenômeno de carbonatação .....	52
<b>3</b>	<b>Materiais e metodologias .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b>	<b>Constituintes do betão .....</b>	<b>56</b>
3.1.1	Cimento Portland.....	56
3.1.2	Agregados.....	60
3.1.2.1	Agregados finos.....	61
3.1.2.2	Agregados grossos.....	65
3.1.3	Água .....	66
3.1.4	Adjuvante superplastificante .....	66
<b>3.2</b>	<b>Composição e dosagem.....</b>	<b>67</b>
3.2.1	Composição e dosagem BC_400 kg/m <sup>3</sup> .....	71
3.2.2	Composição e dosagem BACED_3%SP_500 kg/m <sup>3</sup> .....	72
3.2.3	Composição e dosagem BACED_2%SP_600 kg/m <sup>3</sup> .....	73
<b>3.3</b>	<b>Fabricação dos betões .....</b>	<b>74</b>
3.3.1	Betão Convencional: BC_400 .....	75
3.3.2	Betão Auto-Compactável de Elevado Desempenho: BACED_500_3%SP .....	77
3.3.3	Betão Auto-Compactável de Elevado Desempenho: BACED_600_2%SP .....	80
<b>3.4</b>	<b>Ensaio realizados .....</b>	<b>81</b>
3.4.1	Resistência à compressão .....	83
3.4.2	Ataque de cloretos .....	84
3.4.3	Ataque de sulfatos .....	86
3.4.3.1	Ataque de sulfatos por fonte interna .....	87
3.4.3.2	Ataque de sulfatos por fonte externa.....	87
3.4.4	Determinação do potencial de resistência a carbonatação do betão .....	89
3.4.5	Microscopia Eletrônica de Varimento - MEV.....	89
3.4.6	Difração de Raio X - DRX .....	90
<b>4</b>	<b>Análise dos resultados.....</b>	<b>93</b>
<b>4.1</b>	<b>Porosidade .....</b>	<b>93</b>
<b>4.2</b>	<b>Resistência à compressão .....</b>	<b>99</b>
<b>4.3</b>	<b>Difusão de cloretos por migração em regime não estacionário .....</b>	<b>103</b>
<b>4.4</b>	<b>Ataque de sulfatos.....</b>	<b>105</b>
4.4.1	Ataque de sulfatos por fonte interna – Formação de etringita secundária.....	105
4.4.2	Ataque de sulfatos por fonte externa .....	109
4.4.3	Potencial de ocorrência de etringita secundária .....	111

---

<b>4.5</b>	<b>Potencial de resistência a carbonatação.....</b>	<b>112</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão e futuras investigações.....</b>	<b>115</b>
<b>6</b>	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>119</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>123</b>



---

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
APEB	Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto
ASTM	American Society for Testing and Material
BAC	Betão Auto-Compactável
BACED	Betão Auto-Compactável de Elevado Desempenho
BC	Betão Convencional
BED	Betão de Elevado Desempenho
BER	Betão de Elevada Resistência
BUER	Betão de Ultra Elevada Resistência
DEF	Delayed Ettringite Formation
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
NBR	Normas Brasileiras
NP EN	Normas Portuguesas European Norm
RSA	Reações Sílica Álcali



---

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS E COMPOSTOS QUÍMICOS

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio / Alumina
$\text{Ca}_6\text{A}_{12}(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}.26\text{H}_2\text{O}$	Mineral etringita
$\text{CaCl}_2$	Cloreto de cálcio
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de cálcio
$\text{CaO}$	Óxido de cálcio / Cal
$\text{C}_4\text{A}(\text{F})\text{SH}_{18}$	Hidrogranada
$3\text{CaO}. \text{Al}_2\text{O}_3. 3\text{CaSO}_4. 32\text{H}_2\text{O}$	Sulfoaluminato tricálcico hidratado / Etringita
$\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_2. 26\text{H}_2\text{O}$	Sulfoaluminato tricálcico hidratado / Etringita
$3\text{CaSiO}_3. \text{CaCO}_3. \text{CaSO}_4. 15\text{H}_2\text{O}$	Taumasita
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de cálcio
$\text{CaSO}_4. 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cálcio hidratado / Gesso / Gipsita
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono / Anidrido carbônico
$\text{C}_3\text{A} / 3\text{CaO}. \text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico
$4\text{CaO}. \text{Al}_2\text{O}_3. \text{SO}_4. 18\text{H}_2\text{O}$	Sulfoaluminato de cálcio hidratado / Monossulfato
$\text{C}_4\text{AF}$	Aluminoferrato tetracálcio
$\text{C}_2\text{S}$	Silicato bicálcio
$\text{C}_3\text{S}$	Silicato tricálcico
$\text{C-H} / \text{CH} / \text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio / Portlandita
$\text{C-S-H} / 3\text{CaO}. 2\text{SiO}_2. 3\text{H}_2\text{O}$	Silicato de cálcio hidratado
$\text{FeCl}_2$	Cloreto de ferro II
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de ferro III
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido de ferro II



---

$H_2O$	Água
$HCl$	Ácido clorídrico / Ácido muriático
$K_2SO_4$	Sulfato de potássio
$Mg(OH)_2$	Hidróxido de magnésio
$MgSO_4$	Sulfato de magnésio
$NaOH$	Hidróxido de sódio
$Na_2SO_4$	Sulfato de sódio
$(NH_4)_2SO_4$	Sulfato de amônio
$SiO_2$	Dióxido de silício / Sílica
$SO_3$	Óxido sulfúrico



---

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS, UNIDADES E GRANDEZAS

$\text{cm}^2/\text{g}$	Centímetro ao quadrado por grama
$\text{kg}/\text{m}^3$	Quilograma por metro cúbico
$\text{l}/\text{m}^3$	Litro por metro cúbico
$\mu\text{m}$	Micrômetro / micron
m	Metro
mm	Milímetro
mol/l	Mol por litro
nm	Nanômetro
$f_c$	Resistência à compressão simples
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
$\gamma$	Densidade específica
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1– Componentes do betão. ....	7
Figura 2.2 – Mecanismo de tensões internas do BAC.....	19
Figura 2.3 – Modelo representativo de vida útil de estruturas de betão armado a partir do fenômeno de corrosão de armaduras. ....	31
Figura 2.4 – Classificação e dimensões dos poros em betão.....	33
Figura 2.5 – Corrosão da armadura de estrutura inserida em ambiente marinho devido à ação de cloretos.....	36
Figura 2.6 – Bloco de fundação deteriorado por ação de íons sulfatos.....	38
Figura 2.7 – Mineral etringita. a) encontrado em Ettringen, na Alemanha; b) encontrado em Kuruman.....	39
Figura 2.8 – Morfologia da etringita. ....	40
Figura 2.9 – Fatores intervenientes na formação de etringita secundária. ....	42
Figura 2.10 – Fluxograma da formação de etringita secundária. ....	43
Figura 2.11 – Formação dos produtos de hidratação.....	44
Figura 2.12 – Comportamento térmico do cimento nas primeiras horas de hidratação. ....	45
Figura 2.13 – Esquema de formação de etringita secundária por fonte interna de sulfatos. ....	47
Figura 2.14 – Fissura à superfície de uma viga pré-esforçada provavelmente causada por formação retardada de etringita. ....	49
Figura 2.15 – Mecanismo de expansão uniforme da pasta por DEF.....	50
Figura 2.16 – Micrografia em amostra com ocorrência de etringita secundária em poro. ....	52
Figura 2.17 – Micrografia em amostra com ocorrência de etringita secundária. ....	52
Figura 3.1 – Composição dos betões utilizados. ....	56
Figura 3.2 – Composição granulométrica e aspecto da areia britada. ....	62
Figura 3.3 – Ensaio de granulometria.....	62
Figura 3.4 – Curva granulométrica areia britada.....	62
Figura 3.5 – Aspecto areia natural.....	63
Figura 3.6 – Curva granulométrica areia natural.....	64
Figura 3.7 – Aspecto brita 4/8. ....	65
Figura 3.8 – Curva granulométrica brita. ....	66
Figura 3.9 – Betões desenvolvidos.....	68
Figura 3.10 – Betoneira de eixo vertical.....	74
Figura 3.11 – Mesa vibratória.....	74
Figura 3.12 – Resultado do ensaio de abaixamento BC_350 com brita 10/20.....	75
Figura 3.13 – Resultado do ensaio de abaixamento BC_350 com brita 4/8.....	76
Figura 3.14 – Resultado do ensaio de abaixamento BC_400.....	76
Figura 3.15 – Espalhamento de 380 mm BACED_500_2,5%SP com brita 10/20. ....	77
Figura 3.16 – Aspecto BACED_500_2,5%SP com brita 10/20.....	77
Figura 3.17 – Ensaio de espalhamento BACED_500_2,5%SP.....	78
Figura 3.18 – Ensaio de espalhamento BACED_500_1,5%SP.....	78
Figura 3.19 – Ensaio de espalhamento BACED_500_1,5%SP com 50% de areia natural. ....	79
Figura 3.20 – Espalhamento BACED_500_3%SP.....	79
Figura 3.21 – Preenchimento dos moldes cúbicos com BACED_500_3%SP. ....	79



Figura 3.22 – Espalhamento BACED_600_3%SP.....	80
Figura 3.23 – Ensaio de resistência à compressão.....	83
Figura 3.24 – Amostras para ensaio de migração de cloretos. ....	84
Figura 3.25 – Configuração do ensaio de migração de cloretos.....	85
Figura 3.26 – Provetes para medição da profundidade de penetração de cloretos.....	86
Figura 3.27 – Configuração do ensaio de ataque de sulfatos. ....	88
Figura 3.28 – Provetes impermeabilizados para ensaio de resistência a carbonatação. ....	89
Figura 3.29 – Equipamento MEV. ....	90
Figura 3.30 – Amostras revestidas com Au/Pd inseridas no equipamento de MEV.....	90
Figura 3.31 – Equipamento de DRX. ....	91
Figura 4.1 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BC_400_20°C.....	93
Figura 4.2 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BC_400_20°C.....	93
Figura 4.3 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED_500_20°C.....	94
Figura 4.4 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED_500_20°C.....	94
Figura 4.5 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED_600_20°C.....	94
Figura 4.6 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED_600_20°C.....	94
Figura 4.7 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BC_400_50°C.....	95
Figura 4.8 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BC_400_50°C.....	95
Figura 4.9 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED_500_50°C.....	95
Figura 4.10 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED_500_50°C.....	95
Figura 4.11 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED_600_50°C.....	96
Figura 4.12 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED_600_50°C.....	96
Figura 4.13 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BC_400_80°C.....	96
Figura 4.14 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BC_400_80°C.....	96
Figura 4.15 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED_500_80°C.....	97
Figura 4.16 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED_500_80°C.....	97
Figura 4.17 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED_600_80°C.....	97
Figura 4.18 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED_600_80°C.....	97
Figura 4.19 – Quadro fissuratório do BACED_600 devido ao fenômeno de retração.....	101
Figura 4.20 – Análise gráfica dos resultados mecânicos aos 2 e aos 28 dias.....	102
Figura 4.21 – Gráfico ensaio de difusão de cloretos. ....	104
Figura 4.22 - Imagem MEV BC_400 com presença de placas hexagonais de monossulfato e pouca etringita. ....	107
Figura 4.23 – Imagem MEV BACED_500 com presença de placas hexagonais de monossulfato e pouca etringita. ....	108
Figura 4.24 – Imagem MEV BACED_600 com presença de placas hexagonais de monossulfato e pouca etringita. ....	108
Figura 4.25 – Gráfico da variação de massa para o ensaio de ataque de sulfatos por fonte externa. ....	109
Figura 4.26 – Aspectos dos provetes após o ensaio de ataque de sulfatos por fonte externa: a) BC_400; b) BACED_500; c) BACED_600. ....	110
Figura 4.27 – Aferição de profundidade de carbonatação aos 7 dias.....	113
Figura 4.28 – Aferição de profundidade de carbonatação aos 30 dias.....	113
Figura 4.29 – Aferição de profundidade de carbonatação aos 40 dias.....	113



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resistência à compressão do cimento de acordo com sua classe de resistência. .	8
Quadro 2.2 – Equivalência entre os cimentos brasileiros, europeus e norte-americanos e sua composição típica. ....	9
Quadro 2.3 – Métodos de ensaio para caracterização de BAC. ....	17
Quadro 2.4 – Limites para caracterização de BAC segundo EN 12350.....	18
Quadro 2.5 – Limites de classificação quanto às propriedades mecânicas do betão.....	21
Quadro 3.1 – Tipologia de cimentos de acordo com a NP EN 197-1/2012. ....	57
Quadro 3.2 – Valores limites para as classes de cimento. ....	58
Quadro 3.3 – Características químicas do cimento Portland 42,5 R SECIL. ....	59
Quadro 3.4 – Características físicas do cimento Portland 42,5 R SECIL. ....	59
Quadro 3.5 – Características mecânicas do cimento Portland 42,5 R SECIL. ....	59
Quadro 3.6 – Classificação dos agregados para betão.....	61
Quadro 3.7 – Massas volúmicas areia britada. ....	63
Quadro 3.8 – Ficha técnica areia natural. ....	64
Quadro 3.9 – Ficha técnica brita.....	65
Quadro 3.10 – Ficha técnica superplastificante GLENIUM® SKY 617. ....	67
Quadro 3.11 – Categorias de vida útil. ....	68
Quadro 3.12 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos. ....	69
Quadro 3.13 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos. ....	69
Quadro 3.14 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do gelo/degelo, para uma vida útil de 50 anos. ....	69
Quadro 3.15 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ataque químico, para uma vida útil de 50 anos. ....	70
Quadro 3.16 – Classes de abaixamento e espalhamento de betões auto-compactáveis. ....	70
Quadro 3.17 – Valores dos parâmetros A e B da curva de Faury. ....	71
Quadro 3.18 – Dosagem BC_400.....	72
Quadro 3.19 – Dosagem BACED_500. ....	73
Quadro 3.20 – Dosagem BACED_600. ....	74
Quadro 3.21 – Resultados dos ensaios com o BC_400 no estado fresco. ....	77
Quadro 3.22 – Resultados dos ensaios com o BACED_500_3%SP no estado fresco. ....	79
Quadro 3.23 – Resultados dos ensaios com o BACED_600 no estado fresco.....	80
Quadro 3.24 – Configuração de provetes. ....	82
Quadro 3.25 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de um provete de betão com uma dosagem normal de ligante, Anexo 2. ....	85
Quadro 4.1 – Porosidade aos 2 dias.....	98
Quadro 4.2 – Porosidade aos 70 dias.....	98
Quadro 4.3 – Resultados ensaio de resistência à compressão aos 2 dias. ....	99
Quadro 4.4 – Resultados ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. ....	99
Quadro 4.5 – Resultados ensaio de resistência à compressão aos 70 dias. ....	99
Quadro 4.6 – Resultados ensaio de difusão de cloretos. ....	103



---

Quadro 4.7 – Classificação quanto à difusão de cloretos.....	104
Quadro 4.8 – Teor de etringita aos 28 dias – quantificação de etringita. ....	105
Quadro 4.9 – Teor de etringita aos 70 dias – quantificação de etringita. ....	105
Quadro 4.10 – Resultados ensaio ataque de sulfatos por fonte externa. ....	109
Quadro 4.11 – Classificação quanto à potencialidade na formação de etringita secundária..	112
Quadro 4.12 – Resultados ensaio de profundidade de carbonatação. ....	112
Quadro 7.1 – Composição BC_400 kg/m <sup>3</sup> . ....	123
Quadro 7.2 – Composição BACED_500 kg/m <sup>3</sup> . ....	126
Quadro 7.3 – Composição BACED_2%SP_600 kg/m <sup>3</sup> . ....	130
Quadro 7.4 – Resultados de autocontrolo CEM I 42,5 R Secil. ....	134





# 1 INTRODUÇÃO

---

As obras de engenharia apresentam, ao longo do tempo, uma evolução tecnológica significativa que tem proporcionado uma melhor servicibilidade aos usuários. Em decorrência deste crescimento, a durabilidade e o desempenho desses produtos e sistemas, construídos e em desenvolvimento, são questões que têm preocupado diversos setores da construção civil, o que demanda estudos mais intensos acerca das manifestações patológicas às quais podem ser submetidos.

Estas questões problemáticas constituem objeto inserido na engenharia desde as primeiras construções. De acordo com a literatura histórica, em torno de 1700 a.C., o Código de Hamurabi, por exemplo, em seu inciso XIII, já promovia a preocupação com a durabilidade de estruturas, quando legislou em termos de punição aos que não construísem edificações sólidas ou que suas obras, por ruína, causassem danos a outrem, obrigando os construtores a considerarem com veemência aspectos como a rigidez e a qualidade.

Em contrapartida, Mattos *et al.* (2015) afirmam que apesar de obras bastante sólidas e estáveis, a ideia concebida, em geral, até ao último século, às construções que apresentassem sinistros, era a de demolir para reconstruir, exceto quanto aos monumentos históricos, de tal modo que a geração de resíduos e a exigência de mais energia eram questões bastante relevantes. A partir de então, com as mudanças socioeconômicas internacionais vigentes à época, a humanidade passou a considerar com maior ênfase, despendendo vários estudos sobre, a questão da durabilidade e manutenção de edificações.

Com a intensificação dos estudos na área, as manifestações patológicas, em especial as de cunho estrutural, passaram a ser monitoradas e catalogadas, pois, assim como na medicina, a discussão sobre novas soluções muitas vezes são baseadas em métodos resolutivos já utilizados, norteados os profissionais. Desse modo, expressões práticas como fissuração, manchas, ninhos, esfarelamento, ferrugem, entre outras podem ser mais facilmente analisadas, de modo que hoje em dia já se pode ter uma posição mais lapidada a respeito do possível mecanismo de degradação que atinge a edificação, promovendo, portanto, um conhecimento mais sólido e completo.

Do ponto de vista do betão, sabe-se que este é o segundo material mais empregado no mundo, situando-se após a água em consumo. Logo, considerando que este material é bastante aplicado em estruturas de engenharia civil, é imperativa a necessidade do desenvolvimento de



estudos acerca do seu comportamento e da sua durabilidade face às condições às quais normalmente se submete.

## 1.1 JUSTIFICATIVA TEMÁTICA

Ao longo dos anos, as estruturas e construções no mundo têm exigido cada vez mais dos materiais que dispõem. A busca incessante pela otimização do produto torna a existência de objetos com nível tecnológico elevado um fator indispensável para a evolução da engenharia civil no mundo.

Neste contexto se inserem os betões auto-compactáveis (BAC) e os de elevado desempenho (BED). Com caráter especial, apresentando resultados diferenciados do convencional e que facilitam o dia-a-dia em obra, esses materiais têm se consolidado no mercado da construção como alternativas viáveis na busca pela referida otimização.

Em termos de aplicabilidade, cenários de fundações, especialmente as profundas, e em que os elementos de betão são solicitados química e mecanicamente a elevados níveis de desempenho, como obras cuja resistência à compressão necessária é elevada ou onde a agressividade química é potencial, por exemplo, o betão auto-compactável de elevado desempenho (BACED) se faz uma opção interessante e que já vem sendo bastante usual.

A nível de Portugal, o betão é o material mais despendido nas estruturas de engenharia civil e, nos últimos anos, o betão auto-compactável tem aos poucos se inserido nas obras. O de elevado desempenho, por sua vez, surge sempre na medida em que o nível de exigência de performance é elevado, mas ainda limitado aos casos especiais, isto é, não é uma situação corrente.

No Brasil, o betão auto-compactável já é bastante usual, principalmente nas frequentes fundações profundas e nas grandes obras em que a compactação se torna difícil. Aliado a isto, materiais com exigências técnicas altas, especificamente resistência à compressão, têm sido bastante empregados. Betões com baixa porosidade, elevada facilidade de manuseio e com resistências acima de 50 MPa são uma realidade corriqueira no país em suas obras especiais.

Com o crescimento do uso desses materiais tanto em Portugal e no Brasil como no mundo, a união das características do auto-compactável com o de elevado desempenho tem sido uma vertente possível e potencial, denotando uma temática cujo estudo se faz imperativo.

Na conjuntura da análise do seu comportamento, o desenvolvimento de pesquisas acerca da durabilidade deste tipo de betão permite prover mais aceitabilidade ao material, bem

como maior eficiência nas suas aplicações, tendo em vista o conhecimento da sua conduta perante os diversos intervenientes aos quais está normalmente exposto.

É sabido, portanto, que o betão é um material sensível a vários tipos de agentes agressivos, os quais podem atuar com maior ou menor intensidade, a depender das características do betão e das condições de exposição. Dentro desta gama de possíveis situações deletérias, duas conjunturas tomam destaque no âmbito do betão auto-compactável de elevado desempenho, são o ataque de cloretos e o ataque de sulfatos com formação de etringita secundária. Além disso, o nível de resistência à carbonatação é outro fator importante no estudo da durabilidade de betões.

O ataque de cloretos é um tipo de atuação insalubre bastante perigosa no que diz respeito à durabilidade do betão, mas principalmente quanto à deterioração do aço em situações de betão armado. Os íons de cloro promovem a corrosão do elemento metálico podendo levar à sua total depreciação e colocar em risco a vida da construção e dos seus usuários. É portanto um tipo de atuação patológica que merece bastante atenção, principalmente devido ao fato de o betão estar em sua maioria associado ao aço nos usos da engenharia.

A formação de etringita secundária devido ao ataque de íons  $\text{SO}_4^{2-}$ , por sua vez, se caracteriza como degradante a partir do momento em que é expansiva e promove a micro e a macro fissuração do betão, acarretando em grande prejuízo ao desempenho do material. Uma correlação importante para o desenvolvimento deste estudo com betões de elevado desempenho decorre do fato de que tal contexto tem o princípio de que quanto maior o consumo de cimento, maior o potencial para a formação tardia da etringita. Sendo assim, sabendo-se que os BED assumem dosagens de cimento altas, normalmente acima de 400  $\text{kg/m}^3$ , aponta-se a grande viabilidade para o entendimento deste fenômeno nesse tipo de betão.

O fenômeno de carbonatação, por sua vez, tem como principal implicância relevante a redução do pH do betão. Isto, no entanto, para aplicações de betão armado, promove a despassivação da armadura, tornando-a suscetível ao ataque de agente deletérios.

Outro cenário que justifica esta pesquisa está inserido no âmbito da questão *sustentabilidade*. Nos últimos anos a Europa e o mundo têm discutido com maior veemência o assunto, visto que a minimização dos impactos ambientais, sociais e econômicos são um fator que ganha cada vez mais força, principalmente devido às grandes alterações que envolvem o planeta no contexto dessas três dimensões.

É fato que a população mundial tem sofrido bastante com as mudanças ambientais que o planeta vem apresentando. O betão, contraditoriamente, é um tipo de material cujo impacto é prejudicial ao meio; no entanto, seu uso é necessário para que as pessoas produzam suas edificações e deem continuidade à evolução da humanidade. A alternativa está, então, no investimento em tecnologias de betão que proporcionem a redução desses impactos. É neste ponto que os betões auto-compactáveis de elevado desempenho surgem potenciais na dimensão ambiental. O uso deste material proporciona algumas medidas que corroboram com esse pensamento sustentável, como o menor consumo de água em virtude da redução do fator água/ligante, a menor geração de ruídos devido à não necessidade de vibração do betão e a redução de geração de resíduos face à menor necessidade de intervenções de reabilitação devido ao melhor desempenho do material. O revés, no entanto, está no maior consumo de cimento, que implica em maior dispêndio de energia para fabricação desse tipo de betão.

Deve-se ainda colocar a substituição parcial do cimento por adições pozolânicas como uma alternativa muito eficaz no que diz respeito à preocupação ambiental. Isto pode promover a redução de consumo energético e o reaproveitamento de resíduos, como no caso de aplicação de cinzas volantes ou escórias de alto forno. Neste estudo, entretanto, observou-se o comportamento do betão sem a substituição parcial do cimento já que um dos seus objetivos é a avaliação da formação de produtos da hidratação deste ligante.

Em termos sociais, a aplicação do BACED é bastante promissora quanto à redução de ruídos e de recursos de manutenção. O fato de não ser necessária a vibração do betão para compactá-lo em obra suprime os efeitos auditivos danosos causados aos trabalhadores envolvidos no processo. Já o aumento do desempenho do material proporciona a elevação da sua vida útil e da sua resistência aos agentes agressivos, o que reduz a necessidade de dispender maiores recursos, por parte dos usuários, na fase de manutenção do edifício.

Por fim, a dimensão sustentável econômica é favorecida tanto pela redução de custos da construção como pela redução de gastos com manutenção. Ao primeiro benefício estão relacionados os fatos de aumento de produtividade e de diminuição de seções estruturais que proporcionam menores custos de produção. Quanto à minimização dos custos de manutenção, a justificativa também se baseia no princípio de que à medida em que a resistência do material frente aos ataques de agentes deletérios é maior, sua necessidade de manutenção é reduzida, ou pelo menos minimizada.

O betão auto-compactável de elevado desempenho é, portanto, um material de grande potencialidade e cuja durabilidade merece grande atenção, de modo a proporcionar à literatura maior contribuição no âmbito da sua aplicação.

## 1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa objetiva o estudo aprofundado da durabilidade de betões auto-compactáveis de elevado desempenho mediante o ataque de dois agentes agressivos específicos, os cloretos e os sulfatos, bem como quanto ao grau de suscetibilidade à carbonatação.

Assim, é expectado o desenvolvimento das seguintes análises:

- Investigação da permeabilidade de betões auto-compactáveis de elevado desempenho face à exposição a ambientes saturados de íons de cloro;
- Investigação e comparação da ocorrência de formação de etringita secundária em betões auto-compactáveis de elevado desempenho face ao ataque de sulfatos e à elevação da temperatura de cura do betão;
- Investigação do nível de suscetibilidade ao fenómeno de carbonatação;
- Investigação das propriedades químicas e mecânicas de betões auto-compactáveis de elevado desempenho.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Visando à melhor disposição do conteúdo, esta dissertação está organizada em sete capítulos.

O capítulo 1 contém a introdução à pesquisa, em que são ressaltados a importância do tema na conjuntura atual, os objetivos a serem alcançados na investigação e a descrição da estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, em que são abordados os conhecimentos disponíveis na bibliografia. Foram discutidos o betão e suas tipologias envolvidas no estudo, bem como as manifestações patológicas bases para o trabalho.

O terceiro capítulo envolve a descrição dos materiais e metodologias utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa. Aqui são apontadas as normas e diretrizes utilizadas e descritos os materiais e métodos empregados para o alcance dos objetivos propostos.

No capítulo 4 a análise dos resultados é dissertada, abordando-se as informações e os valores obtidos a partir dos ensaios experimentais, em termos do ataque de cloretos, de sulfatos, do ensaio de carbonatação, do DRX e do MEV.

Por fim, o capítulo 5 concerne à discussão das considerações finais, abordando as conclusões obtidas e as proposições para trabalhos futuros.

O capítulo 6 indica a bibliografia utilizada no desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 7 é destinado aos documentos anexos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 BETÃO

Há algumas décadas, o betão tem se firmado como o segundo maior produto consumido no mundo, sendo ainda despendido para situações continuamente inovadoras e que requerem desempenhos cada vez mais satisfatórios. Logo, este é um material que tem sido estudado regularmente e com maior ênfase, em busca do seu aperfeiçoamento. Em escala portuguesa, o betão é normatizado por diversas referências, sendo as mais aceitas a EN 206-1 de 2013 e a NP EN 13670-1 de 2008. No Brasil, a NBR 6118:2014 é a principal responsável por reger o uso do concreto em estruturas.

De maneira geral, é um material compósito, constituído pelos agregados – grossos e finos, pelo ligante hidráulico e pela água, podendo-se inserir ainda as adições e os adjuvantes neste meio (figura 2.1). Logo, ao haver a hidratação do ligante, surge então uma pasta capaz de aglomerar os demais elementos, dando origem assim ao betão.



Figura 2.1– Componentes do betão.  
Fonte: Acervo pessoal

Os agregados são classificados em grossos ou finos, sendo caráter destes dimensões das partículas iguais ou inferiores a 4 mm e daqueles medidas iguais ou superiores a 4 mm. Quanto à origem, podem advir de processo natural, artificial ou de reciclagem, tal que suas propriedades variam de acordo com sua proveniência; entretanto isto não altera seu

comportamento como agregado, que, de maneira geral, é o de preenchimento. Entre os grossos, há ainda a subdivisão em relação à densidade, tal que, de acordo com Loureiro (2013), podem ser denominados leves –  $\gamma \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ , normais –  $2000 \text{ kg/m}^3 \leq \gamma \leq 3000 \text{ kg/m}^3$  ou pesados –  $\gamma \geq 3000 \text{ kg/m}^3$ .

Como afirmado, é preciso que um dos componentes do betão atue aglutinando os demais, proporcionando coesão e homogeneidade à mistura, é o ligante hidráulico. Usualmente, o cimento Portland é o material mais despendido para este fim no que se refere à produção de betão, podendo ser ainda parcialmente substituído por materiais pozolânicos. O cimento é um material cerâmico que, ao ser hidratado, inicia um processo exotérmico de cristalização estável e irreversível, conferindo-lhe, e neste caso também ao betão, resistência mecânica, além de promover interação química com os elementos que envolve. A NP EN 197-1 de 2012 classifica e indica os vários tipos de cimento disponíveis no mercado da construção civil, que podem ser do tipo I, II, III, IV ou V e ainda variar de acordo com as adições inseridas na fabricação do material. Neste universo, a mesma norma define três classes, são a classe 32,5, classe 42,5 e classe 52,5, as quais se referem à resistência mecânica à compressão do cimento aos 28 dias. A cada classe atribui-se ainda a denominação N (normal) ou R (rápido), indicando a velocidade do aumento da resistência do cimento nas primeiras idades. O quadro 2.1 indica valores de referência para a resistência à compressão em função das três classes de cimento elucidadas.

Quadro 2.1 – Resistência à compressão do cimento de acordo com sua classe de resistência.

Fonte: NP EN 197-1 (2012)

Classe de resistência	Resistência à compressão MPa			
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	
	2 dias	7 dias	28 dias	
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 52,5$	-
42,5 R	$\geq 20,0$	-		
52,5 N	$\geq 20,0$	-		
52,5 R	$\geq 30,0$	-		

As classes 32,5 e 42,5 são as mais utilizadas na fabricação de betão; o de classe 52,5, por sua vez, é mais aplicado quando se pretende obter betões de elevada resistência. Normalmente, o cimento é dosado em teores que variam de  $300 \text{ kg/m}^3$  a  $500 \text{ kg/m}^3$ . Essas dosagens, entretanto, podem chegar a  $800 \text{ kg/m}^3$ .

As matérias-primas do cimento Portland são constituídas por óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que são misturados e submetidos a temperaturas entre 1400 °C e 1600 °C, culminando na formação do clínquer, cujos principais compostos são o silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), o silicato bicálcio (C<sub>2</sub>S), o aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), o aluminoferrato tetracálcio (C<sub>4</sub>AF) e o gesso (CaSO<sub>4</sub>), que é adicionado após a fabricação do clínquer em função do retardo da hidratação do aluminato tricálcico. Em termos de betão, ao reagir com a água, o cimento produz alguns compostos, sendo o mais importante deles o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável por conferir-lhe resistência mecânica. Dentre os constituintes do clínquer citados, o C<sub>3</sub>S e o C<sub>2</sub>S são os que originam o C-S-H, de tal modo que os cimentos que apresentam maiores teores de silicatos tricálcico e bicálcio são melhores mecanicamente, e ainda mais potenciais quando apresentam menor teor de aluminatos, já que estes em nada contribuem com a resistência mecânica e podem interagir internamente promovendo danos ao betão. É importante observar que o C<sub>3</sub>S promove a formação de silicatos de cálcio hidratado nas primeiras idades de cura, contribuindo para a resistência inicial – aos primeiros dias; já o silicato bicálcio é menos reativo e portanto mais solicitado nas idades posteriores, proporcionando o ganho contínuo de resistência até sua estabilização aos 28 dias.

A nível global, Skalny *et al.* (2002) apresentam um estudo comparativo entre os tipos de cimento dos Estados Unidos da América, do Brasil e os europeus (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Equivalência entre os cimentos brasileiros, europeus e norte-americanos e sua composição típica.  
Fonte: Skalny *et al.* (2002)

Cimento Americano	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V	Tipo IS	Tipo IP
Norma ASTM	C150-86 <sup>1</sup>	C150-86 <sup>1</sup>	C150-86 <sup>1</sup>	C150-86 <sup>1</sup>	C150-86 <sup>1</sup>	C595-09 <sup>2</sup>	C595-09 <sup>2</sup>
Cimento Europeu	CEM I	CEM II	CEM I	-	-	CEM III	CEM IV
Norma	EN 197-1 <sup>3</sup>	EN 197-1	EN 197-1	-	-	EN 197-1	EN 197-1
Cimento Brasileiro	CP I	CP II	CP V – ARI	BC	RS	CP III	CP IV
Norma ABNT	NBR 5732 <sup>4</sup>	NBR 11578 <sup>5</sup>	NBR 5733 <sup>6</sup>	NBR 13116 <sup>7</sup>	NBR 5737 <sup>8</sup>	NBR 5735 <sup>9</sup>	NBR 5736 <sup>10</sup>
C <sub>3</sub> S (%)	42-65	35-60	45-70	20-30	40-60		
C <sub>2</sub> S (%)	10-30	15-35	10-30	50-55	15-40		
C <sub>3</sub> A (%)	0-17	0-8	0-15	3-6	0-5		
C <sub>4</sub> AF (%)	6-18	6-18	6-18	8-15	10-18		
Área Superficial Específica (m <sup>2</sup> /kg)	300-400	280-380	450-600	280-320	290-350		

(1 - ASTM, 1986; 2 - ASTM, 2009; 3 - CEN, 2000; 4 - ABNT, 1991b; 5 - ABNT, 1991a; 6 - ABNT, 1991c; 7 - ABNT, 1994; 8 - ABNT, 1992; 9 - ABNT, 1991d; 10 - ABNT, 1991e)

A água de amassadura é o item cuja função é promover a ativação química do ligante e proporcionar fluidez ao betão de modo a conferir-lhe trabalhabilidade, sendo regida em



Portugal pela NP EN 1008 de 2003. Seu teor é geralmente expresso com base no componente de aglutinação através da relação água/ligante (a/l). Tendo em vista suas duas finalidades, é relevante apontar que o volume de água destinado para o fator trabalhabilidade pode proporcionar o enfraquecimento da pasta de cimento ao exsudar e dar lugar a montantes vazios, além de, nos casos em que é aprisionado dentro do betão, proporcionar meios difusores aos agentes químicos agressivos ao atuar como eletrólito. Para betões convencionais, a relação a/l é designada entre 0,40 e 0,60 normalmente; para os de elevado desempenho e para os auto-compactáveis esta fração reduz para valores abaixo de 0,40.

Outros elementos relevantes acerca do betão são os adjuvantes e as adições, produtos utilizados, em geral, para proporcionar melhorias na aplicação e no desempenho do material, apresentando funções como a alteração da fluidez, o retardo ou aceleração do tempo de pega, a diminuição da segregação e do consumo de cimento, entre outros. Com base nas referências portuguesas, os adjuvantes são regidos pela NP EN 934 de 2009. De acordo com Dacol (2012), segundo Arnaldo Battagin, membro do conselho diretor do Instituto Brasileiro do Concreto (Ibracon) e gerente dos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), as principais diferenças entre aditivos (adjuvantes) e adições estão em sua origem e em suas propriedades. Aditivos, explica o engenheiro, são produtos químicos adicionados em pequena quantidade aos betões de cimento Portland e que não apresentam propriedades ligantes, mas modificam a cinética de hidratação do cimento. Já as adições, "geralmente utilizadas em quantidades maiores, são de origem mineral e, por comumente apresentarem propriedades ligantes, são usadas para substituir parte do cimento e para a obtenção de betões com certas características especiais", define. Citam-se os seguintes produtos: retardador de pega, acelerador de pega, incorporador de ar, plastificante, superplastificante, escórias, pozolanas, fíler, etc. Destacam-se os adjuvantes superplastificantes e as adições pozolânicas.

Os superplastificantes atuam majorando o abatimento e a trabalhabilidade do betão, tornando-o mais fluido. O processo ocorre porque o aditivo é adsorvido pelas partículas do cimento e pelas adições conferindo-lhes ionização com cargas de mesmo sinal (negativas) que se repelem, o que proporciona a dispersão e desfloculação da pasta e, então, o aumento da fluidez do betão. Isto proporciona a redução da quantidade de água destinada para fins de trabalhabilidade, o que implica na diminuição da relação água/ligante, de modo que é possível atingir também resistências mais elevadas com o uso desses adjuvantes, já que a formação de vazios é minimizada com a redução da água destinada ao fator trabalhabilidade. É importante ainda observar que os compostos  $C_3A$  e  $C_4AF$  são bastante propensos à reação com os



sulfonatos presentes nos superplastificantes, o que pode anular o efeito deste produto. Sendo assim, e sabendo-se que os aluminatos de cálcio e os aluminoferratos tetracálcio hidratam primeiro, é necessário adicionar o superplastificante instantes após o início da mistura, de modo a esperar a hidratação primária destas partículas de cimento e então proporcionar maior eficiência à ação do adjuvante, que irá assim reagir com os principais compostos do ligante, isto é, o  $C_3S$  e o  $C_2S$ . Como estes são os constituintes mais abundantes do cimento e os responsáveis por conferir resistência mecânica após sua hidratação, é certo que a atuação do superplastificantes deve ocorrer sobre eles. Há ainda a problemática dos produtos da hidratação do  $C_3A$  e do  $C_4AF$ , que afetam a trabalhabilidade do betão ao dificultar o escoamento da pasta. Logo, a otimização advém da redução destes compostos, isto é, os cimentos que apresentam reduzido percentual desses constituintes são os mais interessantes do ponto de vista da atuação dos superplastificantes.

Tendo em vista que as adições atuam sobre diversos aspectos do betão, tem-se portanto variados tipos, subdivididos em duas dimensões – as adições tipo I e tipo II. Estas são produtos inorgânicos que atuam também como ligantes ao interagir com os produtos da hidratação do cimento; já aquelas são denominadas de fíler e têm a função de preencher os vazios não ocupados pelos demais componentes do betão. As adições pozolânicas atuam, em geral, como materiais ligantes e inibidores de determinadas reações patológicas, pois reagem com o hidróxido de cálcio (C-H) proveniente da hidratação do cimento, formando novos compostos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) – responsável por conferir resistência ao betão, proporcionando assim a redução do consumo de cimento e um material com melhor desempenho. Este ciclo é denominado de *efeito pozolânico*. Outra aplicação para essas adições se dá no âmbito do *efeito filler*, em que são utilizados para fins de preenchimento e então aumento da compacidade do betão.

No que diz respeito às suas propriedades, do ponto de vista da mecânica o betão apresenta excelente resistência à compressão e baixa capacidade de oposição aos esforços de tração, sendo aquela qualidade sua principal virtude. No âmbito da resistência de cada constituinte, discute-se aqui o material como uma união de matriz cimentícia e agregados.

De maneira geral, um dos constituintes apresenta resistência mecânica maior do que outro, tal que é necessário intervir naquele mais fraco mecanicamente, em geral a pasta, para que se consiga um betão mais resistente. No entanto, deve-se observar que proporcionar um grande aumento da resistência do elemento mais deficiente, tal que ultrapasse as propriedades mecânicas do outro, não é uma solução adequada, tendo em vista que se pode originar concentração de tensões assim como as da situação inicial. Desse modo, a condição mais



favorável é aquela em que ambos, pasta de cimento e agregado, apresentam rigidezes similares. Em termos da matriz, isto se obtém através da minimização da zona de transição que envolve os agregados, pelo seu fortalecimento a partir da formação de C-S-H ou composto de propriedade mecânica similar e pela redução da porosidade. Tendo em vista que esta região de interface é composta em boa parte por hidróxido de cálcio – composto volumoso e fraco, o uso de adições pozolânicas para reagir com este componente permite não só a redução da zona frágil como o fortalecimento da pasta. Sob o aspecto do agregado grosso, a sua resistência à compressão é o principal fator a ser considerado quando se almeja alterar as propriedades mecânicas do betão.

Em termos de físico-química, as propriedades variam de acordo com a composição e com o tipo de componentes utilizados. No entanto, são relevantes as condições de trabalhabilidade e de porosidade de um betão, pois se relacionam com a logística de aplicação do material e com a sua durabilidade.

Atualmente é possível elencar vários tipos de betão, os quais variam de acordo com suas características de composição e suas aplicações. Citam-se: Betão Convencional (BC), Betão de Elevado Desempenho (BED), betão para pavimentação, Betão Auto-compactável (BAC), betão poroso, betão pesado, betão leve, betão rolado, entre outros. Destacam-se aqui os tipos *Convencional*, de *Elevado Desempenho* e o *Auto-compactável*.

### **2.1.1 Betão Convencional – BC**

Um dos tipos mais utilizados nas obras, é composto essencialmente pelos elementos básicos do betão, isto é, cimento, agregados grossos e finos e água, podendo ainda conter adjuvantes e adições. Sua relação a/l se apresenta em um intervalo de 0,40 a 0,60, normalmente.

O termo convencional surgiu após o desenvolvimento dos betões especiais, quando se pôde comparar o mesmo material com características distintas. No entanto, tendo em vista que os requisitos para sua composição diferem de acordo com o lugar de aplicação, define-se como sendo convencional todo betão despendido usualmente na região em que se discute o material, isto é, todo aquele que é denominado padrão e é base para os betões designados por especiais naquela localidade.

Trata-se de um material com três regiões bem definidas no seu estado endurecido, são a pasta de cimento, a zona de transição e os agregados. A primeira é formada pelos produtos dos finos hidratados, em que há a presença de silicatos, aluminatos e compostos de ferro, bem como de álcalis, tornando o meio básico. A região entre a pasta e o agregado é denominada de



interface ou zona de transição, onde há a interação química entre os elementos que a circundam e também o depósito de elementos inertes e avulsos que estejam presentes no betão, como a água em excesso aprisionada e os compostos de hidróxido de cálcio que não reagiram com os finos. Sabe-se que esta é a região de menor resistência no material, devido à sua propensão ao acúmulo de vazios e da água aprisionada, bem como em virtude da elevada presença de hidróxido de cálcio no meio, composto que possui ligações químicas fracas, além de ser expansivo. Neste contexto, a resistência limite do betão convencional está diretamente relacionada à resistência desta zona, sendo dado por ela o rompimento do material. Por fim, a dimensão agregado é caracterizada pela função de enchimento, sendo pouco ou, na maioria das vezes, nada solicitada no que diz respeito à resistência mecânica.

Há dois estados em que se apresenta o betão, o fresco e o endurecido. O período após a sua produção até ao momento em que o aglomerante inicia seu processo de pega é denominado de estado fresco e nele são relevantes quatro principais aspectos, que são a consistência, a plasticidade, a exsudação e a trabalhabilidade. Quanto à consistência e à plasticidade, o betão convencional apresenta-se como um material de segregação moderada, mas não muito maleável. Já em termos de exsudação, o fenómeno ocorre em função da relação água/ligante utilizada, variando de acordo com a dosagem e com o clima ao qual se submete a peça construtiva. A trabalhabilidade, por sua vez, está relacionada à porcentagem de água a ela destinada e ao tipo de ligante utilizado, tendo em vista que a dispersão da pasta se mantém no convencional a partir da ação hídrica.

O estado endurecido do betão é definido pelo seu momento de início de pega, isto é, limitado apenas pelo instante em que é principiada a pega do aglutinante. As propriedades do material agora são atidas à resistência mecânica e à porosidade. À compressão, o convencional atua com excelência até valores de 40 MPa, já à tração pode-se referir a 10% deste valor, o que, a nível das estruturas usuais é insuficiente, sendo necessária a presença de armadura. Uma outra propriedade bastante proeminente é a durabilidade do betão. A ela está relacionada o grau de porosidade do material, tendo em vista que quanto mais poroso, mais permeável será e, portanto, mais suscetível ao ataque de agentes agressivos. O betão convencional é um material poroso, apresentando vazios na matriz cimentícia que podem permitir a difusão de elementos externos e amortizar a rigidez do elemento construtivo.

### **2.1.2 Betão Auto-compactável – BAC**

Originado no Japão, o conceito básico do Betão Auto-compactável (BAC) foi desenvolvido pelo professor Okamura da Universidade de Tóquio em 1988. Seus estudos



foram originados da necessidade de betões mais duráveis no Japão na década de 1980, quando ocorreram diversos casos de manifestações patológicas no âmbito deste material, em virtude da redução de qualidade das obras decorrente da escassez operária.

Conceitualmente, Poulson (2002) define este tipo de betão como sendo o material capaz de fluir e compactar-se apenas por meio do peso próprio, preenchendo toda a cofragem, mesmo em caso de armadura densa, sem a necessidade de qualquer vibração e mantendo a homogeneidade. Trata-se portanto de um material com elevada trabalhabilidade e compacidade.

O mesmo autor ainda afirma que os principais ganhos obtidos pela aplicação do BAC são: agilidade na construção, redução de mão-de-obra, redução de custos globais, facilidade para execução de acabamento, facilidade no lançamento, aumento da durabilidade, liberdade para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos, redução de poluição sonora devido à vibração e ambiente de trabalho mais seguro. Neste contexto, é fato que o betão auto-compactável é bastante potencial para a corrente aplicação nas mais diversas obras de engenharia civil. De acordo com os estudos de Stanciu et. al. (2013), em que foram comparados betões auto-compactáveis, pode-se concluir que este material se apresenta muito vantajoso em aspectos de trabalhabilidade, resistência mecânica à compressão, resistividade elétrica, difusão de íons cloreto, profundidade de carbonatação, absorção de água por capilaridade e índice de vazios.

### ***2.1.2.1 Composição do betão auto-compactável***

A constituição convencional do betão é mantida, entretanto o uso do superplastificante é condição para que se obtenha a auto-compactabilidade. As adições são em geral também aplicadas, auxiliando na compactabilidade e na inibição de reações que anulem o efeito dos superplastificantes. Poulson (2002) indica que a obtenção da capacidade de auto-compactabilidade deriva dos seguintes requisitos:

- Relação água/ligante, em termos de volume, variando de 0,80 a 1,10;
- Dosagem de finos variando de 400 a 600 kg/m<sup>3</sup>;
- 28% a 35% de agregado grosso em volume;
- Quantidade de água regida pela EN 206, não ultrapassando 200 l/m<sup>3</sup>;
- O teor de areia equilibra os outros constituintes.

Os agregados no betão convencional apresentam uma percentagem em volume em torno de 70%, cuja maior parte está destinada aos grossos. De acordo com as referências

supracitadas, este valor reduz para um limite superior de 35%, ao passo que é necessário aumentar a distância relativa entre estes elementos. De maneira geral, os agregados grossos não devem ultrapassar a dimensão de 20 mm nos auto-compactáveis. Quanto aos agregados finos, sua dosagem é também bastante influente no que diz respeito à fluidez do betão, visto que, ao ser elevada, pode conduzir à mesma problemática de perda de energia cinética relatada acima, dificultando o escoamento, e, quando sua dosagem for baixa, pode propiciar a segregação do material, bem como o acúmulo de água, que culminará no fenômeno de exsudação, enfraquecendo o auto-compactável. Poulson (2002) define uma porcentagem que varia de 40% a 50% em volume da pasta como sendo a dosagem ótima para os agregados finos.

O BAC pode apresentar uma constituição pulverulenta diversificada, nomeadamente variando entre cimento e adições. Todo o pó aplicado tem grande contribuição reológica no que diz respeito à capacidade de preenchimento e à resistência mecânica adquirida.

A constituição do cimento é uma das principais questões químicas que influi no caráter auto-compactável do betão, podendo inviabilizar ou potencializar esta propriedade. Sabe-se que os principais constituintes do ligante em questão são os  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ,  $C_3S$  e  $C_2S$ , sendo os três primeiros os que hidratam inicialmente. Os dois primeiros pouco contribuem positivamente, tal que seus produtos de hidratação proporcionam apenas maior resistência à fluidez do betão nos instantes primários da mistura, dificultando o caráter auto-compactável desde o início do processo. Logo, os cimentos que apresentam baixo teor de aluminatos tricálcico e aluminoferratos tetracálcio são os mais eficazes em termos de BAC. O  $C_3S$ , por sua vez, é o principal responsável pela resistência inicial da pasta, de modo que sua contribuição mecânica é demasiado relevante para que se altere seu teor em virtude da trabalhabilidade do betão. O  $C_2S$  hidrata mais tardiamente, tal que a resistência inicial do material é afetada quando o teor deste composto é elevado. No entanto, para auto-compactáveis, a elevada quantidade do silicato bicálcio pode ser bastante interessante do ponto de vista da amortização do desenvolvimento de produtos da hidratação nos primeiros instantes de vida da mistura, contribuindo com a sua fluidez e trabalhabilidade do betão.

O outro tipo de pó utilizado são as adições, que podem ser do tipo I ou do tipo II, conforme discutido anteriormente. Dentre as várias opções, destacam-se as escórias, as cinzas volantes e o fíler calcário como adições para betão auto-compactável. As escórias de alto forno são resíduos não metálicos oriundos da fabricação do aço que são moídos e transformados em pó com finura na ordem de  $10.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , sendo sua principal vantagem em termos de auto-compactável o seu caráter de hidratação mais lento, isto é, as partículas de



escória não reagem com a água nos primeiros instantes da mistura, de tal modo que a trabalhabilidade é mantida por mais tempo. As cinzas volantes são um material inorgânico com propriedades pozolânicas, originado da queima de carvão pulverizado ou moído em centrais termoelétricas, cujo formato é esférico e suas grandezas são bastante reduzidas, por volta de 0,5 a 200  $\mu\text{m}$ . As contribuições das cinzas volantes são devido a este caráter dimensional, quando há a minimização da perda de energia por atrito interno, assim como pela sua esfericidade que permite melhor fluidez ao betão. Já o fíler calcário é um material muito fino produzido pela moagem ou pulverização de rochas calcárias, em que as partículas mais grossas não ultrapassam 80  $\mu\text{m}$  (Ferreira, 2001). A adição de fíler calcário tem por função promover uma melhor distribuição granulométrica da pasta, tornando o material mais coeso, o que diminui o risco de segregação, bem como de exsudação, já que a água deve ser consumida para este fim. Desse modo, a resistência à segregação é a condição mais influenciada, sendo também a capacidade de enchimento beneficiada quando o escoamento do betão é melhorado a partir da estabilização da viscosidade do material.

A água nos BAC é um elemento que atua normalmente apenas em termos de hidratação do ligante, de modo que a relação água/ligante enquadra-se abaixo de 0,4, não sendo isto regra geral.

Para que se obtenha um betão auto-compactável é necessário a presença de um agente dispersor dos constituintes do material, de modo a promover boa fluidez e elevada trabalhabilidade. Este elemento é o superplastificante, cuja ação é bastante eficaz, o que proporciona a redução da água relativa à trabalhabilidade. Os principais tipos de superplastificantes utilizados são os polímeros de naftaleno sulfonado, os polímeros de melanina sulfonada, os copolímeros vinílicos e carboxilatos modificados, sendo estes os mais modernos que podem promover uma redução de até 40% da água. A atuação deste produto está supracitada, sendo proeminente ratificar a importância da redução do teor de aluminatos e aluminoferratos no cimento, pois estes compostos podem reagir rapidamente com os sulfonatos presentes no adjuvante em questão, inviabilizando sua atuação nos demais componentes do ligante. Outro parâmetro importante a ser observado na composição cimentícia é a quantidade de anidrite ( $\text{CaSO}_4$ ) adicionada ao clínquer, visto que este composto tem o objetivo de reagir com os  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ . Quando não acrescentado suficientemente, os sulfonatos do superplastificante são então acionados. Para o BAC, a melhor situação é quando os teores de aluminatos e aluminoferratos não ultrapassam 10%.



Outro tipo de adjuvante também empregado nos auto-compactáveis são os agentes modificadores de viscosidade, que atuam em equilíbrio à ação dispersante do superplastificante, assegurando a condição de boa resistência à segregação do betão.

### 2.1.2.2 Propriedades do BAC no estado fresco

Sabendo-se que o betão auto-compactável teve seu desenvolvimento iniciado na década de 80, é fato que sua normalização é também recente, havendo um período em que o material se apresentava bastante aplicável, mas sem diretrizes que regessem seu uso. Na Europa, a EN 12350 é a norma que direciona a aplicação de betão, sendo então desenvolvidos nos anos 2000 as partes 8 a 12, que se referem ao betão auto-compactável. Logo, atualmente, através da prEN 206-9:2013 – Concrete Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete, da EN 12350 (partes 8 a 12) e do “European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use”, é possível desenvolver o BAC com orientações e especificações normalizadas. Em Portugal, as principais normas são, portanto, a tradução desse guia europeu, o guia para a especificação, produção e utilização de BAC da APEB – Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, e as NP EN 12350 partes 8 a 12.

Há dois principais parâmetros a serem analisados no estado fresco para garantir o desempenho do betão como auto-compactável: a capacidade de enchimento e a resistência à segregação. Estas características podem ser aferidas por meio de vários ensaios, como o *Slump Flow*, o *L-Box* e o *U Box*, existindo ainda outros, como indica o quadro 2.3. O primeiro é o mais usado, tendo em vista a utilização dos mesmos equipamentos dispendidos no *Slump Test*, e seu valor característico para o material em questão situa-se entre 550 mm e 850 mm, de acordo com a EN 12350 (Quadro 2.4).

Quadro 2.3 – Métodos de ensaio para caracterização de BAC.

Fonte: Silva e Brito (2009)

Características	Método de ensaio	Valor medido
Espalhamento / capacidade de preenchimento	Espalhamento	Espalhamento total
	Caixa Kajima	Enchimento visual
Viscosidade / escoamento	T <sub>500</sub> (t <sub>500</sub> )	Tempo de fluxo
	Funil V	
	Funil O	
	Orimet	
Capacidade de passagem	Caixa L	Coefficiente de passagem
	Caixa U	Diferença de altura
	Anel J	Fluxo total
	Caixa Kajima	Capacidade de passagem visual
Resistência à segregação	Penetração	Profundidade
	Segregação por peneiração	Porcentagem de calda
	Coluna de decantação	Coefficiente de segregação

Quadro 2.4 – Limites para caracterização de BAC segundo EN 12350.

Fonte: adaptado de Silva e Brito (2009)

Característica	Ensaio	Classe	Parâmetros	Análise qualitativa	Notas
Espalhamento	Espalhamento [mm] EN 12350-8	SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com pouca armadura (ex. lajes ou pavimentos); betão bombeado (ex. revestimento de túneis); secções suficientemente pequenas para prevenir escoamentos horizontais (ex. pilares e fundações profundas)	Não aplicável a betões $c/D_{\max} > 40$ mm
		SF2	660 a 750	Aplicações correntes (ex. paredes, pilares)	
		SF3	760 a 850	Aplicações verticais, estruturas densamente armadas e/com formas complexas; melhor superfície de acabamento mas mais difícil de controlar a segregação; geralmente $c/D_{\max} \leq 16$ mm	
Viscosidade	Espalhamento $T_{500}$ [s] EN 12350-8	VS1	$\leq 2$	Boa capacidade de preenchimento; capacidade de auto-nivelamento e melhor grau de acabamento; maior risco de exsudação ou segregação.	Não aplicável a betões $c/D_{\max} > 22,4$ mm
		VS2	3 a 6	Semelhante ao VF2	
		VS3	$> 6$	Casos especiais	
	Funil V [s] EN 12350-9	VF1	$< 9$	Boa capacidade de preenchimento; capacidade de auto-nivelamento e melhor grau de acabamento; maior risco de exsudação ou segregação.	
		VF2	9 a 25	Com o crescimento do tempo de espalhamento, existe maior probabilidade de ter efeitos tixotrópicos, que podem ajudar a limitar a pressão na cofragem ou a aumentar a resistência à segregação. Pode apresentar dificuldades com o acabamento superficial (chochos), com o enchimento de cantos com betão SF1 e a maior sensibilidade às paragens ou atrasos entre camadas sucessivas.	

A capacidade de preenchimento é uma propriedade inerente ao BAC e que ocorre devido à sua elevada fluidez, que lhe permite preencher os espaços entre as cofragens e armaduras por meio do seu peso próprio. A NP EN 12350-8 classifica os betões em termos de capacidade de preenchimento a partir de limites designados ao ensaio de espalhamento, podendo o BAC ser do tipo SF1, SF2 ou SF3. Já a resistência à segregação está relacionada à sua viscosidade e capacidade de ser lançado mantendo a coesão e homogeneidade, isto é, sem que ocorra a separação dos constituintes. A referida norma também classifica quanto à viscosidade, em VS1, VS2 ou VS3.

Ao fluir entre as armaduras confinado pela cofragem, o betão auto-compactável tende a alterar a posição relativa dos agregados em virtude da colisão deles com as armaduras, com a fôrma ou entre si, originando ainda tensões de corte na pasta. Ao passo que ocorre esse conflito, há a perda de energia cinética devido ao choque e ao atrito, de modo a reduzir a fluidez do BAC e portanto sua capacidade de preenchimento, além de proporcionar a segregação do material, que, em geral, quando ocorre, é entre a pasta e o agregado. Quanto mais densas as armaduras, mais reduzidas as seções e menores as distâncias relativas entre os

agregados, maior a chance da colisão. Por esta razão, os betões auto-compactáveis apresentam menor teor de grossos que o convencional. A figura 2.2 indica o mecanismo de desenvolvimento dessas tensões internas.

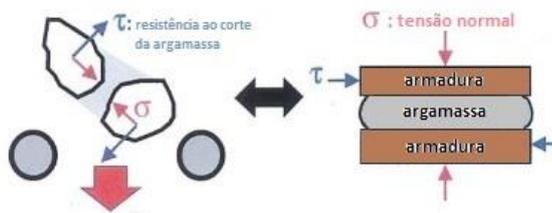


Figura 2.2 – Mecanismo de tensões internas do BAC.  
Fonte: adaptado de Oliveira (2009)

Outro fator que é inerente ao auto-compactável no estado fresco é a sua elevada viscosidade. Esta propriedade é necessária em prol da oposição à segregação do material. Quando muito fluido, há o risco de haver demasiada dispersão dos constituintes do betão até que haja sua segregação. Isto pode ocorrer em virtude da elevada presença de água ou pela forte ação do superplastificante. Para que se mantenha a adequada viscosidade do betão, a diminuição da relação água/material pulverulento é uma medida eficiente, o que pode ocorrer mediante a redução do volume de água relativa à trabalhabilidade ou pelo aumento da quantidade de finos. Há ainda casos em que o uso de adjuvantes agentes modificadores de viscosidades são necessários para equilibrar a ação dispersante dos superplastificantes.

### 2.1.2.3 Propriedades do BAC no estado endurecido

Apesar de apresentar caráter diferenciado no estado fresco, o betão auto-compactável é constituído por elementos semelhantes ao convencional, de modo que suas propriedades no estado endurecido são também conexas ao BC, apresentando, por exemplo, densidade e resistência mecânica características do material de origem.

Por apresentar maior teor de finos, bem como agregados grossos normalmente com dimensões menores, o BAC é em teoria um material mais compacto, portanto com menor teor de vazios. Essa característica é ainda potencializada mediante a redução da quantidade de água utilizada na mistura, de tal modo que a parcela relativa à trabalhabilidade que posteriormente pode gerar vazios ao betão é minimizada.

Outra propriedade do BAC endurecido é a sua resistência mecânica, que mantém-se elevada em termos de compressão e baixa quanto à tração. Relativamente à compressão, o fato de haver uma pasta mais coesa e compacta normalmente proporciona a elevação da

resistência desta e, portanto, do betão, proporcionando resistências mais elevadas que o convencional. O módulo de elasticidade do material, por sua vez, mantém-se próximo ao identificado nos betões convencionais, observando-se em geral um valor relativamente menor.

Uma preocupação, no entanto, para o estado endurecido do material, é a fendilhação da sua matriz, já que o compósito tem um teor de argamassa mais elevado que o convencional. Esse fenômeno pode ocorrer em virtude da existência de zonas contínuas muito enfraquecidas na matriz mediante a não hidratação do ligante e/ou devido a uma possível heterogeneidade da mistura. Para garantir que essa situação não ocorra, é ideal que se fortaleça a pasta, sempre visando ao equilíbrio de resistência mecânica entre a argamassa e o agregado grosso.

### **2.1.3 Betão de Elevado Desempenho – BED**

O conceito de desempenho se baseia em garantir três fatores qualitativos ao objeto: solidez, servicibilidade e funcionalidade. Para o betão não é diferente, é necessário identificar essas características, em potencial, para assumi-lo como de elevado desempenho.

Inicialmente, com o avanço da tecnologia de betão a partir de meados do último século, o material começou a tomar caracteres diferenciados em termos de desempenho a partir da necessidade de resistências à compressão mais elevadas, que permitissem a construção de edifícios esbeltos e bastante carregados. Surge então a definição de BER – Betão de Elevada Resistência.

Na década de 50, falava-se em 35 MPa como alta resistência. Nos anos 60, subiu-se o patamar para valores entre 40 e 50 MPa. Nas décadas seguintes os números continuaram a aumentar, sendo desenvolvidos betões com resistência de até 100 MPa. Nos dias de hoje, já é possível fazer referência a betões de elevada resistência à compressão que atinjam 150 MPa. Há ainda casos especiais registrados em que a resistência ultrapassa 200 MPa, são os definidos betões de ultra elevada resistência – BUER. O valor mais elevado registrado até os dias atuais é de 800 MPa, sendo este betão desenvolvido pelos estudiosos Richard e Cheyrezy, em 1994, nos Estados Unidos da América, cujo registro se deu por meio do ACI – American Concrete Institute.

Desenvolvidos tantos tipos de betão, Harris (2010) apresentou uma definição de limites de classificação para os betões convencional, de elevada resistência e de ultra elevada resistência, como segue no quadro 2.5.



Quadro 2.5 – Limites de classificação quanto às propriedades mecânicas do betão.  
 Fonte: adaptado de Harris (2010)

Propriedade	BC (MPa)	BER (MPa)	BUER (MPa)
Resistência à compressão	25-55	76-124	138-228
Resistência à tracção	2-5	5-6	12

O ACI Committee 363 já admite que o BER tem limite inferior de 41 MPa. A EN 206-1, por sua vez, classifica um BER como aquele cuja classe de resistência é superior à C50/60. Não há, pois, um consenso mundial para os limites de resistência, tal que esses valores podem variar de acordo com a localidade em que se insere o contexto.

Apesar de a elevada resistência ser um fator imprescindível para o BED, não é, e não deve ser, qualidade determinante do material quanto ao nível de desempenho, mas sem dúvida foi o fator que deu origem ao betão de elevado desempenho. Na literatura, a designação BED foi aplicada pioneiramente por Mehta e Aïtcin em 1990, em que os autores classificaram composições de betão como de elevado desempenho aquelas que apresentassem três características diferentes: elevada trabalhabilidade, alta resistência e elevada durabilidade. Estava portanto estabelecida a primeira distinção entre BER e BED.

A elevada resistência assegura a solidez do betão. Entretanto, ao potencializar a resistência do material, alguns outros benefícios são adquiridos, os quais influenciam os fatores servicibilidade e funcionalidade.

Em termos de servicibilidade – capacidade do material de ser utilizado com eficácia, alguns outros elementos se inserem na qualificação do betão, são a durabilidade, a capacidade de deformação do material, a estabilidade global e a resistência ao fogo.

O desenvolvimento dos BER decorreu-se em virtude de novas tecnologias que propiciaram tal feito, como a inserção dos superplastificantes e o surgimento de adições pozolânicas e do tipo filler. No entanto, ao atuar com estes novos aliados, obteve-se também a redução do fator água/ligante, bem como um maior preenchimento dos vazios inerentes ao betão convencional. Ao diminuir a quantidade de água na amassadura, há menor desenvolvimento de vazios no betão devido ao fenómeno de exsudação. Com o preenchimento dos vazios através das adições, provém-se uma mistura mais homogênea, mais compacta. Logo, sabendo-se que a questão durabilidade está diretamente relacionada à permeabilidade e porosidade, é fato que o betão cuja composição agrega esses novos elementos apresenta desempenho elevado no que diz respeito à sua durabilidade.

Quanto à capacidade de deformação e estabilidade global, o módulo de elasticidade demonstra quão flexível é o material, indicando sua capacidade de estabilidade global face

aos esforços horizontais sofridos normalmente por uma edificação. O módulo de elasticidade para um BED, segundo Camões (2006), é mais elevado que o convencional e deve se enquadrar próximo ao valor de 40 GPa. Tal aumento do módulo se deve especialmente em função da maximização do teor de finos na pasta da mistura, potencializando a compacidade do material e, portanto, elevando seu módulo de elasticidade.

Por fim, a resistência ao fogo dos BED são uma preocupação bastante relevante, já que, por ser um material menos poroso, ao ser submetido ao aquecimento pode apresentar pressões devido ao gás originado pela água residual existente no interior do material. De acordo com estudos de Teixeira (2007), essa pressão pode atingir 8 MPa, valor acima da comum resistência, mesmo de betões de elevado desempenho, à tração. O mesmo autor ainda relata que até 300°C a resistência à compressão do betão não sofre grandes variações, sendo reduzida a 50% quando a temperatura atinge 600°C. Além disso, entre 400°C e 600°C pode haver a decomposição do CH em CaO e H<sub>2</sub>O, aumentando a presença de água no interior do material. Após a exposição ao fogo, o óxido gerado pode reagir com o dióxido de carbono, implicando em carbonato de cálcio, composto que pode prejudicar ainda mais o elemento de betão ao reduzir o seu pH. Desse modo, tem-se que a resistência ao fogo desses materiais são razoáveis, mantendo o comportamento similar ao convencional, o que não compromete seu caráter de elevado desempenho.

O último fator a ser considerado é a funcionalidade, que pode ser definido como a capacidade do material de trabalhar com eficácia. Assim, este conceito está diretamente relacionado às propriedades frescas do BED, nomeadamente refere-se à trabalhabilidade deste tipo de betão. Partindo do pressuposto, normalmente a realidade, de que os betões de elevado desempenho utilizam superplastificante, é expectável que haja desempenho favorável no que diz respeito à trabalhabilidade.

Sendo assim, o BED fica então caracterizado, de maneira geral, como um material que congrega qualidades que não são atingidas rotineiramente, tal que depende outros elementos, adições e adjuvantes, que potencializam suas características – durabilidade, resistência física, resistência mecânica e resistência química – relativas ao seu diferenciado comportamento.

É importante destacar que é possível caracterizar um betão como de elevado desempenho mesmo que este não apresente potencial em um ou outro fator dentre os supracitados. Nesses casos, pode-se qualificar o material como de elevado desempenho em determinado contexto, ou seja, que apresenta comportamento acima da média quanto a uma dada finalidade.



Há ainda outras definições de BED, como a indicada pelo ACI, em 1999: “Um betão que congrega a combinação de desempenhos e requisitos uniformes especiais, que não podem ser atingidos rotineiramente recorrendo a constituintes e amassaduras convencionais e práticas correntes de colocação e cura.”

Camões (2006) também afirma seu conceito quando diz que apesar de não haver consenso na designação do BED, para fabricar um betão de elevado desempenho é necessário recorrer a um reduzido valor de razão água/ligante, inferior a 0.4, o que é possível mediante o uso de um adjuvante redutor de água de alta gama, um superplastificante. Esta afirmação corrobora com o estudo de outros autores, como Aïtcin (2000).

### **2.1.3.1 Composição do betão de elevado desempenho**

A essência da composição dos BED é mantida com relação ao convencional, tal que aqui também se inserem o ligante, os agregados finos e grossos e a água. Há, no entanto, o aditamento imperativo do superplastificante e a possibilidade de acréscimo das adições minerais.

Os agregados grossos assumem no BED importância maior, tendo em vista que agora a resistência da pasta é elevada e se aproxima da capacidade do agregado, sendo então potencializada a solicitação destes elementos em termos de resistência mecânica. Logo, é necessário que a fração grossa dos agregados tenha uma rigidez e uma resistência à compressão apropriada, acima de 150 MPa segundo Camões (2006), para que mantenham o adequado desempenho do material em termos mecânicos. Outro fator a considerar é que devem ser previstos agregados com forma cúbica em detrimento dos lamelares, pois os BED apresentam o aumento das concentrações de tensão, o que é minimizado com a aplicação de elementos cúbicos. Há ainda que se analisar a reatividade destes agregados, já que o fenômeno de reação álcali-sílica é mais preocupante neste tipo de betão em virtude do elevado teor de ligante.

Por sua vez, o agregado fino deve proporcionar o aumento da compacidade do material. Pressupondo a grande presença de finos nos betões de elevado desempenho, são adequadas areias um pouco mais grossas que as convencionais, com módulo de finura de cerca de 3, de acordo com Camões (2006).

Material responsável por conferir a união dos demais e resistência mecânica à pasta, o principal ligante no BED permanece sendo o cimento. Entretanto, é possível também a fabricação de betões de elevado desempenho com a substituição parcial deste elemento por material pozolânico como as escórias de alto forno, o metacaulino, a sílica de fumo e as

cinzas volantes. Esta inclusão pode ser benéfica tanto do ponto de vista econômico como reológico e funcional, já que estes elementos podem agregar valor em termos de aumento da durabilidade do betão, bem como melhorar as propriedades do material em seu estado fresco, como a trabalhabilidade. De maneira geral, as dosagens do ligante variam de 400 kg/m<sup>3</sup> a 600 kg/m<sup>3</sup>, podendo atingir valores maiores de acordo com os demais tipos de materiais disponíveis e com a resistência à compressão requerida.

A água é o elemento constante na composição do betão, sendo responsável nos de elevado desempenho principalmente, às vezes exclusivamente, pela ativação do ligante. Como indicado anteriormente, é necessário que o betão tenha relação água/ligante inferior a 0.4 para ser considerado BED. Logo, estes são materiais com menor presença de água que o convencional e a manutenção disto é geralmente possível mediante o emprego do adjuvante de alta gama, o superplastificante.

Para garantir a adequada trabalhabilidade inerente ao BED, a aplicação do superplastificante é imperativa neste tipo de betão. Aïtcin (1992) *apud* Camões (2006) indica quantidades que variam de 3 a 10 l/m<sup>3</sup> nas dosagens do superplastificante, que se traduz em limites de 0.5% a 3.0% da massa de cimento. Valores recorrentes são de 1.0% a 2.0%.

As adições minerais têm acuidade particular nos betões de elevado desempenho. Sua função é baseada na ação pozolânica ou na ação do tipo fíller, atuando conforme referido anteriormente nos primeiros parágrafos deste item.

A sílica de fumo é a adição mais adequada para o BED, no entanto, em Portugal, a escassez deste material inviabiliza seu uso. Seu caráter potencial em termos de pozolanicidade aumenta a resistência do material a ambientes quimicamente agressivos, agregando valor em termos de durabilidade ao betão. Camões (2006) assegura que a dosagem ótima da sílica de fumo é de 10%, considerando o elevado custo da adição e o fato de a elevação deste valor implicar em melhorias não muito significativas no desempenho do betão.

Dentre as demais adições, a cinza volante se apresenta como a mais viável devido à sua abundante disponibilidade no mercado, além de ser uma opção bastante sustentável. Do ponto de vista técnico, as cinzas volantes atuam tanto preenchendo os espaços vazios, de modo a aumentar a compacidade do betão, como reagindo com o hidróxido de cálcio residual produzindo mais silicato de cálcio hidratado. Ambas situações contribuem com o aumento da resistência à compressão do material. Outra contribuição se dá pela sua esfericidade que possibilita ganhos em termos de trabalhabilidade, além de possibilitar a redução do fator água/ligante.



Dependendo da composição química do ligante, isto é, em casos de elevado teor de  $C_3S$ ,  $C_4AF$  e  $C_3A$ , outro adjuvante que pode ser despendido é o retardador de pega, tendo em vista que estes compostos, por hidratarem rapidamente, podem prejudicar a trabalhabilidade do material.

### 2.1.3.2 Viabilidade e aplicações do BED

É certo que para assegurar os desempenhos necessários ao betão em questão são necessárias seleções de materiais de qualidade acima do convencional, bem como o uso dos já indicados SP e adições. Isto provoca, portanto, um acréscimo no custo final do metro cúbico deste betão. Todavia, o BED conduz também a uma redução significativa das dimensões dos elementos estruturais, acarretando em menor consumo de betão e redução do peso próprio, que provoca redução do consumo de aço e ganhos em área útil, e a maior rapidez na desforma, agregando velocidade à execução. De maneira global, o BED implica na economia da construção, como relatado a seguir.

Dal Molin *et al.* (1997) *apud* Mendes (2002) relatam um estudo de viabilidade econômica em que o objeto é a estrutura de um edifício de 15 pavimentos, tal que foram comparados os usos de betões de 20 MPa e 60 MPa de resistência à compressão. O autor afirma que na situação em que se insere o BED de 60 MPa, alcança-se uma economia de 12% na execução da estrutura em relação à situação em que é despendido o de 20 MPa, sem considerar as reduções obtidas em termos de fundações em virtude da redução da carga da edificação, bem como o fator velocidade de execução.

Em outro estudo de viabilidade econômica para BED, Mendonça (1998) analisa o uso de betão com resistência à compressão de 50 MPa em detrimento de um de 20 MPa para um empreendimento com 16 pavimentos. Segundo o profissional, a alteração do  $f_{ck}$  proporcionou uma redução no pavimento tipo de 55 vigas e 28 pilares para 23 vigas e 20 pilares, com consequente economia de 18% no custo de execução da estrutura do edifício.

Outros fatores que viabilizam a aplicação do BED são: menor segregação, melhor acabamento, aumento da durabilidade dos elementos de betão e melhor manuseio do material.

A aplicação do BED se faz bastante viável em edificações cujas solicitações são elevadas, face ao seu excelente desempenho em termos de resistência mecânica. São, assim, bastante potenciais na execução de elementos verticais, como pilares e paredes.

Outro tipo de aplicação bastante particular para o BED se dá nos casos em que o elemento estará exposto a ambientes quimicamente agressivos, já que seu desempenho em relação à sua durabilidade está acima dos demais tipos, podendo alcançar vida útil de até 100



anos. Exemplos desse tipo de uso são as pontes, cais, portos, estações de tratamento de esgotamento sanitário, entre outros.

Em termos técnicos, deve haver contínua preocupação quanto ao calor de hidratação nas aplicações de BED, já que o elevado teor de ligante desses materiais proporciona o aumento da temperatura interna dos elementos de betão. Soluções externas ou técnicas podem ser necessárias para garantir temperaturas amenas à peça, como a adoção de água em estado sólido ou o arrefecimento externo do elemento construtivo. Outra questão imprescindível é o tipo de cura que deve ser úmida até os sete primeiros dias, evitando assim a retração e a fendilhação do material nas primeiras idades, haja vista sua predisposição para isto em virtude do elevado teor de pasta.

#### **2.1.4 Betão auto-compactável de elevado desempenho – BACED**

A partir dos conhecimentos relatados acerca do betão auto-compactável e do betão de elevado desempenho, é possível então correlacionar ambos e caracterizar o betão auto-compactável de elevado desempenho.

Observando o principal carácter do BAC, sua condição de elevada trabalhabilidade com capacidade de preenchimento dos espaços a partir da gravidade, é fácil identificar que seu conceito se insere, ao menos parcialmente, na definição de betão de elevado desempenho.

Piovezam *et al.* (2006) definem o betão auto-compactável de elevado desempenho como sendo aquele que além de associar alta resistência mecânica e fluidez é capaz de adensar a partir do seu peso próprio. Esta definição, no entanto, pode ser complementada acrescentando-se a questão da durabilidade. Assim, pode-se conceituar BACED como o betão que associa elevada resistência mecânica, fluidez e elevada durabilidade e também é capaz de se auto compactar a partir do seu próprio peso.

##### **2.1.4.1 Composição do betão auto-compactável de elevado desempenho**

A composição deste tipo de betão deve ser obtida a partir da otimização entre as indicações para BAC e BED.

Os agregados grossos devem apresentar preferencialmente dimensões inferiores a 10 mm, podendo chegar a 20 mm, de modo a garantir que não haja o surgimento de tensões devido ao choque entre os constituintes do material, bem como ser de forma cúbica em vez de lamelar, com elevada rigidez. A dosagem deve ser reduzida, em torno de 35% de volume.



Os agregados finos devem ser de origem natural e com módulo de finura em torno de 3, tal que garantam o preenchimento adequado dos vazios e potencializem a trabalhabilidade ao passo que auxiliem a fluidez com superfícies menos rugosas. Sua dosagem varia entre 40% e 50% em volume de pasta.

Constituintes importantes neste tipo de betão, os finos têm a função de atuar aglutinando a mistura, conferir resistência à pasta e preencher espaços vazios. Aqui, os finos podem ser representados apenas pelo cimento, como podem ser designados pelo cimento e pelas adições minerais. A dosagem do material aglutinante ocorre geralmente entre 400 kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup>, sendo o percentual relativo às adições como indicado para o BED.

É importante ressaltar que os teores de C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF no cimento utilizado devem ser baixos para que haja boa ação do superplastificante e não haja perda de trabalhabilidade em virtude da hidratação imediata desses compostos. Outra questão que deve ser analisada com maior atenção é a dos teores de C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S, tal que o primeiro hidrata nas primeiras idades e o segundo sofre hidratação posterior. Para a auto-compactabilidade é melhor a elevação do teor de silicatos bicálcio e a minimização do teor de silicatos tricálcico e para o elevado desempenho é ideal a situação inversa. A justificativa disto se dá à medida que, para a auto-compactabilidade, é viável a redução da hidratação imediata dos compostos de cimento em virtude da manutenção da condição de trabalhabilidade adequada e para o elevado desempenho é melhor a hidratação nas primeiras idades de modo a garantir elevada resistencial inicial. Posto isto, é preciso haver bom senso e equilíbrio entre os teores desses compostos, de acordo com o caráter principal requerido, isto é, a resistência inicial elevada ou a auto-compactabilidade acentuada.

Quanto à água, o caráter de elevado desempenho tem maior força e esta é limitada pela relação a/l de 0.4, não podendo ser superior.

Há a compatibilidade entre BAC e BED no que diz respeito à presença e à dosagem de superplastificante, devendo o adjuvante apresentar-se entre 0.5% e 3.0% da massa do ligante. Outros adjuvantes podem ser utilizados em prol da auto-compactabilidade e do elevado desempenho, como os retardadores de pega e os incorporadores de ar, sempre observando o equilíbrio entre as duas qualificações.

#### **2.1.4.2 Viabilidade e aplicações do BACED**

Tendo em vista que se trata de um betão especial e que as características do BAC estão inseridas no BED, pode-se dizer que a viabilidade do auto-compactável de elevado desempenho se assemelha às descritas para o de elevado desempenho.



No âmbito das aplicações, face à sua proposta de facilidade de execução e de apresentar elevado desempenho, este tipo de material se insere em um contexto bastante propício para situações de recuperação e reforço estrutural, em que dificuldades de execução e requisitos de elevado desempenho são elementos normalmente presentes e que podem ser supridos pelas qualidades oferecidas pelo BACED.

Outra situação bastante viável para o uso deste material é em caso de estruturas com alta densidade de armadura e exposta a ambientes agressivos, tal que a vibração é dificultada e a necessidade de um betão durável é imperativa.

## **2.2 DURABILIDADE E PATOLOGIA DE ESTRUTURAS DE BETÃO**

### **2.2.1 Histórico**

Ao longo dos últimos anos, pode-se constatar a real aceitação do aumento exacerbado da produção construtiva, bem como, por consequência, dos referidos riscos aos quais são submetidos o construtor e sua construção, podendo ocasionar o surgimento de erros e vícios construtivos e de projeto que acarretam em manifestações patológicas indesejadas. Em termos de estrutura, é fato que o desempenho dos elementos não tem sido sempre satisfatório, havendo casos de sinistros que comprometem o seu funcionamento e, então, a sua durabilidade e servicibilidade.

No âmbito mundial essa situação já ocorre há mais tempo nos países do “Velho Mundo”, tendo em vista a presença de edificações mais antigas. Sendo assim, os estudos acerca desta problemática de reabilitação das estruturas são algo já consistente no meio, o que implica em um acervo técnico aos projetistas e executores de outras regiões. É fato que, e principalmente em virtude da globalização da informação, muitos casos têm sido solucionados em um determinado país a partir de estudos e conhecimento desenvolvidos em nações com maior experiência no ramo em questão.

A patologia estrutural ainda é, no entanto, um assunto de relevância atual, pois suas manifestações são caracterizadas a partir das condições naturais e artificiais dos locais em que se encontram e, portanto, implicam em uma variedade cada vez maior de casos, que provocam a necessidade de estudo constante.



## 2.2.2 Definições

Souza e Ripper (1998) afirmam que a Patologia das Estruturas pode ser entendida pelo estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas. Nesses termos, aplica-se, portanto, a necessidade de um vasto conhecimento teórico e prático no estudo deste setor da engenharia, tendo em vista que sua análise envolve ciência acerca de matérias distintas, como mecânica, materiais e resistência dos materiais, e que modelos resolutivos, normas e códigos são, em geral, insatisfatórios ou recentes, como o Code Requirements for Evaluation, Repair and Rehabilitation of Concrete Buildings (ACI 562-13) de 2013, dos Estados Unidos da América.

Os autores supracitados entendem ainda que essa disciplina não se atém apenas à identificação e conhecimento das anomalias encontradas, mas envolve todo um estudo da concepção, do projeto e, acrescenta-se, da execução da recuperação e/ou reforço dos elementos afetados. Neste domínio, pode-se classificar o estudo dos problemas patológicos em simples – aquele cuja análise se apresenta evidente – ou complexo – que determina uma análise particular e mais detalhada; àquela classificação, não há exigência de competência profissional para ser realizada, já a esta, apresenta-se a necessidade do conhecimento adequado em Patologia Estrutural.

### 2.2.2.1 Desempenho

Às estruturas civis atuais é notória a necessidade da existência de três fatores qualitativos: solidez, servicibilidade e funcionalidade. Eles, em atuação solidária, indicam o que se pode denominar de desempenho estrutural.

Admitindo então que os três aspectos que constituem o conceito devem ser avaliados como caracteres essenciais do produto, resultando em um sistema de qualidade, pode-se afirmar que o desenvolvimento do desempenho de uma estrutura nasce com a edificação na etapa de concepção e projetos, passando por todas as demais fases, de modo que cada uma tem sua importância no resultado do comportamento da edificação em serviço.

Portanto, será adequado o desempenho da estrutura quando o sistema atender com eficiência e segurança, promovendo-lhe estabilidade e rigidez durante um determinado período de tempo, ao qual denominamos vida útil.

### 2.2.2.2 *Durabilidade*

Este é um fator determinante quando se trata de estruturas de qualidade. A durabilidade de um material, de um sistema estrutural ou até mesmo de uma edificação como um todo é dada pela sua capacidade de se comportar em condições satisfatórias quando em serviço. Isto é, se dá pela sua capacidade de apresentar um bom desempenho quando em uso. Leiam-se, nesta discussão, os termos “em serviço” e “em uso” como as situações, naturais e reológicas, às quais a estrutura está submetida.

Em se tratando de estruturas de betão armado, Helene *et. al* (2001) apresentam a regra dos 4C, indicando os quatro fatores que determinam a durabilidade do sistema:

1. Composição ou traço do betão;
2. Compactação ou adensamento efetivo do betão na estrutura;
3. Cura efetiva do betão na estrutura;
4. Cobrimento ou espessura de cobertura das armaduras.

De fato, um betão mal dosado indica possíveis problemas em suas propriedades, um adensamento mal executado resulta em altos índices de vazios, uma cura insuficiente indica um baixo grau de hidratação do cimento e um cobertura inadequado proporciona uma menor proteção ao aço existente na peça. Esses quatro aspectos então, quando não conformes, induzem à porosidade do betão, aumentando sua permeabilidade e proporcionando o surgimento de meios difusores para agentes agressivos. É, portanto, evidente que as características que dizem respeito ao fator porosidade são as que devem ter maior atenção quando se trata da discussão de durabilidade em sistemas estruturais de betão.

Portanto, a idealização de uma edificação durável passa pela adoção de decisões de projeto e procedimentos de execução que garantam à estrutura e aos materiais utilizados um desempenho satisfatório, ao longo de sua vida útil, visando à resistência aos possíveis ataques físico-químicos e à resistência mecânica dos elementos.

### 2.2.2.3 *Vida Útil*

Este conceito está contido no âmbito temporal, referindo-se ao período em que o sistema se comporta acima das mínimas condições para as quais foi projetado, estando em serviço, tal que quão maior for o período almejado, mais duráveis deverão ser os elementos empregados.

Partindo dessa consideração, tem-se que a definição da vida útil de uma estrutura de betão indica, portanto, o tempo em que este material e o sistema global devem apresentar um



desempenho satisfatório, isto é, acima do limite mínimo, culminando no aspecto da durabilidade do betão empregado.

Na década de 1990, em termos de estruturas de betão armado e considerando apenas o fenômeno agressivo de corrosão do aço, Helene apresentou à sociedade de engenharia brasileira um modelo de definição claro de vida útil. A figura 2.3 indica esta conceituação.

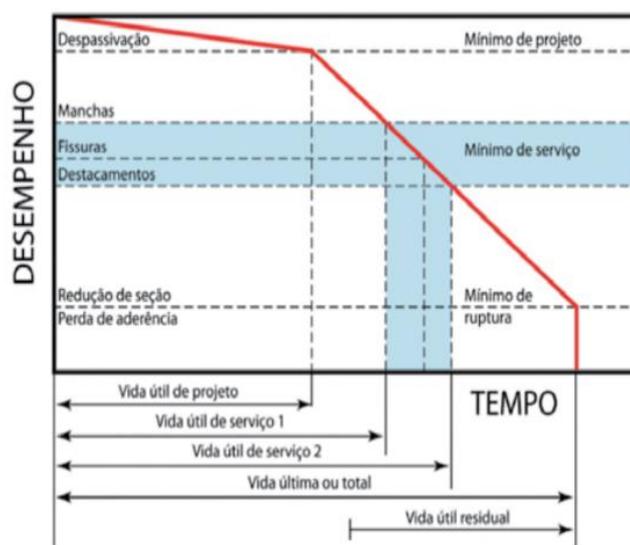


Figura 2.3 – Modelo representativo de vida útil de estruturas de betão armado a partir do fenômeno de corrosão de armaduras.

Fonte: Helene (1997)

Em interpretação aos termos definidos por Helene (1997) na figura 2.3: vida útil de projeto – período dado até à despassivação da armadura, sendo o período que deve ser adotado em projeto; vida útil de serviço – período dado até o surgimento de manchas na superfície da peça de betão e/ou fissuras na região de cobrimento do material, podendo haver destacamento do material; vida útil última ou total – período dado até a ruptura total ou parcial do elemento, quando há uma redução significativa da seção resistente de aço ou uma perda significativa da aderência entre a armadura e o betão; vida útil residual – período restante, após uma data qualquer, em que o sistema ainda desempenhará suas funções com êxito.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por sua vez, em sua norma NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, define ainda vida útil de projeto como sendo “o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor (...), bem como de execução dos reparos necessários (...)”.

### 2.2.3 Manifestações patológicas em estruturas de betão

A manifestação patológica estrutural, por definição, é a expressão física e/ou química ocorrida no elemento construtivo como reação ao ataque indesejado de um determinado agente causador do problema.

O betão, material usado em grande escala no mundo, está para as estruturas civis como um elemento de resistência à compressão que apresenta uma ótima relação entre custo e benefício. Entretanto, é sabido que as estruturas estão submetidas a outro tipo de esforço preponderante bastante relevante, a tração, cuja função de resistência, em geral, não pode ser atribuída ao betão, tendo em vista sua baixa capacidade de oposição a esse tipo de esforço mecânico. Insere-se, pois, outro elemento capaz de resistir à tração de forma eficiente, o aço. Desse modo, constitui-se como material estrutural bastante despendido no mundo, o betão armado, caracterizado pelo trabalho de dois elementos diferentes que atuam de forma monolítica.

Do ponto de vista patológico, as estruturas de betão armado devem então ser consideradas sob dois aspectos, o individual e o global, sendo o primeiro referente a cada um dos componentes, o betão e o aço, e o segundo relativo ao material resultante da união destes.

Avaliando o material como sendo formado por dois componentes, mas atuante de modo monolítico, verifica-se que o betão é o constituinte que, por estar em contato direto com o ambiente, se apresenta como o meio difusor das substâncias e compostos, agentes agressores tanto ao próprio betão como, em alcançando-o, ao aço. Esse deslocamento interno no material se dá através da rede capilar existente no betão, isto é, em virtude da permeabilidade deste elemento. Portanto, quanto mais hidrofílico for o betão, menos duradoura será a estrutura, pressupondo que a compatibilidade à água significa a aceitação também de determinados gases e líquidos que podem interagir com o betão armado. Na figura 2.4 são classificados os poros da pasta de cimento de acordo com suas dimensões. Os poros de ar aprisionado, ar incorporado e capilares são os de maior influência quanto aos ataques patológicos, principalmente por serem de maior dimensão.

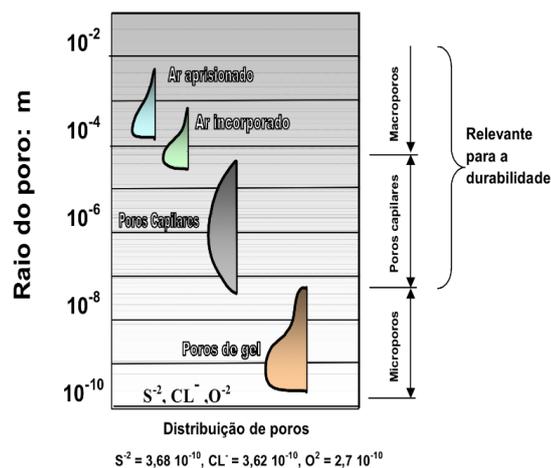


Figura 2.4 – Classificação e dimensões dos poros em betão.  
Fonte: Cascudo (1997)

Desse modo, o desenvolvimento e a atuação do agente agressor ocorrem, em geral, nos poros e na rede capilar do betão, instalando-se como um elemento parasitário, que retira do objeto ou lhe altera compostos vitais, enfraquecendo-o. Iniciam-se então os processos reativos por parte do elemento estrutural, promovendo o surgimento das expressões e sintomas na estrutura.

Em termos de betão armado, as principais formas de expressão patológica são:

- Fissuração do betão;
- Desgaste superficial do betão;
- Descamação do betão;
- Desagregação do betão;
- Nichos e manchas no betão;
- Eflorescência e/ou cliptoflorescência;
- Deterioração e redução da seção da armadura;
- Deformação excessiva da estrutura.

As causas de uma situação de anomalia estrutural são classificadas em humana ou natural, sendo esta última subdividida em mecânica, física, química, eletroquímica ou biológica. As causas humanas provêm dos erros dos profissionais envolvidos no sistema, bem como por equívocos dos usuários no que diz respeito ao tipo de uso e à manutenção da estrutura. Quanto às causas naturais, decorrem do tipo de ação danosa à qual é submetido o elemento construtivo; desta classificação, destacam-se aqui as causas químicas e eletroquímica, donde advêm as mais comuns situações de deterioração do betão.

A seguir, são discorridos conhecimentos acerca das reações deletérias mediante a ação de cloretos e de sulfatos, assim como é dissertado sobre o fenômeno de carbanotação face à sua atuação na redução do pH, haja vista o fato de serem escopo deste estudo. No contexto do ataque de compostos de enxofre, destacam-se as expansões por formação de etringita secundária. Consideram-se aqui os efeitos no betão armado, em virtude de ser o tipo de material mais empregado nas estruturas correntes no Brasil e em Portugal.

#### **2.2.4 Reações por ação de cloretos**

Os íons de cloro ( $\text{Cl}^-$ ) livres são um dos elementos de maior atuação deletéria no betão armado. Seu mecanismo de degradação se dá pela capacidade de despassivar e em seguida corroer a armadura, destruindo não apenas sua camada protetora, mas também o próprio aço, o que lhe caracteriza como um agente potencialmente perigoso.

Há algumas teorias que indicam formas de atuação do íon cloro na corrosão do aço. Uma delas é a teoria do complexo transitório, defendida pelo Comitê 222 do ACI, a qual afirma que os íons  $\text{Cl}^-$ , ao penetrar no betão, competem com os íons  $\text{OH}^-$  na formação de compostos ferrosos devido à corrosão, de modo que é formado um complexo solúvel de cloreto de ferro ( $\text{FeCl}_2$ ). Em seguida, este composto se difunde até as áreas anódicas da pilha de corrosão, onde se encontram os hidróxidos ferrosos ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), destruindo-o e então dando continuidade ao seu ataque corrosivo à armadura, agora mais internamente. A precipitação dos hidróxidos ferrosos ocorre a certa distância do eletrodo, de modo que os íons cloreto dispersos no meio ficam livres para transportar mais íons de ferro da região anódica; o oxigênio presente também interage com o  $\text{Fe}^{+2}$ , dando origem aos óxidos de ferro, que possuem volume quatro vezes maior que os cloretos de ferro, ocasionando assim a expansão do betão. Todo este processo indica a corrosão da armadura, seguida da degradação do betão por dilatação como reação à atuação deletéria contra o aço.

A causa do problema patológico é, pois, dada pelos íons cloreto associados à performance do oxigênio contido no material. Entretanto, para que este componente químico atue, é necessário o seu transporte até as barras de aço, o que ocorre por meio da água. Esta condução através do betão é iniciada pela entrada do agente no material, o que pode ocorrer de três formas: por absorção capilar – quando há o contato entre a solução rica em íons cloreto e o betão, havendo depósito dos ânions nos poros do material com conseguinte absorção através da água/umidade, em que a penetração ocorre devido às tensões capilares, sendo os ciclos de molhagem e secagem, na superfície da estrutura, essenciais para a continuidade da inserção dos íons, pois há a deposição deles no período de secagem e a absorção quando



houver a presença hídrica; por difusão iônica – consiste no movimento dos íons em meio aquoso para o interior do betão, devido a uma diferença de gradiente de concentração iônica, que ocorre entre o ambiente externo e o interno (betão); por permeabilidade a líquidos sob pressão hidráulica – mecanismo caracterizado pela penetração de água rica em íons cloreto em virtude da existência de uma diferença de pressão hidráulica entre o meio externo e interno que força a entrada da substância no betão, o que acontece nos casos de estruturas em contato direto e contínuo com a água. Após esta assimilação dos íons cloreto, é necessária a condução dos elementos químicos até a armadura, o que ocorre pelos vasos capilares existentes no betão. Sendo assim, quanto mais poroso e permeável o meio cimentício, leia-se quanto maior for a interconexão capilar do betão, maior a difusão e então mais fácil o transporte dos agentes ao seu objeto de atuação degradante. Portanto, para que haja a existência do problema patológico devido à ação dos íons de cloro, são necessários estes componentes químicos, a presença de água, um betão permeável, poroso e de rede capilar integrada.

Dito isto, alguns aspectos podem ser relacionados como promotores desses elementos constituintes da reação, são eles: uso de adjuvantes aceleradores de pega que contenham  $\text{CaCl}_2$ , alta relação a/l, mal adensamento e cura, inserção do sistema em um ambiente de atmosfera marinha ou em águas ricas em cloretos, uso de sais de degelo, limpeza da superfície estrutural com ácido clorídrico (HCl), entre outros. Outro fato interessante é que, durante a reação, quanto menor a concentração alcalina, mais rápida e mais fácil será a atuação dos íons cloretos. Desse modo, a redução do pH do betão é fator preponderante na potencialização do processo químico, sendo comprovado, segundo Emmons (1993) *apud* Santos (2012), que é preciso um nível de 8000 ppm de íons de cloro para iniciar a corrosão quando o pH é de 13,2, e apenas 71 ppm quando o pH cai para 11,6, demonstrando assim que uma diminuição sensível do indicador ácido-base resulta em uma considerável elevação da suscetibilidade do betão aos ataques do cloro. Um aspecto positivo na limitação desta reação é a presença dos aluminatos ( $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ ) do cimento, que interagem com os íons cloreto formando cloroaluminatos de cálcio e cloroferratos, reduzindo, portanto, a concentração do agente agressor.

A principal manifestação patológica é a fissuração paralela à armadura, que indica o problema de corrosão do aço, sendo a identificação da redução do pH e do elevado teor de cloro a comprovação de que o processo deletério se deu pela ação dos cloretos. Em virtude da expansão após a formação dos óxidos de ferro, outra expressão possível é a desagregação do betão. A mudança da coloração das barras de aço é também uma manifestação indicativa de ataque de cloretos, tendo em vista que assumirão as cores do produto da corrosão, vermelho-



alaranjado em sua maior totalidade, referente aos óxidos de ferro – ferrugem, e esverdeado em regiões menores, devido aos cloretos de ferro, podendo ainda resultar em colorações mais escuras, em geral em tons de marrom, na combinação entre as duas citadas (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Corrosão da armadura de estrutura inserida em ambiente marinho devido à ação de cloretos. Disponível em: <http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html> (acesso em 25/02/2016).

No âmbito da sintomatologia, há a perda de resistência à tração, o sintoma preponderante, tendo em vista a deterioração da armadura, sendo a perda de aderência entre aço e betão um fator consequente. O betão também pode sofrer perda de resistência mecânica ao longo do tempo em virtude das reações expansivas. Alguns sintomas paralelos ainda surgem, como a redução do pH e a despassivação das barras de aço.

### 2.2.5 Reações por ação dos sulfatos

O íon sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) atua desconstituindo o betão quimicamente, sendo classificado como um dos agentes mais perigosos. Os compostos mais relevantes são os solúveis sulfatos de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), de magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ) e de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), encontrados em regiões de jazidas de minérios e de indústrias de papel, o sulfato de potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) e o sulfato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), existente nas águas agrícolas. Os compostos em questão ainda são geralmente encontrados, no meio ambiente, em águas naturais, no solo e nos efluentes, podendo ainda estarem intrínsecos ao betão.

De acordo com Emmons (1993) *apud* Santos (2012), um dos mecanismo de ação do  $\text{SO}_4^{2-}$  se dá pela decomposição química da pasta de cimento, agredindo a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e o aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ). O fenômeno inicia produzindo gesso em forma de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), quando os íons agressores reagem com o hidróxido de cálcio, e, por conseguinte, resultam na formação do sulfoaluminato de cálcio hidratado, ou etringita

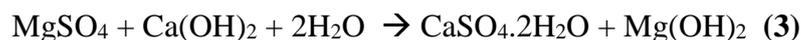
( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), ao interagir entre si o gesso formado e o aluminato tricálcico. Este processo é representado pelas equações (1) e (2) a seguir, sendo o composto agressor o sulfato de sódio.



É importante observar que o sulfato de cálcio também já está presente na composição do cimento, podendo atuar igualmente, isto é, conforme a equação (2).

Outro produto do ataque de sulfatos é a taumasita. De acordo com Pinheiro-Alves *et al.* (2007), a taumasita é formada pela evolução da etringita ou pelo ataque de sulfatos. Para que ocorra, são necessárias as presenças de íons sulfatos, carbonatos, silicatos cálcicos e água, originando então o composto químico indicado por  $\text{CaSiO}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 15\text{H}_2\text{O}$ . Este produto é bastante nocivo ao passo que, segundo Coutinho (2001), implica na redução das propriedades ligantes do betão endurecido, com perda de resistência mecânica e transformação da matriz numa massa pastosa e sem coesão.

Quando o sulfato reagente se tratar do  $\text{MgSO}_4$ , a problemática também se eleva, pois os componentes cimentícios afetados são o hidróxido de cálcio e o silicato de cálcio hidratado ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ou C-S-H), objeto que confere resistência mecânica ao betão. As reações são expostas abaixo pelas equações (3) e (4).



Em virtude do ataque aos compostos alcalinos de cálcio, há redução do pH com conseqüente interferência na película passivadora da armadura, no caso de betão armado, de modo que em determinado ponto esta proteção será insuficiente para combater a ação dos elementos degradantes do aço. As obras normalmente atacadas são as que estão em contato direto com o solo ou com as águas naturais ou de efluentes, portanto as estruturas de fundações, de sistemas de esgotamento, de ambientes marinhos, entre outras.

As principais manifestações patológicas são a alteração para coloração esbranquiçada ou marrom do betão, como indica a figura 2.6, e, em virtude da expansão advinda da etringita formada e das possíveis corrosões do aço, a desagregação e fissuração do betão. Pode-se verificar ainda a ocorrência de amolecimento da pasta do betão endurecido quando em casos de formação de taumasita.



Figura 2.6 – Bloco de fundação deteriorado por ação de íons sulfatos.  
Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/fissuracao/exemplo116.pdf>  
(acesso em 25/02/2016).

A sintomatologia é dada por perda de resistência mecânica do betão, tendo em vista que o ataque é expansivo, podendo quebrar ligações mecânicas do elemento, a redução do pH, podendo haver despassivação da armadura, e a mudança do caráter físico da estrutura, em função da degradação do betão.

### 2.2.6 Formação de etringita secundária (DEF – *Delayed Ettringite Formation*)

Sulfoaluminato de cálcio hidratado, a etringita é um composto químico formado com base na presença de enxofre, alumínio, cálcio e água, normalmente em função do ataque de íons  $\text{SO}_4^{2-}$ . No betão, este fenómeno ocorre tanto nos primeiros instantes de hidratação, chamado etringita primária, como após o endurecimento do material, sendo então denominado de etringita secundária, ou DEF, de acordo com a literatura internacional.

A forma tardia da etringita se traduz em uma manifestação patológica ao passo que provoca a expansão do betão, promovendo a fissuração da pasta, o que pode levar à desagregação do material, com sintomas subsequentes.

A composição deste objeto químico é dada por  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , e seu processo de origem pode diferir em termos de formação primária ou secundária.

#### 2.2.6.1 Mineral etringita

O sulfoaluminato também pode ser encontrado em forma de mineral natural, apresentando morfologia de pequenos cristais prismáticos, com sistema trigonal, podendo ocorrer também em formato acicular, isto é, de agulha. Sua coloração é normalmente amarelo brilhante, incolor ou branca (Figura 2.7).

O mineral é bastante encontrado na Europa, em maior número de regiões na Itália e na Alemanha, especialmente no município de Ettringen, que deu origem ao nome da terminologia

mineralógica. Há ainda registros na América do Norte, EUA, no sul da África, cidades de Kuruman, Hotazel e Black Rock e na Ásia, no Japão, em Israel, na Jordânia e na Palestina.

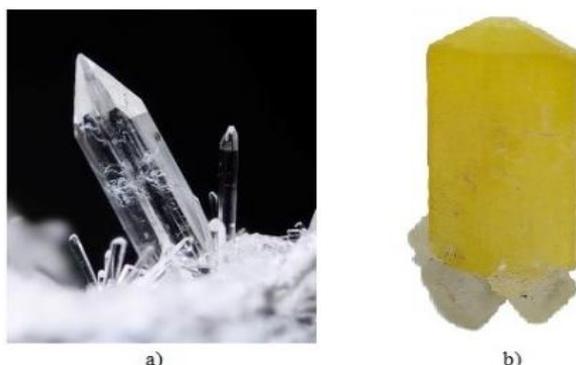


Figura 2.7 – Mineral etringita. a) encontrado em Ettrigen, na Alemanha; b) encontrado em Kuruman. Disponível em: <http://www.mindat.org/min-1414.html> (acesso em 18/02/2016).

Do ponto de vista da composição química, o mineral etringita possui formulação indicada por  $\text{Ca}_6\text{A}_{12}(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ . O material é ainda facilmente solúvel em ácidos diluídos e parcialmente solúvel em água, quando produz uma solução alcalina.

### 2.2.6.2 Etringita primária

A primeira formação de etringita ocorre, pois, no início da hidratação do cimento, quando os sulfatos de cálcio dihidratados, ou os sulfatos solúveis no meio, interagem quimicamente com os aluminatos tricálcicos disponíveis na matriz cimentícia, através de meio hidráulico, dando origem ao sulfoaluminato tricálcico hidratado, conforme indica a equação química (2), rerepresentada a seguir.



Segundo Taylor (1997) e Older (2007), a formação de etringita primária inicia-se dentro dos primeiros instantes após o contato do cimento com a água, ainda no período de pré-indução. Taylor (1997) também afirma que os cristais de etringita produzidos nessa fase se apresentam com comprimento médio de 250 nm e 100 nm de espessura, sendo encontrados nas superfícies dos grãos de cimento ou próximos a eles. Collepardi (2003) ainda complementa afirmando que na fase inicial a etringita não causa problemas de expansão devido à fluidez da pasta, ou seja, se formam enquanto o material ainda tem caráter plástico, sendo portanto ainda flexível.

A morfologia deste composto é similar àquela apresentada para os minerais etringita, ou seja, sua estrutura química é prismática, baseada em colunas de matriz hexagonal, onde se

encontram os íons de alumínio, cálcio, hidróxido e oxigênio. Nos canais, entre colunas, situam-se os íons sulfato e as moléculas de água presentes no composto (Figura 2.8).

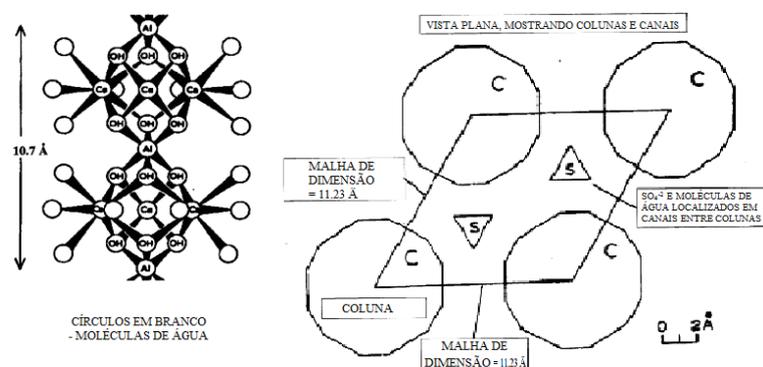


Figura 2.8 – Morfologia da etringita.  
Fonte: adaptado de Day (1992).

Um fator importante que deve ser avaliado na formação da etringita primária é a sua estabilidade, química e térmica. Após seu desenvolvimento na fase inicial, o trissulfoaluminato pode sofrer interações químicas, formando novos compostos e, portanto, decompondo-se. Alguns autores defendem ainda que, a elevadas temperaturas de cura, a etringita pode também não se formar ou se dissociar.

### 2.2.6.3 Etringita secundária (DEF – Delayed Ettringite Formation)

Conhecido por várias nomenclaturas, etringita tardia, etringita retardada, etringita secundária, ou ainda pela literatura internacional como DEF (*Delayed Ettringite Formation*), este composto químico apresenta, de maneira geral, as mesmas características químicas que o seu antecessor, a etringita primária.

Parte dos estudiosos acreditam que o sulfoaluminato secundário é definido como aquele formado apenas por ataque interno, isto é, cuja fonte para formação do composto é da matriz cimentícia ou dos agregados grossos. Outros admitem que a etringita tardia é caracterizada por se formar no betão em fase sólida, independente da origem do processo. Apesar desta discordância, é consenso que o composto se forma no betão já endurecido.

De maneira mais abrangente e visando definir os vários contextos em que se insere a etringita, de acordo com Nordine (2008) *apud* Melo (2010), houve na França, no ano de 2002, o congresso *RILEM – Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, que objetivou estabelecer uma nomenclatura para a etringita. Segundo Nordine, foram definidas quatro categorias para o composto, a partir do momento em que se formam e do seu processo de formação no betão:

- Formação da etringita primária (precoce): resultante da hidratação do aluminato de cálcio na presença do gesso e que não causa expansão;
- Formação da etringita secundária (tardia): resultante de um aporte de sulfato do meio externo ou de um excesso de sulfato interno (mais raro), que causa expansão pela formação massiva de etringita na pasta de cimento endurecida;
- Formação da etringita secundária (tardia): devida à recristalização da etringita (primária ou tardia) nos espaços vazios como poros, fissuras ou na interface pasta-agregado, a partir da solução intersticial. Este tipo de etringita não possui caráter expansivo, mas pode acompanhar outros fenômenos expansivos, no qual ela se dissolve e recristaliza nas fissuras formadas, aumentando a expansão;
- Formação da etringita tardia: consequente de altas temperaturas envolvidas. Ela se distingue das demais pelo seu complexo processo de formação, isto é, decomposição térmica (ou não formação) da etringita primária e (re)precipitação de microcristais de etringita na pasta de cimento hidratada, causando sua expansão e fissuração.

Portanto, ficam definidas as várias possibilidades de origem da etringita e assegurado que diferem no momento em que se formam e no processo que as determina. O trissulfoaluminato inicial é desenvolvido nas primeiras horas de vida do betão por meio da reação entre o aluminato tricálcico e a gipsita; já a etringita secundária se forma após dias, meses ou até anos, quando o betão já está em fase sólida, devido a fontes internas ou externas de sulfatos.

#### 2.2.6.3.1 Formação de etringita secundária por fonte interna de sulfatos

A formação da etringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) no betão, após o seu processo de cura, tem como condicionantes as presenças de íons  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Al}^+$ ,  $\text{Ca}^+$  e  $\text{OH}^-$  disponíveis para formar o composto. Neste contexto e considerando a fonte interna de sulfatos, Collepardi (2003) defende, de acordo com o mecanismo de abordagem holística, a existência de três fatores (figura 2.9) para a formação de etringita secundária:

1. O surgimento de microfissuras na matriz cimentícia – são necessárias para a deposição da etringita tardia na pasta de cimento e podem ser originadas por: a) ocorrência de reações sílica álcali (RSA); b) cura da pasta de cimento em altas temperaturas, excessiva taxa de aquecimento/resfriamento ou cura preliminar muito curta a baixa temperatura; c) efeitos de



- clima que impliquem em alternâncias de umidade/secagem ou aquecimento/resfriamento;
- d) carregamento do betão em serviço; e) retração plástica devido a cura incompleta.
2. Liberação posterior de sulfato – necessária para o fornecimento de íons  $\text{SO}_4^{-2}$ , pode ocorrer em virtude de três processos distintos: a) a partir de agregados contaminados com gipsita, com partículas de sulfato de cálcio muito grossas, que não são disponibilizadas para a formação da etringita primária e passam a ser fonte para o desenvolvimento da secundária; b) decomposição térmica da etringita primária em betões com superaquecimento; c) liberação lenta de íons sulfato adsorvido ao C-S-H em betões curados a elevada temperatura.
  3. Exposição à água – a presença deste líquido se faz importante ao passo que ele tem a função de transportar os íons sulfato, aluminato e cálcio pelos poros e microfissuras existentes na pasta.

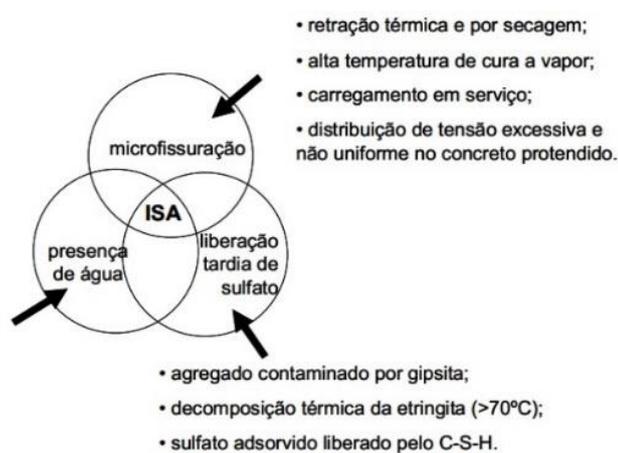


Figura 2.9 – Fatores intervenientes na formação de etringita secundária.

Fonte: Collepari (2003).

Melo (2010), por sua vez, afirma que os íons sulfatos no betão em estado endurecido estão disponíveis adsorvidos ao C-S-H, no interior dos poros do material ou presentes no monossulfato. Na fase de hidratação, os silicatos de cálcio hidratado competem com a etringita pelos sulfatos existentes na matriz, tal que parte dos íons  $\text{SO}_4^{-2}$  é adsorvido pelo composto; outra parte é adsorvida após a depreciação da etringita primária submetida a elevada temperatura. Os sulfatos podem ainda estar disponíveis nos poros em virtude do excesso de  $\text{SO}_3$  no clínquer. Já os íons  $\text{Al}^+$  necessários, segundo Melo, são oriundos apenas da precipitação do trissulfoaluminato e da presença do monossulfoaluminato. Os demais íons estão geralmente disponíveis na matriz do betão. Portanto, a autora permite concluir que a formação de DEF está condicionada à decomposição da etringita primária e à presença do monossulfato, formados no período de hidratação do cimento (Figura 2.10).

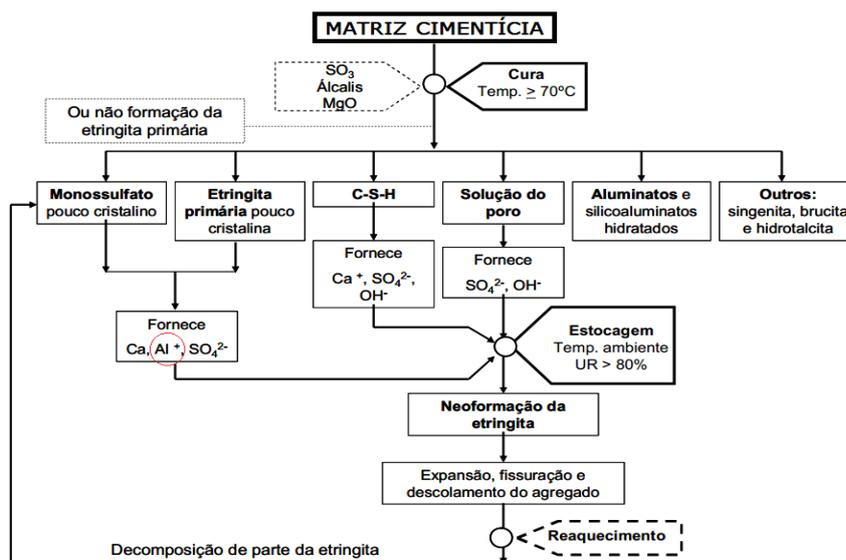
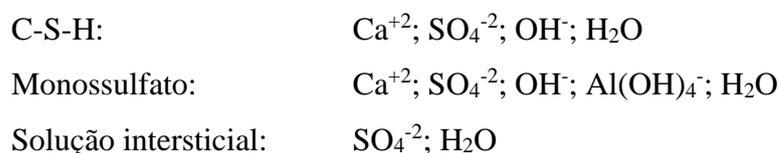


Figura 2.10 – Fluxograma da formação de etringita secundária.

Fonte: Melo (2010).

A formação da etringita secundária, portanto, se dá, em vias gerais, pela interação do monossulfato com os íons  $\text{SO}_4^{2-}$  disponíveis na solução intersticial dos poros ou adsorvido ao C-S-H, ou ainda pela recristalização da etringita decomposta inicialmente pela temperatura. Taylor *et al.* (2001) apontam as origens de cada íon necessário para a formação do composto secundário e a sua reação (5):



Sendo assim, a formação de monossulfato e a depreciação térmica da etringita primária são questões de alta relevância na formação da etringita secundária.

A formação do monossulfato decorre da decomposição do trissulfoaluminato em monossulfoaluminato, pela ação do mesmo aluminato tricálcico, em presença de água. Inicialmente, havendo gesso, água e o  $\text{C}_3\text{A}$ , formam-se os cristais de etringita. Entretanto, quando há grande teor de aluminato tricálcico e ocorre a saturação do processo, ou seja, o consumo total dos íons sulfatos, o  $\text{C}_3\text{A}$  passa a reagir com a etringita formada, reduzindo-a a monossulfato (Equação (6)).



Para Metha e Monteiro (2008), o monossulfoaluminato de cálcio hidratado é o produto final da hidratação dos cimentos Portland com mais de 5% de C<sub>3</sub>A. No entanto, esta conversão pode ocorrer ao longo de dias. Os autores afirmam que, entre os 7 e os 70 dias, a quantidade de etringita tende a diminuir e a de monossulfato a aumentar (Figura 2.11).

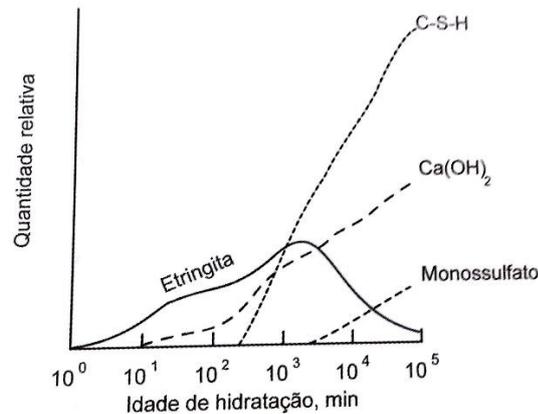


Figura 2.11 – Formação dos produtos de hidratação.  
Fonte: Metha e Monteiro (2008).

Além de reduzir para monossulfato, segundo YE (2003), a etringita primária pode reagir com os ferroaluminatos presentes na pasta, formando hidrogranadas, como indica a equação (7).



O outro processo que origina os íons para a formação da etringita tardia se dá pela decomposição do sulfoaluminato tricálcico inicial mediante a ação térmica. Alguns estudiosos acreditam que a cura do betão a determinadas temperaturas promove o processo de precipitação do trissulfoaluminato em virtude do fornecimento de calor ao composto, implicando na agitação das moléculas e posterior dissociação da etringita.

Júnior *et al.* (2003) definem o processo de formação do trissulfoaluminato secundário em virtude do aumento da temperatura de cura: “No processo de cura térmica, quando o regime isotérmico atinge temperaturas elevadas, no caso maiores do que 65-70°C, ou quando o gradiente de temperatura interno do concreto ultrapassar essa temperatura, haverá a destruição, ou a decomposição da etringita primária, e os sulfatos serão adsorvidos pelo C-S-H, numa fase chamada fase-X, não ficando sulfatos disponíveis para a reação com os aluminatos anidros e a formação da etringita primária. Posteriormente, esses sulfatos se desprendem e formam a etringita novamente (etringita retardada).”

O aumento da temperatura pode ser relativo a casos de elevado calor de hidratação ou a situações de tratamento térmico de cura. Normalmente esse fenômeno ocorre em peças de betão com dimensões de espessura acima de 1 m ou 2 m.

Em termos do calor de hidratação, o processo de combinação entre água e cimento é bastante exotérmico, principalmente no que se refere às reações com o  $C_3A$  e o  $C_3S$ . Gomes *et al.* (2013) apresentam um gráfico que indica os picos de temperatura ao longo das primeiras horas de cura do cimento (Figura 2.12).

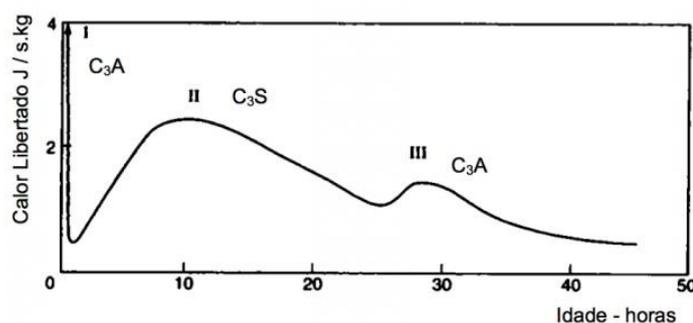


Figura 2.12 – Comportamento térmico do cimento nas primeiras horas de hidratação.

Fonte: Gomes et al. (2013).

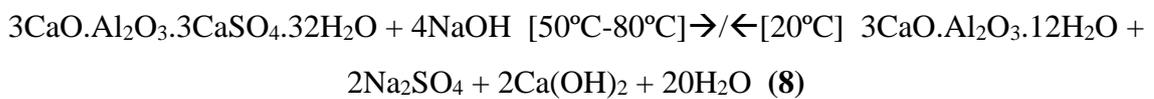
Segundo os autores, imediatamente após a mistura com água, ocorre um pico de liberação de calor (I) associado à hidratação do aluminato tricálcico, que na presença do gesso forma etringita. Segue-se um período em que se registra reduzida liberação de calor, associada ao período de dormência. Entre as 4 e as 20 horas registra-se a ocorrência de novo pico de liberação de calor (II), associado à hidratação do silicato tricálcico. Por fim, entre as 20 e as 30 horas de idade, ocorre um outro pico (III), associado novamente à hidratação do aluminato tricálcico, que acontece quando o gesso presente se esgota. Correlacionando à equação (6), é neste último pico que se identifica a decomposição da etringita primária em monossulfato.

A outra maneira de elevar a temperatura do betão é através da cura térmica, isto é, submetendo a peça a ambiente com alta temperatura para acelerar seu processo de cura, o que é bastante comum na fabricação de peças de betão pré-moldadas.

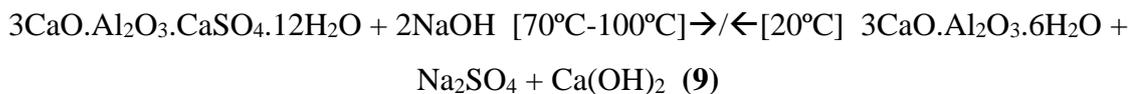
Em ambas as situações, a produção de calor é maior que a capacidade de dissipação do elemento, havendo retenção de calor no interior da peça, o que pode provocar a dissociação da etringita primária. É válido ressaltar que, ao ocorrer o arrefecimento do betão, pode-se identificar quadros fissuratórios em virtude da contração térmica, é o denominado fenômeno de retração que também contribui na formação das microfissuras necessárias para o desenvolvimento futuro da etringita secundária, de acordo com Collepardi (2003). Ferreira

(2013) ainda complementa afirmando que a elevação da temperatura na fase de hidratação do cimento submete o betão a ciclo de aquecimento/resfriamento, possibilitando o surgimento de microfaturas na pasta, o que potencializa a ocorrência da DEF.

O desenvolvimento do sulfoaluminato secundário é também influenciado pelo teor de álcalis presente na mistura. Considerando a questão relacionada à cura sob elevadas temperaturas, Wieker (1989) *apud* Day (1992) desenvolveu estudos para analisar o comportamento da etringita face à variação de temperatura no processo de cura e à presença de hidróxidos alcalinos. O estudioso concluiu que na faixa entre 50°C e 80°C o sulfoaluminato tricálcico é decomposto, na presença do hidróxido de sódio, conforme indica a equação (8). O processo é reversível à temperatura de 20°C.



O mesmo autor ainda afirma que, a partir de 70°C, o monossulfato também é decomposto na presença dos álcalis, sendo o processo reversível a 20°C (Equação (9)).

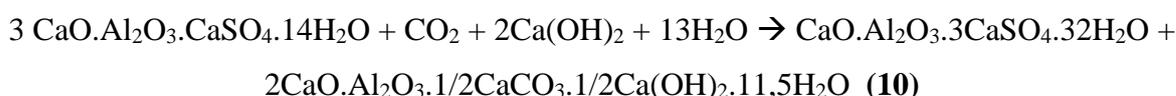


Logo, ao passo que ocorrem tais decomposições, após o fim da cura com arrefecimento e endurecimento do betão, a reação tende a retroceder, isto é, a etringita se formará uma segunda vez, caracterizando a etringita secundária. Este processo inverso pode ocorrer após dias, meses ou anos, normalmente variando de acordo com a temperatura atingida no período de cura.

Shimada e Young (2004) *apud* Melo (2010), ao estudarem a estabilidade térmica da etringita em solução de NaOH até a concentração de 1 mol/l, à temperatura de 80°C por 12 horas, constataram que na ausência de C<sub>3</sub>S, a etringita se converte para a fase “U”, que é uma fase AFm (monossulfato) com sódio substituinte, quando a concentração foi maior ou igual a 0,25 mol/l. A conversão foi diretamente proporcional à concentração de álcalis, porém limitada a 40%. A presença do C<sub>3</sub>S inibiu a formação da fase “U”, resultando na completa conversão da etringita em monossulfato para concentrações maiores do que 0,5 mol/l. Os íons sulfatos oriundos da decomposição da etringita permaneceram em solução, porém alguns foram incorporados ao C-S-H, provavelmente por adsorção, juntamente com os cátions (Na<sup>+</sup> ou Ca<sup>+2</sup>). Durante a estocagem em temperatura ambiente por três meses ou mais, a maioria dos monossulfatos se converteu novamente para a fase etringita, caracterizando assim a DEF.

Taylor, Famy e Scrivener (2001) ainda relatam que, sob quaisquer condições, o pH alto favorece mais a presença do monossulfato do que da etringita, bem como quantidades relativamente altas de sulfato nas soluções dos poros ou adsorvidas pelo C-S-H. À medida em que a alcalinidade é reduzida, seja por reações internas ou por agentes externos, o monossulfato tende a se converter em etringita, na presença de água e dos sulfatos necessários.

Uma outra maneira possível de formação da etringita secundária é a partir do ataque do dióxido de carbono ao monossulfato, culminando em trissulfoaluminato e hemicarbonato, como indica a equação (10).



O CO<sub>2</sub> pode ser inserido na mistura no momento de preparo da amassadura ou por meio da penetração nos poros do betão.

Em suma, o processo de formação da etringita secundária que se apresenta mais potencial em casos de fonte interna de sulfatos pode ser descrito no esquema da figura 2.13.

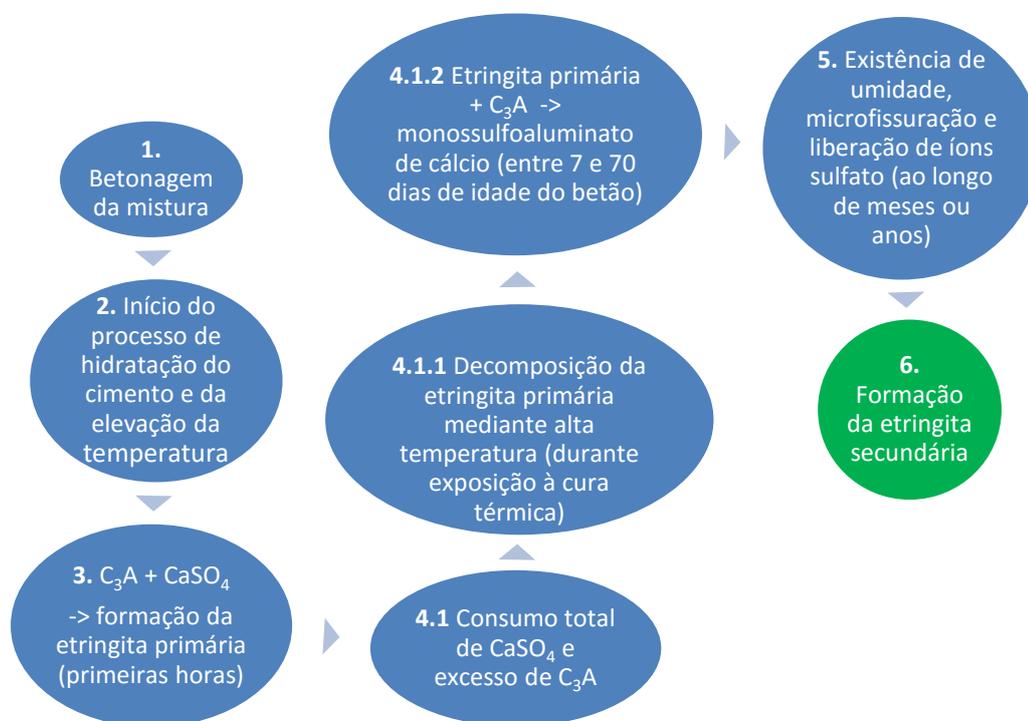


Figura 2.13 – Esquema de formação de etringita secundária por fonte interna de sulfatos.  
Fonte: Acervo pessoal.

#### 2.2.6.3.2 *Formação de etringita secundária por fonte externa de sulfatos*

Os íons sulfatos necessários para a formação da etringita tardia podem ainda ser fornecidos por uma fonte externa. Os demais elementos necessários para o processo têm sua origem assim como ocorre para o caso de fontes internas de sulfatos.

Alguns autores classificam esta situação apenas como ataque de sulfatos e não como formação de etringita tardia. No entanto, considerando que a etringita secundária é definida por se formar no betão endurecido, cujo processo se dá pela precipitação da etringita primária, a alteração da fonte de sulfatos não infringe tal conceito, o que caracteriza o fenômeno sim como DEF.

Sabe-se que a liberação de sulfatos é uma condição para o acontecimento da etringita secundária e que aqueles adsorvidos pelo C-S-H podem ser fornecidos ao processo muito lentamente. Logo, quando há o fornecimento externo de íons  $\text{SO}_4^{2-}$  o fenômeno pode sofrer aceleração, bem como os seus efeitos podem ser potencializados.

O esquema de formação da etringita secundária por meio de fonte externa de sulfatos é similar ao apresentado na figura 2.13. Todavia, a portlandita contida no meio cimentício normalmente é inserida no processo a fim da produção de sulfato de cálcio hidratado, que reagirá com os aluminatos disponíveis a partir da depreciação da etringita primária, dando origem assim à secundária.

#### 2.2.6.4 *Mecanismo de expansão por DEF*

O processo de desenvolvimento da etringita é caracterizado por ser expansivo. Coutinho (2001) confirma indicando que o volume final do sulfoaluminato tricálcico é cerca de 2,5 vezes maior que o inicial.

Como fora supracitado, em termos de etringita primária isso não é um problema, visto que o estado do betão é plástico no seu início de vida. Entretanto, para a situação de etringita formada tardiamente, quando o betão já está consolidado, esse efeito expansivo causa tensões internas ao material que normalmente implicam em fissurações ao objeto. Estas, por sua vez, criam uma rede capilar no interior do betão facilitando a penetração de agentes agressivos, bem como prejudicam a resistência mecânica do material ao passo que reduzem sua rigidez. A figura 2.14 aponta uma fissura possivelmente causada por expansão devido à ocorrência de DEF.



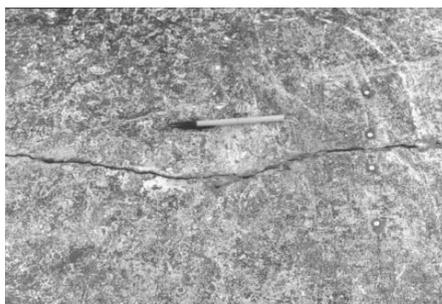


Figura 2.14 – Fissura à superfície de uma viga pré-esforçada provavelmente causada por formação retardada de etringita.

Fonte: Lawrence et al. (1990) apud Coutinho (2001).

O mecanismo de expansão ocorre após a formação da etringita secundária. Esta, por sua vez, é condicionada pela precipitação da etringita primária, o que ocorre por meio da elevação da temperatura na fase de cura do betão. A indicação da temperatura crítica a partir da qual ocorre o fenômeno da expansão foi então uma das grandes questões a respeito do assunto por vários anos. Lawrence (1995) desenvolveu estudos acerca da problemática e constatou que pastas curadas a 60°C e 65°C não apresentaram expansão, mas que a partir de 70°C houve ocorrência. Heinz *et al.* (1999) também analisaram o assunto e verificaram que a uma temperatura de 100°C as expansões ocorreram a 14 dias de idade do betão; a 90° C, 42 dias; a 85°C, 70 dias; a 80°C, até 6 meses para a ocorrência da expansão; a 75°C, o fenômeno ocorre após 1 ano. Condicionado pelo trabalho de Lawrence, Heinz *et al.* (1999) concluíram que a temperatura crítica para ocorrência da expansão é de 70°C.

A forma como ocorre a dilatação do betão devido à formação de etringita secundária é um procedimento não consensual entre os estudiosos do fenômeno. Apesar de todos concordarem que uma das principais características identificadas nos casos de expansão por DEF é o depósito acentuado de etringita nas zonas de transição entre pasta e agregados, contornando estes últimos, de maneira geral, uns acreditam que o processo se dá por pressões causadas pelo crescimento dos cristais nesses locais e outros defendem que a expansão ocorre na pasta, originando pressões neste meio que implicarão nas fissuras ao redor do agregado, zona normalmente mais fraca.

Tais teorias são denominadas por mecanismo da pressão do cristal (Diamond, 1996 *apud* Melo, 2010) e mecanismo da expansão uniforme da pasta (Taylor; Famy; Scrivener, 2001 *apud* Melo, 2010). Melo (2010) explica que a primeira sugere ser a causa da expansão o crescimento dos cristais relativamente grandes dentro das fissuras pré-existentes, implicando em novas fissuras; a outra hipótese, afirma a autora, propõe que a expansão se inicia com o crescimento de muitos cristais pequenos – etringita microcristalina, dispersos pela pasta, cujo

crescimento provoca a expansão uniforme e isotrópica da matriz, acarretando nas fissuras inerentes ao processo e na deposição dos grandes cristais nestas aberturas (Figura 2.15).

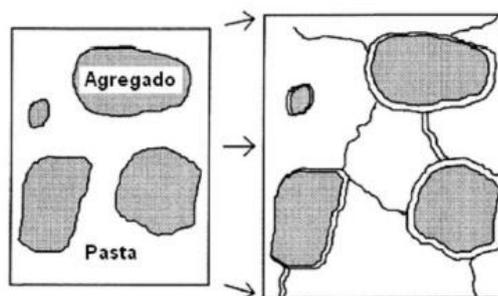


Figura 2.15 – Mecanismo de expansão uniforme da pasta por DEF.  
Fonte: Taylor et al. (2001) apud Melo (2010).

Analisando as duas teorias propostas, Brunetaud (2005) sugere um esquema de mecanismo de expansão que conjuga ambas as ideias. Sua proposição divide o fenômeno deletério em quatro fases distintas e sintetiza todo o processo.

1. “Fase inicial”, período que corresponde à solubilização da etringita primária em virtude da alta temperatura e da presença dos álcalis;
2. “Fase latente” (ou dormência): período de aparente inatividade na qual a expansão ocorre lenta e linearmente, observada pelas variações do módulo de elasticidade, massa e volume do material. Neste estágio o mecanismo de expansão é similar ao da teoria da expansão uniforme da pasta, mas o autor ainda considera que a etringita pode se formar nos poros capilares, no C-S-H e principalmente nos grandes grãos de Hadley, porque neles se concentram os elementos necessários para DEF;
3. “Fase de aceleração da deterioração”: período no qual ocorre uma expansão substancial. Aparecem as primeiras fissuras significativas nas superfícies e a degradação se acelera: a interface pasta-agregado começa a ser preenchida com cristais de etringita na forma comprimida. A etringita inicialmente contida no pequeno poro da pasta se dissolve, migra e precipita nas falhas geradas pela expansão da pasta;
4. “Estabilização”: quando o material não mais resiste à expansão ou se esgotaram as reservas de íons  $\text{SO}_4^{-2}$  do C-S-H.

#### 2.2.6.5 Fatores que controlam a expansão por ocasião da DEF

Todo o processo de formação da etringita secundária é regido pela presença de alguns elementos, conforme citado. Entretanto, três fatores controlam o fenômeno deletério, como

fora supracitado, são eles: a liberação de íons sulfatos, a presença de umidade e a ocorrência de microfissuras no betão. Collepardi (1999) *apud* Júnior (2003) afirma que a formação de etringita só acontece se os três elementos existirem, de forma que na ausência de um deles o processo não ocorre.

Os sulfatos são insubstituíveis na reação e sua liberação portanto precisa ocorrer para que haja a continuidade do processo de formação da etringita secundária. Além disso, esse fator é controlador à medida em que a taxa de liberação dos íons de enxofre rege o andamento do esquema de formação da etringita secundária.

A água é o fator que provê todo o processo. Em todas as equações químicas ela está presente, seja ativando um constituinte ou atuando como eletrólito, o que a torna fator condicionante de controle.

Passível de opiniões distintas, as microfissuras devem existir para que a etringita secundária possa se depositar, segundo Collepardi (2003). Fu *et al.* (1994), por sua vez, investigaram a função das microfissuras pré-existentes com relação ao fenômeno da DEF em pastas de cimento, verificando que apenas aquelas microfissuradas apresentaram etringita tardia. Os estudiosos concluíram que este fator é, portanto, essencial para que a expansão aconteça e ainda sugeriram que a nucleação dos cristais de etringita ocorrem preferencialmente nessas aberturas.

#### **2.2.6.6 Sintomatologia devido à expansão por DEF**

O estudo dos sintomas do betão procede da análise das anomalias identificáveis em virtude do problema e das síndromes sofridas pelo material.

Segundo Melo (2010), a ocorrência abundante de fissuras e microfissuras, constituindo várias malhas com dimensões que variam de 30 cm a 40 cm, preenchidas com cristais massivos de etringita é a anomalia mais indicativa do caso de expansão por formação de etringita secundária. Além disso, lascamentos da superfície são outra anormalidade que evidencia o problema. Alguns autores, como Melo (2010), indicam que a formação de etringita secundária, a nível microscópico, ocorre preferencialmente no interior de poros, microporos e microfissuras, apresentando-se, em geral, massivamente, como segue na figura 2.16.

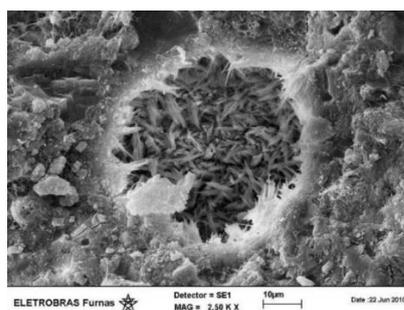


Figura 2.16 – Micrografia em amostra com ocorrência de etringita secundária em poro.  
Fonte: Melo (2010).

Em termos de resistência mecânica, o surgimento de fissuras ao longo de toda a matriz cimentícia acarreta na redução do módulo de elasticidade do material, principal dano mecânico. Isto ainda implica na perda de resistência à compressão do betão.

A nível de microestrutura, Melo (2010) aponta que podem ser observadas bordas contornando os agregados finos e grossos, interconectadas entre si por meio das fissuras que atravessam a pasta, constituindo assim as malhas. Ela complementa assegurando que as larguras das fissuras variam de 20 µm a 50 µm e que os cristais de etringita se formam perpendicularmente às paredes das fissuras e dos poros (Figura 2.17).

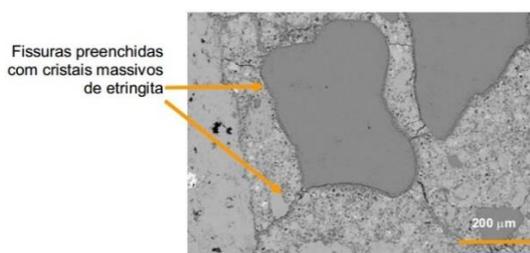


Figura 2.17 – Micrografia em amostra com ocorrência de etringita secundária.  
Fonte: Thomas et al. (2008).

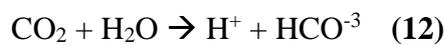
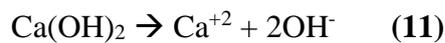
### 2.2.7 Fenômeno de carbonatação

A carbonatação é um evento químico dado pela presença de compostos de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ou anidrido carbônico, que reagem com o meio alcalino da pasta de cimento. Este fenômeno é, por definição, um processo natural de dissolução do hidróxido de cálcio, em geral, ou de um dos demais hidróxidos presentes no betão, liberados na hidratação do cimento, que reagem com os íons  $\text{CO}_3^{2-}$  originados na reação entre o dióxido de carbono e a água, formando os compostos carbonatados. Portanto, para ocorrer a reação, é necessário que haja a presença da pasta de cimento alcalina, do anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Observa-se que a intensidade e a velocidade de carbonatação do betão dependem, sobretudo, da temperatura e umidade relativa do ar – entre 40% e 70% (Figueiredo, 2005), da

porosidade do material, do nível de fissuração do betão e do tipo de meio ambiente, indicador do teor de CO<sub>2</sub> presente no ar. De acordo com Souza e Ripper (1998), fissuras com aberturas maiores que 0,4 mm aceleram a carbonatação.

O processo químico ocorre pela neutralização da fase líquida intersticial saturada do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), ou outro entre os compostos hidratados da matriz cimentícia, quando reagem com o dióxido de carbono, precipitando em carbonato de cálcio, na presença de humidade. Equacionando, em função do hidróxido de cálcio, tem-se as equações (11) a (14):



Portanto, a equação geral pode ser obtida por (15).



O principal problema patológico causado pela carbonatação do betão é a redução da alcalinidade do meio cimentício, de modo que, ao atingir a armadura, implica na despassivação das barras de aço, desprotegendo-as. Elas tornam-se bastante suscetíveis à corrosão, devido à então ausência da película passivadora e a existência de uma rede capilar aberta que interliga o meio externo até a região desprotegida, sendo essas vias desenvolvidas pela difusão do CO<sub>2</sub> no betão.

Tendo em vista que o fenómeno em questão não é a causa direta do problema patológico, mas sim o meio propiciador da corrosão da armadura, pode-se classifica-lo como uma causa, ou ação deletéria, indireta, sendo um acontecimento natural, que pode, inclusive, colaborar com a compacidade do concreto através da colmatação dos poros da estrutura.

A expressão relevante se dá pela identificação de um pH do betão em torno de 9, indicador da redução do teor alcalino no meio devido às reações de carbonatação que envolvem os álcalis do material, além da identificação da deposição de sais de carbonato de cálcio.



### 3 MATERIAIS E METODOLOGIAS

O programa experimental deste estudo tem como objetivo a análise do comportamento de betões auto-compactáveis de elevado desempenho mediante o ataque de cloretos, de sulfatos e do dióxido de carbono. Assim, foram despendidos aqui estudos acerca da escolha dos materiais na fabricação dos betões e das metodologias adotadas nos ensaios desenvolvidos para esta análise.

Partindo desse escopo, e considerando que um dos motivos da formação da etringita secundária é o elevado calor de hidratação, optou-se por betões com alto consumo de cimento. Foram então definidos o betão de referência convencional – 400 kg/m<sup>3</sup> – e os betões auto-compactáveis de elevado desempenho – 500 kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup>. Desse modo, pode-se comparar os resultados com uma situação corrente, bem como identificar as variações de comportamento dos betões especiais de acordo com o consumo de cimento.

Em termos de classe de resistência e classificação quanto ao abaixamento, espalhamento e viscosidade, expectou-se apenas caracterizar o betão convencional dentro de uma faixa adequada de trabalhabilidade e os betões de maior consumo de cimento como BACED, não restringindo-os.

É importante ressaltar que os três tipos de betão despenderam os mesmos insumos, variando apenas na dosagem e, para o caso dos BACED, na inserção de aditivo superplastificante. Desse modo, atingiu-se um dos objetivos do trabalho de retratar a situação mais próxima possível de aplicação do material no mercado da construção.

O método de cálculo utilizado nas dosagens dos betões foi o proposto por Faury, que, segundo Coutinho (1988), mensura as quantidades de insumos do material a partir de uma curva de referência ótima, relativa a uma composição granulométrica que considera principalmente o fator trabalhabilidade.

As metodologias de ensaio foram baseadas em normas portuguesas, a *LNEC E-463/2004: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário* para o ensaio de ataque de cloretos e a *NP-1378: Agregados – Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio* para o ensaio de ataque de sulfatos. Esta última, devido à inexistência de uma norma portuguesa definida para ataque de sulfatos em betão. O ensaio de carbonatação é baseado na especificação técnica do Comitê Europeu de Normalização FprCEN/TS 12390-12 de 2010.



### 3.1 CONSTITUINTES DO BETÃO

Os betões desenvolvidos tiveram como princípio uma constituição mais próxima possível das já realizadas no mercado da construção. Assim, o convencional manteve a composição clássica formada por cimento, agregados e água; já aos betões auto-compactáveis de elevado desempenho foi acrescido apenas o adjuvante superplastificante, em virtude das suas características inerentes. A figura 3.1 indica tais composições.

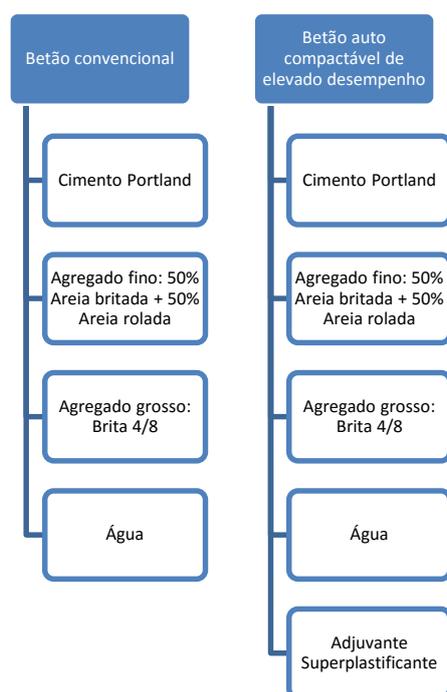


Figura 3.1 – Composição dos betões utilizados.  
Fonte: Acervo pessoal.

#### 3.1.1 Cimento Portland

Ligante com capacidade de adquirir pega em contato com a água, o cimento Portland é o principal constituinte em termos de propriedades físicas, químicas e mecânicas da pasta do betão.

A NP EN 197-1 de 2012 define os vários tipos de cimento disponíveis no mercado, indicando-os quanto à sua composição, conforme apresenta o quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Tipologia de cimentos de acordo com a NP EN 197-1/2012.

Fonte: Aguiar (2015).

Designação	Tipo
Cimento Portland	CEM I
Cimento Portland composto	CEM II
Cimento Portland de escória	CEM II-S
Cimento Portland de pozolana natural	CEM II-P
Cimento Portland de pozolana natural calcinada	CEM II-Q
Cimento Portland de cinza volante siliciosa	CEM II-V
Cimento Portland de cinza volante calcária	CEM II-W
Cimento Portland composto	CEM II-M
Cimento de alto-forno	CEM III
Cimento pozolânico	CEM IV
Cimento composto	CEM V

O CEM I é o cimento constituído pelo clínquer Portland, isto é, o de composição tradicional que deu origem aos demais. Os tipos II, III, IV e V são materiais que apresentam a inclusão de outros constituintes capazes de atuar da mesma forma que o clínquer Portland, geralmente resíduos industriais ou de bases siliciosas naturais ou artificiais.

Dentre os vários tipos de cimento existentes, o CEM I é um dos mais aplicados nas obras portuguesas. Aguiar (2015) ainda explica que o CEM III e o CEM IV são os mais resistentes a meios agressivos, como ambientes marinhos e industriais com elevados níveis de sulfatos e nitratos, mas que são também os que apresentam uma taxa de endurecimento mais lenta, o que pode comprometer a remoção das cofragens no tempo desejado.

A NP EN 197 -1 DE 2012 é também o documento que elenca os requisitos mecânicos, físicos, químicos e de durabilidade dos cimentos.

Em termos de resistência mecânica, a referida norma aponta três classes de cimento, conforme indicado no item 2.2, a classe 32,5, a 42,5 e a 52,5.

Quanto às propriedades físicas, a norma portuguesa coloca como condição o tempo de início de presa e a expansibilidade. A primeira deve apresentar valores característicos acima de 75 minutos, 60 minutos e 45 minutos, respectivamente, para as classes de resistência 32,5, 42,5 e 52,5. Já a expansibilidade é limitada pelo valor característico de 10 mm para todas as classes.

Os requisitos químicos do material estão dispostos ao longo do texto normativo, com elucidações pontuais. No entanto, é importante ressaltar que os teores de aluminatos tricálcicos, de sulfatos e de cloretos presentes no material são informações importantes no que diz respeito à durabilidade do betão, principalmente em termos de formação de etringita e de ataque de cloretos, conforme indicado nas seções anteriores.

O Quadro 3.2 resume os valores limites para as classes de cimento existentes.

Quadro 3.2 – Valores limites para as classes de cimento.

Fonte: Aguiar (2015).

Propriedade		Valores limite para resultados individuais								
		Classe de resistência								
		32,5 L	32,5 N	32,5 R	42,5 L	42,5 N	42,5 R	52,5 L	52,5 N	52,5 R
Resistência inicial (MPa), valor-limite inferior	2 d	-	-	8,0	-	8,0	18,0	8,0	18,0	28,0
	7 d	10,0	14,0	-	14,0	-	-	-	-	-
Resistência de referência (MPa), valor-limite inferior	28 d	30,0			40,0			50,0		
Tempo de início de presa (min), valor-limite inferior		60			50			40		
Expansibilidade (mm), valor-limite superior		10								
Teor de sulfatos (em % SO <sub>3</sub> ), valor-limite superior	CEM I CEM II <sup>a)</sup> CEM IV CEM V	-	4,0	-	4,0	4,5	-	4,5		
	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5 <sup>b)</sup> CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	-	3,5	-	3,5	4,0	-	4,0		
	CEM III/A CEM III/B	4,5								
	CEM III/C	5,0								
C <sub>3</sub> A (%), valor-limite superior	CEM I-SR 0	1								
	CEM I-SR 3	4								
	CEM I-SR 5	6								
	CEM IV/A-SR	10								
	CEM IV/B-SR	10								
Teor de cloretos (%) <sup>c)</sup> , valor-limite superior		0,10 <sup>d)</sup>								
Pozolanicidade		-	Satisfaz o ensaio aos 15 d	-	Satisfaz o ensaio aos 15 d	-	Satisfaz o ensaio aos 15 d			
Calor de hidratação (J/g), valor-limite superior	LH	300								

a) Os cimentos dos tipos CEM II/B-T e CEM II/B-M com teor de T > 20 % poderão conter até 5,0 % de SO<sub>3</sub> em todas as classes de resistência.

b) Para aplicações específicas o CEM I – SR 5 poderá ser fabricado com um mais alto teor máximo de sulfatos (ver Quadro 5). Se for o caso, o valor-limite superior é 0,5 % acima do valor declarado.

c) O cimento do tipo CEM III poderá conter mais do que 0,10 % de cloretos, mas neste caso o teor máximo de cloretos deve ser declarado.

d) Para aplicações em betão pré-esforçado, os cimentos poderão ser fabricados para satisfazer um valor inferior. Se assim for, o valor de 0,10 % deve ser substituído por este valor inferior, o qual deve ser mencionado na guia de remessa.

Em termos de qualidade, também a NP EN 197-1 define os métodos de avaliação e controle da conformidade do material. A partir disto, com a Decisão da Comissão de 14 de julho de 1997 (97/555/CE), seguindo o sistema de atestação da conformidade 1+, os materiais devem apresentar a marcação CE baseada na referida norma. Desse modo, o cimento que apresentar afixado à sua embalagem a marcação CE atesta que está conforme com os requisitos para as propriedades mecânicas, físicas e químicas estabelecidos pela NP em questão, permitindo presumir sua qualidade adequada.

Para este trabalho, o cimento escolhido foi o CEM I 42,5 R, cujo fabricante é a SECIL Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A. O tipo I foi selecionado devido ao seu uso comum no mercado da construção. A classe 42,5 R, por sua vez, apresenta características que

contribuem para as propriedades relativas ao betão de elevado desempenho e mantém o contexto de aplicação usual nas obras práticas.

O material encontrou-se disponível para uso nas dependências internas do laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho Campus Guimarães, depositado sobre paletes.

De acordo com seu catálogo de produtos, o fabricante afirma que o cimento é certificado segundo a NP EN 197-1 e que os certificados de conformidade são dados pelos códigos 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124. Os quadros 3.3 a 3.5 indicam os valores das propriedades químicas, físicas e mecânicas fornecidos pela SECIL.

*Quadro 3.3 – Características químicas do cimento Portland 42,5 R SECIL.  
Fonte: Catálogo de produtos SECIL (2016).*

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

*Quadro 3.4 – Características físicas do cimento Portland 42,5 R SECIL.  
Fonte: Catálogo de produtos SECIL (2016).*

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

*Quadro 3.5 – Características mecânicas do cimento Portland 42,5 R SECIL.  
Fonte: Catálogo de produtos SECIL (2016).*

Resistência à Compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência
2 dias	7 dias	28 dias
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5
NP EN 196-1		

Informação importante, os teores de C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF não são indicados na ficha técnica deste cimento. No entanto, a SECIL oferece, em ficha de resultados de autocontrolo (anexo), os teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, indicando 4,43% e 3,50% em peso, respectivamente. Logo, a partir do método proposto por Bogue em 1929, pode-se estimar a quantidade de C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF

no cimento. Esta técnica é aceita pela ASTM. Bogue (1955) indica que, para uma relação  $Al_2O_3 / Fe_2O_3 \leq 0,64$ , o teor de  $C_3A$  é calculado pela equação  $C_3A = 2,650x(Al_2O_3) - 1,692x(Fe_2O_3)$ ; o teor de  $C_4AF$ , por sua vez, é dado por  $C_4AF = 3,043x(Fe_2O_3)$ . Feitos os cálculos, o teor de  $C_3A$  e  $C_4AF$  para o CEM I 42,5 R são de 5,82% e 10,65%, respectivamente.

### 3.1.2 Agregados

Constituintes com grande e variada importância no betão, os agregados podem ser classificados quanto às suas dimensões, suas formas, sua origem e sua densidade.

No âmbito dimensional, os agregados são divididos em finos ou grossos. Os primeiros são limitados pelo valor de quatro milímetros, isto é, apresentam dimensão superior das partículas menor ou igual a 4 mm. Os grossos são limitados pelos valores quatro e dois milímetros, ou seja, dimensão superior das partículas maior ou igual a 4 mm e dimensão inferior das partículas maior ou igual a 2 mm.

Quanto à forma, sabe-se que uma superfície esférica dos agregados contribui significativamente com a facilidade de aplicação do material, a sua trabalhabilidade. Há ainda a questão da aderência entre estes constituintes e a pasta. Um agregado mais rugoso se apresenta mais interessante do ponto de vista da aderência. Portanto, não há um consenso ótimo para a forma dos agregados, ficando a cargo do tipo de aplicação a escolha do material mais adequado. Em termos de BACED, a problemática é maior; tendo em vista que o betão requer uma excelente trabalhabilidade – opção pelo agregado esférico, mas também demanda boa aderência em virtude do seu desempenho – opção pelo rugoso, a escolha do agregado deve ser balanceada, sendo os cúbicos com arestas arredondadas uma opção cabível para esse tipo de betão.

Naturais ou artificiais, os agregados variam ainda quanto à sua origem. Quando provêm da natureza, são submetidos a processos mecânicos de conformidade e mantêm suas propriedades naturais; são exemplos os godos, as areias marinhas, as areias fluviais, etc. Os agregados artificiais, por sua vez, são oriundos de processamento industrial, em que resultam da fragmentação de rochas; as britas, areias de trituração e o pó de pedreira exemplos dessa tipologia. Uma outra classificação de origem mais recente é a dos agregados reciclados, os quais são caracterizados pela fragmentação de elementos usados na construção, como peças estruturais e tijolos.

A densidade é também fator classificatório. Os agregados podem ser ditos leves, normais ou pesados, de acordo com sua densidade. Quando apresentam massa volúmica

menor que 2000 kg/m<sup>3</sup>, são denominados leves; entre 2000 kg/m<sup>3</sup> e 3000 kg/m<sup>3</sup>, normais; acima de 3000 kg/m<sup>3</sup>, são chamados agregados pesados.

O quadro 3.6 resume os tipos de agregado e suas classificações.

Quadro 3.6 – Classificação dos agregados para betão.

Fonte: Acervo pessoal.

DIMENSÃO		FORMA		ORIGEM			DENSIDADE		
Finos	Grosso	Esféricos	Rugosos	Naturais	Artificiais	Reciclados	Leves	Normais	Pesados
≤ 4 mm	Menor dimensão ≥ 2 mm e maior dimensão ≥ 4 mm	Melhor trabalhabilidade	Melhor aderência				$\gamma \leq 2000$	$2000 \text{ kg/m}^3 \leq \gamma \leq 3000 \text{ kg/m}^3$	$\gamma \geq 3000$

Uma preocupação inerente à escolha dos agregados ocorre quanto à existência de impurezas nas superfícies dos agregados, o pó residual. Estes elementos indesejados podem implicar em perdas de resistência no que diz respeito à necessidade de mais água, ou consumo exagerado do líquido, bem como em perdas de interação entre agregado e pasta, prejudicando a aderência entre estes.

Em termos de marcação CE, a NP EN 12620 de 2010 define o sistema 2+ para utilizações com requisitos de segurança elevados e o sistema 4 para utilizações sem requisitos de segurança elevados.

### 3.1.2.1 Agregados finos

Os agregados finos utilizados no exercício experimental foram de duas origens diferentes – natural e artificial – e ambos de mesma dimensão – 0/4.

O agregado artificial foi uma areia britada oriunda de aquisição em depósito situado na cidade de Guimarães. Realizou-se então o ensaio de granulometria para a correta caracterização da areia com posterior desenvolvimento da sua respectiva curva. As figuras 3.2 e 3.3 retratam o o respectivo material e o seu ensaio granulométrico.



Figura 3.2 – Composição granulométrica e aspecto da areia britada.  
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 3.3 – Ensaio de granulometria.  
Fonte: Acervo pessoal.

A curva granulométrica do agregado fino britado foi desenvolvida com o auxílio de planilha Excel e tem caráter conforme a figura 3.4.

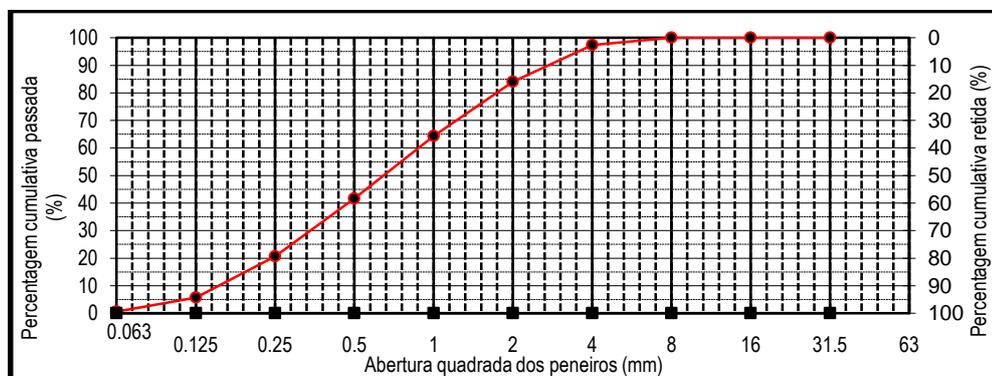


Figura 3.4 – Curva granulométrica areia britada.  
Fonte: Acervo pessoal.

Foram ainda aferidas as massas volúmicas do material, que são descritas no quadro 3.7.

*Quadro 3.7 – Massas volúmicas areia britada.  
Fonte: Acervo pessoal.*

	Unidade	Quantidade
<b>Massa volúmica do material impermeável das partículas</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>2674</b>
<b>Massa volúmica das partículas saturadas</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>2608</b>
<b>Massa volúmica das partículas secas</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>2569</b>
<b>Absorção de água</b>	<b>%</b>	<b>1.52</b>

Tendo em vista tais características, este material pode ser classificado como agregado fino, artificial e rugoso, com densidade normal.

O agregado natural, por sua vez, é oriundo do fabricante Mibal – Minas de Barqueiros, S.A. e apresenta marcação CE, a partir do código 0866-CPD-2004/CE.021. O sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto utilizado é o 2+. As figuras 3.5 e 3.6 e o quadro 3.8 apresentam o aspecto, a curva granulométrica e a ficha técnica do material, respectivamente. A partir de suas especificações, pode-se designar este agregado como fino, natural e esférico, com densidade normal.



*Figura 3.5 – Aspecto areia natural.  
Fonte: Acervo pessoal.*

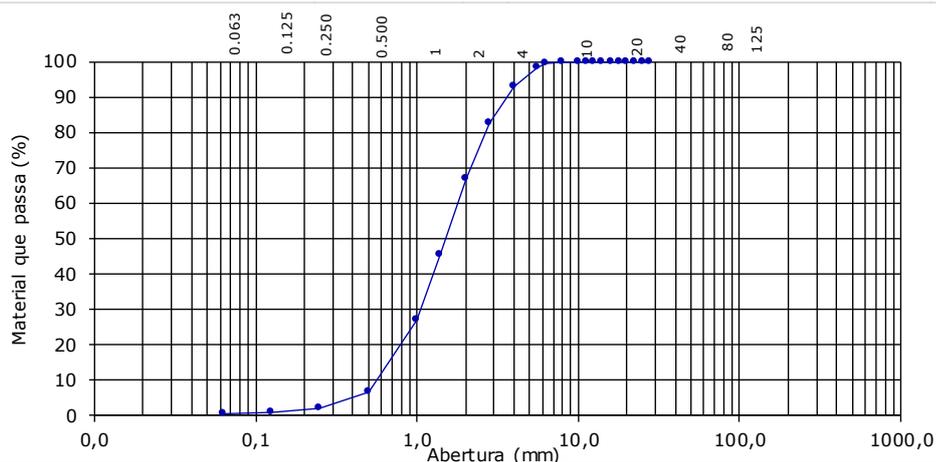


Figura 3.6 – Curva granulométrica areia natural.  
Fonte: Ficha técnica Mibal.

Quadro 3.8 – Ficha técnica areia natural.  
Fonte: Ficha técnica Mibal.

Características essenciais	Desempenho			Especificações técnicas harmonizadas
Forma das Partículas	NA			
Massa Volúmica	$\rho_a = 2.64 \text{ Mg/m}^3$ $\rho_{sd} = 2.58 \text{ Mg/m}^3$ $\rho_{pod} = 2.60 \text{ Mg/m}^3$			NP EN 1097-6:2003/A1:2010
Baridade e Volume de Vazios do Agregado	$\rho_b = 1.52 \text{ Mg/m}^3$ $V = 41.66 \%$			NP EN 1097-3:2002
Dimensão das partículas	EN 12620 0/4 Gr85	EN 13139 0/4 0/4	EN 13242 0/4 Gr85; Gr10	NP EN 933-2:1999
Teor de finos	EN 12620 $f_s$	EN 13139 Categoria 1	EN 13242 $f_s$	NP EN 933-2:1999
Qualidade dos finos	$\geq 70$			NP EN 933-8:2002
Teor de conchas	NA			
Resistência a fragmentação ou ao esmagamento	NA			
Resistência ao polimento	NA			
Resistência à abrasão	NA			
Resistência ao desgaste	NA			
Cloretos	DND			
Sulfatos solúveis em água	DND			
Sulfatos solúveis em ácido	DND			
Sulfuretos solúveis em ácido	DND			
Enxofre total *	EN 12620 <0.1% (LQ)	EN 13139 <0.1% (LQ)	EN 13242 $S_1$	EN 1744-1:2009 (Secção 11.1)
Constituintes que alterem a velocidade de hidratação e a resistência do betão *	Não contém			EN 1744-1:2009 (Secção 15.1)
Teor de carbonato	DND			
Retração por secagem	0.032 %			NP EN 1367-4:2008
Constituintes que afectam a estabilidade volumétrica das escórias de alto-forno arrefecidas por ar	NA			
Absorção de água	0.88 %			NP EN 1097-6:2003/A1:2010
Emissão radioactiva **	Actividade em: $^{226}\text{Ra} = (22.5 \pm 0.5) \text{ Bq Kg}^{-1}$ $^{232}\text{Th} = (28.7 \pm 0.8) \text{ Bq Kg}^{-1}$ $^{40}\text{K} = (1188 \pm 22) \text{ Bq Kg}^{-1}$			
Libertação de metais pesados ***	Arsénio, Cádmio, Cobre, Chumbo e Mercúrio <Limite de Quantificação Crómio = 3.7 mg/Kg Níquel = 2.1 mg/Kg Zinco = 18 mg/Kg			
Libertação de hidrocarbonetos poliaromáticos ****	<Limites de Quantificação			
Libertação de outras substâncias perigosas	DND			
Resistência ao sulfato de magnésio	DND			
Reactividade alcali-silica e alcali-silicato	DND			



### 3.1.2.2 Agregados grossos

Partindo do princípio auto-compactável inerente ao betão em estudo, despendeu-se um agregado grosso artificial fabricado pela Britaminho-Granitos e britas do Minho, Ltda., com dimensão característica 4/8, superfície rugosa e forma angulosa (Figura 3.7). Sua densidade é definida como normal, conforme indica ficha técnica apresentada no quadro 3.9.

O produto é certificado com a marcação CE, a partir do código 0866-CPD-0088. A figura 3.8 indica a curva granulométrica do material, disponibilizada pelo fabricante.



Figura 3.7 – Aspecto brita 4/8.

Fonte: Acervo pessoal.

Quadro 3.9 – Ficha técnica brita.

Fonte: Ficha técnica Britaminho.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PRODUTO			
NORMA	EN 12620:2002+A1	NP EN 13043:2004	EN13242:2002+A1
Dimensão nominal (d/D)	4/8		
Granulometria	Gc85/20		Gc80-20
Índice de achatamento	F115		F120
Índice de forma	SI20	SI20	SI20
Teor de finos	f1.5	f0.5	F2
Resistência à fragmentação	LA40		
Resistência ao desgaste	MDE15		MDE15
Resistência ao polimento	PSV50	PSV50	NA
Massa Volúmica:			
- Material impermeável	2.66		
- Partículas secas em estufa	2.62		
- Partículas saturadas	2.64		
- Absorção de água	0.6 %		0.6 %
Afinidade entre agregado e betume	NA	29 %	NA
Teor de cloretos	0.0 %		NA
Teor de húmus <sup>a</sup>	Mais clara	NA	Mais clara
Contaminantes orgânicos leves	LPC0.0	NA	
Descrição Petrográfica	<p>Estrutura: Compacta                      Textura: Holocristalina, fanerítica, de grão médio, com tendência porfiróide                      Alteração: S9 a pouco alterada (W1-2)                      Superfície: Áspera                      Porosidade: baixa                      Forma: angulosa                      Anisotropia: Isotrópica                      Vesicularidade: Não apresenta                      Outras propriedades verificadas: Cor cinza claro. Predominância da biotite. Apresenta fenocristais de feldspato                      Minerais presentes e respectivas dimensões: Quartzo (1 a 5 mm), feldspatos (1.5 a 18 mm), micas (0.5 a 2 mm) e outros. As percentagens aproximadas são 45%, 45%, 9%, 1%, respectivamente.                      Modo de Jazida: Batólito e/ou lacólito                      Idade geológica: Hercínica                      Classificação geológica: Rocha ígnea plutónica - Granito</p>		



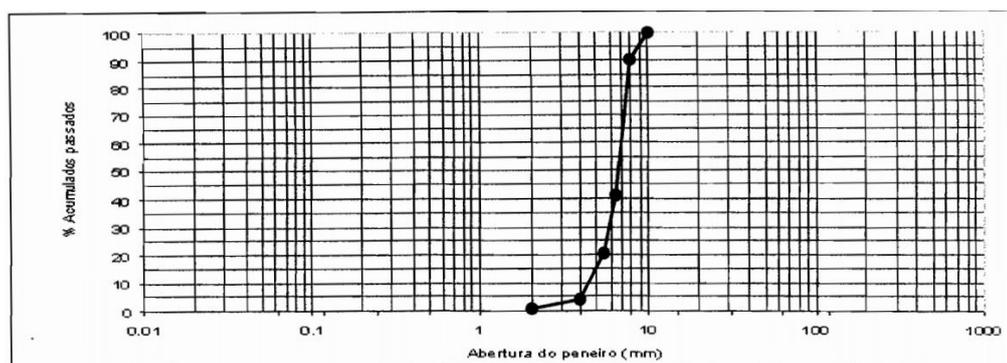


Figura 3.8 – Curva granulométrica brita.  
Fonte: Ficha técnica Britaminho.

### 3.1.3 Água

Com duas funções específicas, conforme indicado no item 2.2, a água é responsável por ativar o ligante utilizado e conferir trabalhabilidade ao betão. Do ponto de vista do acionamento hidráulico do material aglutinante, a literatura, em geral, afirma que uma percentagem de água de 23% do ligante é a necessária para ativá-lo, sendo a quantidade remanescente destinada à trabalhabilidade.

Fator importante é a origem da água utilizada. A NP EN 1008 de 2003 rege a aplicação do líquido em betões e faz considerações quanto à procedência da água selecionada, tal que em síntese: água potável ou da rede satisfaz os requisitos normativos; água superficial natural subterrânea ou residual industrial pode ser apta, devendo ser submetida aos ensaios indicados na norma antes da sua utilização; água do mar ou água salobra são normalmente adequadas apenas para betão simples. No caso da necessidade de realização de ensaios, é imprescindível aferir o teor de cloretos do líquido, principalmente quando se tratar de aplicação em betão armado.

A água utilizada no desenvolvimento dos betões auto-compactáveis de elevado desempenho deste trabalho foi a da rede de abastecimento da cidade de Guimarães/PT, sendo isenta da necessidade de realização de ensaios, segundo a referida norma, e estando apta para aplicação em betões.

### 3.1.4 Adjuvante superplastificante

Os adjuvantes superplastificantes são materiais adicionados à mistura com a função de lhes alterar características no estado fresco, principalmente, mas também no betão endurecido. O papel fundamental do superplastificante é o de proporcionar a desfloculação da pasta no estado fresco, de modo a adjudicar um potencial aumento da trabalhabilidade do betão. Em

consequência, o percentual de água relativo à facilidade de manuseio do material pode ser reduzido, o que culmina em um menor teor de vazios no estado endurecido e, portanto, contribui com o aumento da resistência do betão. No estado fresco há ainda colaboração com o retardo da pega do betão, tendo em vista que a atuação dispersante do adjuvante atrasa a interação química da pasta, o que implica também no aumento do tempo de pega.

O superplastificante utilizado foi o GLENIUM® SKY 617, fabricado pela BASF Constructin Chemicals España, S.L. O adjuvante tem base de éter policarboxílico e é indicado para a produção de betão pronto, com elevada manutenção da trabalhabilidade e durabilidade. O fabricante afirma que o mecanismo de ação do produto decorre tanto pelo efeito eletrostático como pelo efeito estérico das cadeias laterais hidrofílicas presentes na cadeia polimérica da base, promovendo uma capacidade de separação e dispersão elevada, proporcionando evidente redução do conteúdo de água. O fabricante ainda assegura ganhos de resistência à compressão nos primeiros dias de idade do betão e sensíveis aos 28 dias.

Em termos de durabilidade, a BASF indica que o GLENIUM® SKY 617 contribui para a minimização dos fenômenos de retração, melhora a aderência do betão às armaduras e potencializa a impermeabilidade do material.

O quadro 3.10 apresenta a ficha técnica do superplastificante fornecida pelo fabricante.

*Quadro 3.10 – Ficha técnica superplastificante GLENIUM® SKY 617.  
Fonte: Ficha técnica BASF.*

<b>Características técnicas</b>	
Função principal:	Superplastificante / Forte redutor de água
Marcação CE:	Segundo NP EN 934-2 como T11.1, T11.2
Aspecto:	Líquido castanho
Densidade relativa (20°C):	1,05 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
pH:	7,3 ± 1,5
Teor em íões cloreto:	< 0,1%
<small>Os dados técnicos aqui apresentados são fruto de resultados estatísticos. Caso se pretendam valores de controlo, podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico.</small>	

## 3.2 COMPOSIÇÃO E DOSAGEM

Foram desenvolvidos estudos acerca de três betões, distintos em termos de dosagem e similares quanto à composição, caracterizando um betão convencional de referência e dois betões auto-compactáveis de elevado desempenho. O primeiro apresenta dosagem de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup> e não possui a inserção de adjuvante superplastificante. Os auto-compactáveis de elevado desempenho têm 500 kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup> de ligante e a presença de



superplastificante (Figura 3.9). Todos tiveram em comum a presença do agregado grosso supracitado, de 50% do agregado fino natural e 50% do agregado fino artificial também acima indicados, de água da rede de abastecimento de Guimarães e do cimento CEM I 42,5 R. Observa-se aqui que foram utilizados dois tipos de agregado fino, mas foi aplicada a curva apenas do agregado artificial nos cálculos de composição, tendo em vista a proximidade das características dimensionais dos dois constituintes.

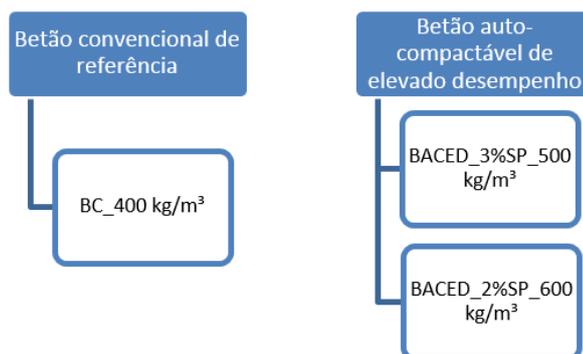


Figura 3.9 – Betões desenvolvidos.  
Fonte: Acervo pessoal.

O método de dosagem utilizado foi o proposto por Faury em 1958, que sugere o cálculo das quantidades dos constituintes a partir de uma composição granulométrica de referência ótima. Neste método, a dosagem de ligante, a relação água/ligante e o teor de adjuvante são pré-definidos pelo técnico, sendo então calculadas as quantidades dos agregados a partir de uma curva de referência otimizada.

Visando à durabilidade do betão, Aguiar (2015) afirma que se deve optar por uma vida útil de projeto para o material conforme a sua aplicação (Quadro 3.11). A partir disto, a especificação LNEC E464 de 2007 indica vários requisitos de composição que contribuem para o objetivo fixado.

Quadro 3.11 – Categorias de vida útil.  
Fonte: Aguiar (2015).

Vida útil das obras		Exemplos
Categoria	Anos	
1	10	Estruturas temporárias
2	10 a 25	Partes estruturais substituíveis, p.ex., apoios
3	15 a 30	Estruturas para a agricultura e semelhantes
4	50	Edifícios e outras estruturas comuns (p.e., hospitais, escolas)
5	100	Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil

Em geral, para as edificações comuns, adota-se vida útil de projeto de 50 anos, período para o qual seguem, nos quadros 3.12 a 3.15, as recomendações do LNEC, as quais foram consideradas nas composições desenvolvidas neste trabalho.

Quadro 3.12 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos.

Fonte: Aguiar (2015).

Tipo de cimento	CEM I (referência); CEM II/A <sup>(1)</sup>				CEM II/B <sup>(1)</sup> ; CEM III/A <sup>(2)</sup> ; CEM IV <sup>(2)</sup> ; CEM V/A <sup>(2)</sup>			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Classe de exposição								
Mínimo recobrimento nominal (mm)	25	35	35	40	25	35	35	40
Máxima razão água/cimento	0,65	0,65	0,60	0,60	0,65	0,65	0,55	0,55
Mínima dosagem de cimento C (kg/m <sup>3</sup> )	240	240	280	280	260	260	300	300
Mínima classe de resistência	C25/30 LC25/28	C25/30 LC25/28	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C25/30 LC25/28	C25/30 LC25/28	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33

(1) Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respetivamente.

(2) Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer Portland, em massa.

Quadro 3.13 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos.

Fonte: Aguiar (2015).

Tipo de cimento	CEM IV/A (referência); CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V; CEM II/B <sup>(1)</sup> ; CEM II/A-D			CEM I; CEM II/A <sup>(1)</sup>		
	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3
Classe de exposição						
Mínimo recobrimento nominal (mm)	45	50	55	45	50	55
Máxima razão água/cimento	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45	0,40
Mínima dosagem de cimento C (kg/m <sup>3</sup> )	320	320	340	360	360	380
Mínima classe de resistência	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C35/45 LC35/38	C40/50 LC40/44	C40/50 LC40/44	C50/60 LC50/55

(1) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L, II/B-LL.

Quadro 3.14 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do gelo/degelo, para uma vida útil de 50 anos.

Fonte: Aguiar (2015).

Tipo de cimento	CEM I (referência); CEM II/A <sup>(1)</sup>		CEM II/B <sup>(1)</sup> ; CEM III/A <sup>(2)</sup> ; CEM IV <sup>(2)</sup> ; CEM V/A <sup>(2)</sup>	
	XF1	XF2	XF1	XF2
Classe de exposição				
Máxima razão água/cimento	0,60	0,55	0,55	0,50
Mínima dosagem de cimento C (kg/m <sup>3</sup> )	280	280	300	300
Mínima classe de resistência	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33
Teor mínimo de ar (%)	-	4,0	-	4,0

(1) Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respetivamente.

(2) Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer Portland em massa.



Quadro 3.15 – Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ataque químico, para uma vida útil de 50 anos.

Fonte: Aguiar (2015).

Tipo de cimento	CEM IV/A (referência); CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V; CEM II/B <sup>(1)</sup> ; CEM II/A-D			CEM I; CEM II/A <sup>(1)</sup>		
	XA1	XA2 <sup>(2)</sup>	XA3 <sup>(2)</sup>	XA1	XA2 <sup>(2)</sup>	XA3 <sup>(2)</sup>
Máxima razão água/cimento	0,55	0,50	0,45	0,50	0,45	0,45
Mínima dosagem de cimento C (kg/m <sup>3</sup> )	320	340	360	340	360	380
Mínima classe de resistência	C30/37 LC30/33	C35/45 LC35/38	C35/45 LC35/38	C35/45 LC35/38	C40/50 LC40/44	C40/50 LC40/44

(1) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.

(2) Quando a agressividade resultar da presença de sulfatos, os cimentos devem satisfazer os requisitos mencionados na secção 5.3, nomeadamente no Quadro 2.16 aplicando-se ao betão as exigências estabelecidas neste quadro para o CEM IV.

Observa-se que a classe de exposição é um dos fatores que definem os requisitos. Como não há neste desenvolvimento experimental a definição de um ambiente específico de exposição, considera-se valores medianos e que atendam aos limites afirmados.

No cálculo das quantidades e na escolha da composição do betão, um elemento importante é a definição da sua classe de abaixamento ou espalhamento, que estão relacionadas com a trabalhabilidade do material. A EN 206-1 de 2013 aponta as classes possíveis em que os betões auto-compactáveis podem se inserir, conforme indica o quadro 3.16.

Quadro 3.16 – Classes de abaixamento e espalhamento de betões auto-compactáveis.

Fonte: EN 206-1 – 2013.

Class	Slump-flow <sup>a</sup> tested in accordance with EN 12350-8	
	mm	
SF1	550 to 650	
SF2	660 to 750	
SF3	760 to 850	

<sup>a</sup> The classification is not applicable to concrete with  $D_{max}$  exceeding 40 mm.

O trabalho não apresenta um viés específico do ponto de vista do abaixamento e espalhamento, tal que não se fixou uma dessas classes para os betões. No entanto, para os auto-compactáveis, há um limite mínimo que deve ser atingido, isto é, o betão deve apresentar no mínimo um espalhamento de 550 mm, conforme indicado no quadro 3.16, de acordo com a EN 12350-8. Para o convencional, apenas expectou-se o alcance da classe S2.

Pelo método de Faury, a trabalhabilidade é considerada pela definição dos parâmetros A e B, os quais são utilizados para a seleção do módulo de finura relativo ao betão em estudo e posterior cálculo das dosagens. O quadro 3.17 indica os valores destinados aos parâmetros em questão pelo método de dosagem de Faury.

Quadro 3.17 – Valores dos parâmetros A e B da curva de Faury.  
Fonte: Acervo pessoal.

6 - PARÂMETROS DA CURVA DE FAURY						
Consistência	Meios de compactação	Valores de A			Valores de B	
		Natureza dos Agregados				
		Areia rolada		Areia e Agregado grosso britado		
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado			
Terra Úmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)	≤18	≤19	≤20	1	
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1.5	
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1.5	
Mole	Apiloamento	28	30	32	2	
Fluída	Espalhamento e compactação pelo peso próprio	32	34	38	2	
Areia rolada e agregado grosso britado:		A = 20 + slump (cm)			Valores adotados	
Areia rolada e agregado grosso rolado:		A = 18 + slump (cm)			A	B
					34	2

Quanto às classes de resistências, também não se definiu uma classe específica para os betões. No entanto, para os de elevado desempenho, o valor mínimo apontado na literatura é o do ACI, uma resistência característica de 41 MPa, a qual foi assumida como limite mínimo para caracterização de resistência dos betões de elevado desempenho. Do ponto de vista das normas europeias, o limite é a classe C50/60, mas adota-se aqui uma classificação C35/45 como o limite inferior para os BACED produzidos, de forma a corroborar com o estipulado pelo American Concrete Institute.

A seguir são discriminadas as composições e dosagens de cada betão desenvolvido, considerando a aplicação do método de Faury, os limites supracitados e a obtenção de materiais próximos aos utilizados correntemente no mercado. O cálculo das dosagens decorreu de uso de planilha Excel disponibilizada pelo Departamento de Engenharia Civil – Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho – Campus Azurém.

### 3.2.1 Composição e dosagem BC\_400 kg/m<sup>3</sup>

Para que se possa analisar com maior precisão os resultados dos betões auto-compactáveis de elevado desempenho, é preciso compará-los a uma situação de referência. Nesse contexto, desenvolveu-se o dimensionamento de um betão convencional com constituição similar à dos demais.

No procedimento de dosagem deste betão pelo método de Faury utilizando a ferramenta Excel supracitada, foram definidos inicialmente a dosagem do ligante, a razão água/ligante, os parâmetros A e B da curva de Faury e as curvas granulométricas dos agregados despendidos.

De início, utilizou-se uma dosagem de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup>. No entanto, com o decorrer dos trabalhos laboratoriais, conforme indicado no item 3.3 a seguir, percebeu-se a necessidade de finos no betão, tal que se aumentou a dosagem de cimento para 400 kg/m<sup>3</sup>.

A relação água/cimento adotada foi de 0,55, já que se trata de um betão convencional e visando ao equilíbrio entre os requisitos de durabilidade indicados nos quadros 3.9 a 3.12.

A definição dos parâmetros A e B resultou nos valores 34 e 2, respectivamente.

As curvas utilizadas foram as indicadas no item 3.1.2 deste capítulo.

O quadro 7.1 em anexo apresenta a folha de cálculo utilizada, com as respectivas informações e soluções para o betão convencional de 400 kg/m<sup>3</sup> de cimento. O quadro 3.18 sintetiza esta dosagem.

*Quadro 3.18 – Dosagem BC\_400.*

*Fonte: Acervo pessoal.*

Material	Dosagens por m <sup>3</sup> de Betão	
Cimento	400,00	kg
Areia média 0/4	1089,95	kg
Brita 4/8 BRITAMINHO	514,19	kg
SP	0,00	kg
Água	238,62	l
Relação água/cimento	0,55	

### 3.2.2 Composição e dosagem BACED\_3%SP\_500 kg/m<sup>3</sup>

No procedimento de dosagem deste betão pelo método de Faury utilizando a ferramenta Excel supracitada, foram definidos inicialmente a dosagem do ligante, a razão água/ligante, o teor de adjuvante superplastificante, os parâmetros A e B da curva de Faury e as curvas granulométricas dos agregados despendidos.

Visando ao alto consumo de ligante característico de betões de elevado desempenho, definiu-se o primeiro BACED com teor de ligante de 500 kg/m<sup>3</sup>. Outro fator que contribui também para este valor é o objetivo de avaliar a formação de etringita secundária mediante o elevado calor de hidratação produzido por esses materiais, fenômeno que é potencializado com o aumento do consumo de cimento.

A relação água/cimento adotada foi de 0,40, partindo do princípio que se trata de um betão de elevado desempenho e em virtude do uso de adjuvante superplastificante, que permite a redução desta razão. Além disso, pondera-se aqui os requisitos de durabilidade

indicados nos quadros 3.9 a 3.12, bem como o limite de 0,40 defendido por Camões (2006) para betões de elevado desempenho.

O teor de superplastificante utilizado para este betão foi de 3%. Tal valor é indicado como limite em aplicações de adjuvantes desta natureza e ainda é superior ao valor de 1,3% recomendado pelo fabricante. No entanto, trata-se de um betão com carácter comum, isto é, sem adições e com constituintes mais próximos possíveis da situação mercadológica. Isso portanto denotou a necessidade de mais adjuvante dispersante para se conseguir um material trabalhável, conforme é indicado no item 3.3 abaixo. Aguiar (2015) ainda respalda tal decisão afirmando que o uso do adjuvante deve ser inferior ao limite do fabricante e não ultrapassar o valor de 50 g por cada quilo de cimento, mas que a influência positiva de uma maior dosagem do adjuvante no âmbito do desempenho e da durabilidade pode justificar o ato. A título de informação, o teor de 3% no BACED de 500 kg/m<sup>3</sup> resulta em 30 g de superplastificante para cada quilograma de cimento, abaixo do limite estabelecido por Aguiar.

A definição dos parâmetros A e B resultou também nos valores 34 e 2, respectivamente.

As curvas granulométricas dos agregados utilizadas foram as indicadas no item 3.1.2 deste capítulo.

O quadro 7.2 em anexo apresenta a folha de cálculo utilizada, com as respectivas informações e soluções para o betão auto-compactável de elevado desempenho de 500 kg/m<sup>3</sup> de cimento. O quadro 3.19 sintetiza esta dosagem.

*Quadro 3.19 – Dosagem BACED\_500.*

*Fonte: Acervo pessoal.*

Material	Dosagens por m <sup>3</sup> de Betão	
Cimento	500,00	kg
Areia média	1048,10	kg
Brita 4/8 BRITAMINHO	526,18	kg
SP	15,19	kg
Água	205,59	l
Relação água/cimento	0,40	

### 3.2.3 Composição e dosagem BACED\_2%SP\_600 kg/m<sup>3</sup>

Este betão tem, por coerência de investigação, as mesmas características de composição do BACED\_3%SP\_500 kg/m<sup>3</sup>, haja vista a necessidade de comparação de resultados entre materiais semelhantes. A alteração do consumo de cimento e do teor de superplastificante para 600 kg/m<sup>3</sup> e 2% são as únicas diferenças entre os dois betões.

O quadro 7.3 em anexo indica a composição e dosagem do referido material. O quadro 3.20 sintetiza esta dosagem.

Quadro 3.20 – Dosagem BACED\_600.  
Fonte: Acervo pessoal.

Material	Dosagens por m <sup>3</sup> de Betão	
Cimento	600,00	kg
Areia média	882,95	kg
Brita 4/8 BRITAMINHO	506,49	kg
SP	11,60	kg
Água	245,94	l
Relação água/cimento	0,40	

### 3.3 FABRICAÇÃO DOS BETÕES

Selecionados e adquiridos os materiais, secados os agregados em estufa a 105°C e definidas as composições e dosagens dos betões, deu-se subsequência com o preparo das amassaduras. Os betões desenvolvidos foram fabricados nas dependências internas do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, em Guimarães – Azurém.

No ato da produção dos materiais, foram despendidos alguns equipamentos para a adequada fabricação e controle do betão. Para a combinação dos seus constituintes, utilizou-se betoneira misturadora de eixo vertical disponível no laboratório (Figura 3.10). Para a realização dos testes de abaixamento e espalhamento, uma colher de pedreiro, um cone de abrams, uma haste metálica e uma mesa acrílica para espalhamento foram necessários. Os moldes utilizados foram cúbicos metálicos, de 100 mm de aresta, e cilíndricos metálicos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para a compactação do betão convencional, utilizou-se uma mesa vibratória, conforme indica a figura 3.11.



Figura 3.10 – Betoneira de eixo vertical.  
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 3.11 – Mesa vibratória.  
Fonte: Acervo pessoal.

Foram necessários 26 provetes cúbicos e 3 provetes cilíndricos para cada tipo de betão. Após a moldagem, todos os elementos foram curados a seco e à temperatura ambiente de 20°C nas primeiras 24h. Entre as 24h e 48h de vida dos betões, 6/26 foram curados a 50°C, outros 6/26 a 80°C e os demais a 20°C, para cada tipo de betão. A partir das 48h, todos os provetes foram submetidos à temperatura ambiente de 20°C.

A seguir, são discriminadas as conjunturas técnicas e condições relativas à fabricação dos betões em estudo.

### 3.3.1 Betão Convencional: BC\_400

Este betão foi fabricado a partir das dosagens indicadas no item 3.2.1.

Conforme relatado na seção 3.2, em termos de propriedades no estado fresco, expectou-se uma classe S2 para o betão convencional, desenvolvendo-se um material com abaixamento entre 50 mm e 90 mm.

Inicialmente, visando a um dos objetivos principais do trabalho de produzir um material com caráter bastante similar ao correntemente despendido no mercado, foram compostas dosagens utilizando brita 10/20, com dosagem de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup> e razão a/c de 0,55. No entanto, ao executar a mistura, verificou-se baixíssima fluidez, com resultado de 15 mm no ensaio de abaixamento (Figura 3.12), e, portanto, um material inapto quanto à trabalhabilidade. Sugeriu-se então a troca da brita 10/20 por uma de menor dimensão, a 4/8, de modo a diminuir as tensões internas entre as partículas e tentar conseguir ganhos de trabalhabilidade.



Figura 3.12 – Resultado do ensaio de abaixamento BC\_350 com brita 10/20.

Fonte: Acervo pessoal.

Feita a troca do agregado grosso, manteve-se ainda a dosagem de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup> e a razão a/c de 0,55, mas novamente houve insucesso, com um abaixamento de 0mm (Figura 3.13). Ocorreu que, ao aumentar a superfície de contato do agregado, houve maior solicitação da pasta, o que inviabilizou ainda mais o fator trabalhabilidade. Concluiu-se,

então, que a solução estaria não apenas na troca do agregado, mas também no aumento do teor de finos.



Figura 3.13 – Resultado do ensaio de abaixamento BC\_350 com brita 4/8.  
Fonte: Acervo pessoal.

Dando sequência ao ajuste de composição e dosagem do betão convencional, a alteração seguinte, e definitiva, foi dada pelo aumento da quantidade de cimento por metro cúbico de betão, modificando-a para  $400 \text{ kg/m}^3$ , e pela inserção de um agregado fino de origem natural, em virtude de uma superfície arredondada característica do material. Optou-se por utilizar, então, 50% da areia artificial e 50% da areia natural. O agregado rolado foi também adotado devido a tentativas improficuas de desenvolvimento de betões auto-compactáveis de elevado desempenho com as conjunturas anteriores, conforme relatado no item 3.3.2 a seguir. A relação a/c de 0,55 foi mantida.

Definidas as novas composição e dosagem, procedeu-se com o desenvolvimento do material cimentício, obtendo-se um betão classe S3, com abaixamento de 100 mm (Figura 3.14), que foi adotado como o convencional deste trabalho.



Figura 3.14 – Resultado do ensaio de abaixamento BC\_400.  
Fonte: Acervo pessoal.

Foram executadas três misturas em três dias sequenciados do BC\_400 definido, sendo os resultados apresentados no quadro 3.21. Os resultados do *Slump Test* para as duas últimas foram de 60 mm e 90 mm, caracterizando o betão como de classe S2. Esta variação é possível

a partir das diferenças de condições de preparo comuns à fabricação do betão. O objetivo classificatório quanto ao ensaio de abaixamento foi portanto atingido, assim como não houve identificação de segregação, elevada exsudação ou qualquer caráter que inviabilizasse o material.

Quadro 3.21 – Resultados dos ensaios com o BC\_400 no estado fresco.

Fonte: Acervo pessoal.

	Amassadura 1	Amassadura 2	Amassadura 3	MÉDIA
Ensaio de abaixamento (mm)	100	60	90	83
T <sub>500</sub> (s)	-	-	-	-

### 3.3.2 Betão Auto-Compactável de Elevado Desempenho: BACED\_500\_3%SP

Este betão foi fabricado a partir das dosagens indicadas no item 3.2.2.

Trata-se de um betão auto-compactável de elevado desempenho e, conforme relatado na seção 3.2, em termos de propriedades no estado fresco, deve-se produzir, no mínimo, um material de classe SF1 pelo limite superior de 550 mm. Além disso, outro fator avaliado, indicador do grau de viscosidade de um BAC, foi o tempo de espalhamento, aferido pelo T<sub>500</sub>, que é definido como o tempo no qual o material atinge um diâmetro de 500 mm (Quadro 2.4).

Também foram despendidos esforços em prol de um BACED\_500 constituído por brita 10/20 – limite superior para betões auto-compactáveis de acordo com a literatura, almejando-se um BACED com constituintes mais próximos do convencional. Utilizou-se superplastificante a 2,5% e relação a/c de 0,4. No entanto, os resultados obtidos indicaram inviabilidade da composição idealizada, refutando o conceito inicial de betões desta natureza demasiadamente similares aos convencionais. As figuras 3.15 e 3.16 ilustram o insucesso relativo à tentativa de desenvolvimento do BACED\_500 com brita 10/20.



Figura 3.15 – Espalhamento de 380 mm BACED\_500\_2,5%SP com brita 10/20.  
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 3.16 – Aspecto BACED\_500\_2,5%SP com brita 10/20.  
Fonte: Acervo pessoal.

Assim como na produção do betão de referência, substituiu-se a brita 10/20 pela 4/8, a fim de se reduzir as tensões internas causadas pelos choques entre as partículas e aumentar a trabalhabilidade do material. Com isso, conseguiu-se potencial melhora do escoamento, mas também um nível indesejado de exsudação e segregação do betão (Figura 3.17).



Figura 3.17 – Ensaio de espalhamento BACED\_500\_2,5%SP.  
Fonte: Acervo pessoal.

Para minimizar a ocorrência de segregação e exsudação, optou-se pela redução da quantidade de superplastificante, abaixando-a para 1,5%. O resultado foi então ainda mais satisfatório, mas os fenômenos persistiram (Figura 3.18). A relação a/c foi mantida em 0,4.



Figura 3.18 – Ensaio de espalhamento BACED\_500\_1,5%SP.  
Fonte: Acervo pessoal.

Com o intuito de anular essas ocorrências, optou-se pela inserção do agregado fino natural, que também foi adicionado sob o fator de 50% da quantidade de agregado fino, assim

como no betão convencional. Para a outra parcela foi utilizado o artificial. Manteve-se a relação a/c em 0,4.

Após a adição do novo tipo de agregado, obteve-se uma mistura sem exsudação, mas com elevada segregação, denotando a necessidade de maior dispersão da pasta (Figura 3.19).



Figura 3.19 – Ensaio de espalhamento BACED\_500\_1,5%SP com 50% de areia natural.  
Fonte: Acervo pessoal.

Uma nova alteração foi feita, aumentou-se o teor de superplastificante para 3,0%. Com isto, obteve-se a composição e dosagem final do BACED\_500, que apresentou classificação SF1, com média de espalhamento de 580 mm, e  $T_{500}$  médio de 6s, valores calculados a partir dos resultados obtidos para cada uma das três amassaduras desenvolvidas (Quadro 3.22). As figuras 3.20 e 3.21 ilustram a configuração obtida.



Figura 3.21 – Preenchimento dos moldes cúbicos com BACED\_500\_3%SP.  
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 3.20 – Espalhamento BACED\_500\_3%SP.  
Fonte: Acervo pessoal.

Quadro 3.22 – Resultados dos ensaios com o BACED\_500\_3%SP no estado fresco.  
Fonte: Acervo pessoal.

	Amassadura 1	Amassadura 2	Amassadura 3	MÉDIA
Ensaio de espalhamento (mm)	580	560	600	580
$T_{500}$ (s)	7	6	5	6

### 3.3.3 Betão Auto-Compactável de Elevado Desempenho: BACED\_600\_2%SP

Este betão foi fabricado a partir das dosagens indicadas no item 3.2.3.

Tendo em vista a mesma tipologia de betão que o BACED\_500 e a necessidade de materiais similares em virtude de uma investigação coerente, este auto-compactável de elevado desempenho foi produzido somente após o ajuste da composição e dosagem do seu semelhante. Sendo assim, adotou-se então o mesmo arranjo do BACED\_500, alterando-se apenas o consumo de cimento para 600 kg/m<sup>3</sup>.

Em uma primeira fabricação, obteve-se um betão muito fluido, com sensíveis exsudação e segregação. Logo, optou-se então por reduzir o teor do adjuvante dispersante para 2%, conseguindo-se assim um excelente desempenho para este betão (Figura 3.22).

Também foram produzidas três amassaduras deste tipo de betão, tal que, para o ensaio de espalhamento, aferiu-se um valor médio de 772 mm e na determinação do tempo de espalhamento T<sub>500</sub> um valor médio de 1,8s. Os resultados para cada amassadura são apresentados no quadro 3.23.



Figura 3.22 – Espalhamento BACED\_600\_3%SP.  
Fonte: Acervo pessoal.

Quadro 3.23 – Resultados dos ensaios com o BACED\_600 no estado fresco.  
Fonte: Acervo pessoal.

	Amassadura 1	Amassadura 2	Amassadura 3	MÉDIA
Ensaio de espalhamento (mm)	790	750	775	772
T <sub>500</sub> (s)	1	1,8	2,5	1,8

### 3.4 ENSAIOS REALIZADOS

O escopo desta investigação está baseado na análise da durabilidade dos betões em estudo já definidos, mediante o ataque de cloretos e de sulfatos, além da avaliação da resistência à carbonatação dos materiais. Quanto aos sulfatos, é considerada com maior veemência a ação deletéria por formação de etringita secundária. Sendo assim, foram despendidos ensaios físico-químicos, mecânicos, microscópicos e de raio X a fim do correto juízo do comportamento dos materiais sob as referidas ações patológicas. Todos os ensaios foram realizados nas dependências internas do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho – Campus Azurém, Guimarães.

Para a avaliação dos comportamentos e consequências dos betões desenvolvidos face à ação dos agentes agressivos em estudo, foram despendidos ensaios de ataque de cloretos e ataque de sulfatos, de acordo com a *Especificação LNEC E 463 – Betão: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário* e com base na *NP 1378 – Agregados: Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio*. Ainda no âmbito do ataque de sulfatos, especificamente acerca da formação de etringita secundária, foram analisados provetes submetidos a variações de temperatura de cura entre as 24h e 48h de vida do material, com o intuito de se avaliar a formação do sulfoaluminato tricálcico também por fonte interna de sulfatos. Quanto ao potencial de carbonatação, utilizou-se a especificação técnica FprCEN/TS 12390-12 de 2010 – CEN.

Do ponto de vista mecânico, o ensaio de resistência à compressão foi realizado, em prol da aferição de possíveis alterações desta propriedade em virtude da ação degradante dos fenômenos em questão.

Algumas análises ocorrem a escalas muito pequenas, alcançando a dimensão nano, assim como outras são inseridas em um estudo mais complexo, implicando no uso de equipamentos especializados. Este tipo de situação decorre da necessidade de quantificação de etringita formada no betão e da indicação de poros e microporos no material. Para isto, foram realizados ensaios de Microscopia Eletrônica de Varrimento (MEV) e de Difractômetro de Raio X (DRX).

Em virtude do desenvolvimento desses trabalhos laboratoriais, foram estabelecidos alguns requisitos quanto aos tipos de provetes e condições experimentais, de acordo com o tipo de análise:



- No ataque de cloretos: uso de provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura;
- No ataque de sulfatos face à formação de etringita secundária: uso de provetes cúbicos de 100 mm de aresta; exposição dos provetes de cada tipo de betão às temperaturas de 20°C, 50°C e 80°C entre as 24h e 48h de vida dos materiais; uso de solução de sulfato de sódio aquando do ataque de sulfatos por fonte externa;
- No ensaio de potencial de carbonatação: uso de provetes cúbicos de 100 mm de aresta;
- No ensaio de resistência à compressão: uso de provetes cúbicos de 100 mm de aresta; exposição de provetes de cada tipo de betão às temperaturas de 20°C, 50°C e 80°C entre as 24h e 48h de vida dos materiais; ensaio aos 2 e aos 28 dias de vida para todos os provetes; ensaio aos 70 dias para provetes curados a 20°C;
- No ensaio de Microscopia Eletrônica de Varrimento: uso de amostras fragmentadas oriundas dos provetes ensaiados mecanicamente; ensaios aos 2 e aos 70 dias de idade dos betões;
- No ensaio de Difractômetro de Raio X: uso de amostras em pó oriundas dos provetes ensaiados mecanicamente; ensaios aos 28 e aos 70 dias de idade dos betões.

Logo, pressupondo tais requisitos, configurou-se os tipos e as quantidades de provetes necessários, conforme indica o quadro 3.24.

Quadro 3.24 – Configuração de provetes.  
Fonte: Acervo pessoal.

Tipo de Betão	Resistência à compressão (Cubos 100 mm)							Ataque de cloretos (Cilindros 100 x 200 mm)	Potencial de carbonatação (Cubos 100 mm)	Ataque de sulfatos (Cubos 100 mm)	MEV		DRX	
	2 dias			28 dias			70 dias				2 dias (20, 50 e 80 °C)	70 dias (20, 50 e 80 °C)	2 dias (20, 50 e 80 °C)	70 dias (20, 50 e 80 °C)
	°C			°C			°C							
	20	50	80	20	50	80	20							
<b>BC_400</b>	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	
<b>BACED_500</b>	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	
<b>BACED_600</b>	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	
	<b>TOTAL</b>													
<b>Provetes cilíndricos 100 x 200 mm</b>										9				
<b>Provetes cúbicos 100 mm</b>										78				

A seguir são descritas as metodologias adotadas na execução dos ensaios indicados, considerando as respectivas normas e as condições impostas.

### 3.4.1 Resistência à compressão

O ensaio mecânico foi realizado com o objetivo de identificar possíveis alterações na resistência à compressão entre os tipos de betão e em virtude das variações nas condições de cura dos materiais.

A partir da EN 206-1 foram definidas as classes de resistência expectantes para cada tipo de betão. Conforme já supracitado, para o betão convencional, objetivou-se uma classe mínima C20/25; para os de elevado desempenho, ao menos uma classe C35/45, indicando uma resistência acima da estipulada pelo ACI para BED, de 41 MPa.

Executou-se o ensaio aos 2 dias e aos 28 dias para os três tipos de betão, curados às temperaturas de 20°C, 50°C e 80°C. Aos 70 dias foi realizado outro ensaio para provetes curados a 20°C. Os dois primeiros tiveram o objetivo de caracterizar os betões quanto à resistência mecânica, bem como de julgar se a submissão do material a elevadas temperaturas iniciais poderiam prejudicar esta propriedade. O ensaio aos 70 dias, por sua vez, teve o intuito de identificar possíveis alterações de resistência e correlaciona-las às condições a que os betões foram submetidos.

Sendo os provetes utilizados do tipo cúbicos com arestas de 100 mm, a velocidade de aplicação da carga foi de 7 kN/s, de acordo com o equipamento utilizado. A figura 3.23 ilustra o ensaio mecânico.



Figura 3.23 – Ensaio de resistência à compressão.  
Fonte: Acervo pessoal.

### 3.4.2 Ataque de cloretos

Este ensaio está fundamentado pela *Especificação LNEC E 463 – Betão: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário*.

Foram desenvolvidos provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura para cada tipo de betão. Em seguida, após a cura completa dos betões – 28 dias, foram realizados cortes com espessura de  $50 \pm 2$  mm, descartando as extremidades dos provetes em no mínimo 10 mm, constituindo então 3 amostras de 100 mm de diâmetro e  $50 \pm 2$  mm de altura para cada tipo de betão (Figura 3.24).



Figura 3.24 – Amostras para ensaio de migração de cloretos.  
Fonte: Acervo pessoal.

Após os cortes, as amostras foram lavadas e suas superfícies posteriormente secas. Em seguida, inseriu-se as amostras em câmara de vácuo para que se procedesse a tratamento por vácuo. Manteve-se o processo por 3h, tal que posteriormente foi adicionada ao recipiente uma solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$ , conforme designado em norma, observando a completa imersão de todas as amostras. Manteve-se esta configuração na câmara de vácuo por mais 1h e, em seguida, expôs-se ao ambiente as amostras ainda imersas na solução de hidróxido de cálcio, durante  $18 \pm 2$ h.

Preparou-se as soluções catódicas e anódicas, em que a primeira foi constituída por 100g de NaCl para cada 900g de água oriunda da rede pública, e a segunda por 12g de NaOH para cada litro de água destilada. Essas soluções foram desenvolvidas enquanto houve a conservação das amostras na solução anterior de hidróxido de cálcio e foram submetidas à temperatura ambiente, entre  $20^\circ\text{C}$  e  $25^\circ\text{C}$ .

Preparou-se então as amostras, observando o correto e adequado aperto das braçadeiras, e foi iniciado o ensaio de migração. Encheu-se o reservatório catódico com a sua respectiva solução. Em seguida, pôs-se as amostras nos suportes plásticos do recipiente catódico e encheu-se a manga sobre o provete com 300ml da solução anódica. Imergiu-se o ânodo na solução anódica e ligou-se o cátodo ao pólo negativo e o ânodo ao pólo positivo da

fonte de alimentação utilizada. Esta configurou-se inicialmente a uma voltagem de 30V, permitindo a aferição da corrente inicial para cada tipo de betão. A figura 3.25 ilustra este processo.



Figura 3.25 – Configuração do ensaio de migração de cloretos.  
Fonte: Acervo pessoal.

Foi necessário então realizar o ajuste da voltagem a partir da identificação da corrente inicial para cada tipo de betão, de acordo com o Anexo 2 da E 463 (Quadro 3.25). É importante observar que o ajuste também ocorreu devido ao fato de se tratar de betões com elevada dosagem de ligante, tal que se considerou a composição com 400 kg/m<sup>3</sup> como normal e de referência, sendo base para o cálculo das novas voltagens para os betões de 500 kg/m<sup>3</sup> e o de 600kg/m<sup>3</sup>.

Quadro 3.25 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de um provete de betão com uma dosagem normal de ligante, Anexo 2.  
Fonte: LNEC E 463.

Corrente inicial $I_{30V}$ (com 30 V) (mA)	Diferença de potencial aplicada $U$ (após o ajuste) (V)	Nova corrente inicial admissível (mA)	Duração do ensaio $t$ (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30		24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 > 360$	10	$I_0 > 120$	6

Nota: Nos provetes com dosagens especiais de ligante, tais como argamassas de reparação ou caldas de injeção, corrige-se a corrente medida multiplicando-a por um factor aproximadamente igual à razão entre as dosagens normal e real de ligante, de modo a poder usar este Quadro.

Para o BC\_400, a corrente inicial aferida a uma voltagem de 30 V foi, em média, de 177 mA, para o BACED\_500 foi de 84,33 mA e para o de 600 de 104 mA. De acordo com o quadro 3.22, foi necessária a correção das correntes do BACED\_500 e do BACED\_600, resultando em 67,46 mA e 69,33 mA. Portanto, a nova diferença de potencial aplicada foi de 15 V para o BC\_400 e 25V para o BACED\_500 e o BACED\_600. Em seguida, conferiu-se as novas correntes, as quais resultaram, em média, nos valores de 81,66 mA, 54 mA e 66,33 mA, respectivamente para os betões de 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup>. Com isto, configurou-se o ensaio, constatou-se uma temperatura inicial do anólito de 18,2°C, do católito de 17,5°C e aguardou-se as 24h indicadas no quadro 3.22. Após as 24h, a temperatura do anólito foi de 20,5°C e do católito de 19,3°C; as correntes finais foram, em média, de 73 mA para o BC\_400, de 48,07 mA para o BACED\_500 e de 61,17 mA para o BACED\_600.

Realizada a primeira parte do ensaio de migração, prosseguiu-se com a aferição das profundidades de penetração dos cloretos. Inicialmente as amostras foram lavadas e suas superfícies secas. Em seguida, partiu-se diametralmente cada uma. Pulverizou-se então cada face retangular com solução de AgNO<sub>3</sub>, observando o surgimento dos precipitados de cloreto de prata à superfície. Após a ocorrência disto, aferiu-se as profundidades de penetração em cada amostra, em sete pontos desconsiderando 10 mm das extremidades (Figura 3.26).



Figura 3.26 – Provetes para medição da profundidade de penetração de cloretos.

Fonte: Acervo pessoal.

### 3.4.3 Ataque de sulfatos

Esta investigação, ratifica-se, tem como objetivo principal a análise da formação de etringita secundária nos betões auto-compactáveis de elevado desempenho, no que diz respeito ao ataque de sulfatos. Portanto, com fundamentação no que está dissertado no capítulo 2 deste documento, submeteu-se os provetes a ensaios para avaliação do ataque de sulfatos por fonte interna e fonte externa.

### **3.4.3.1 Ataque de sulfatos por fonte interna**

A formação da etringita secundária por fonte interna de sulfatos decorre, de maneira geral, da precipitação da etringita primária, bem como da presença de monossulfato no meio cimentício. Estes compostos são originados a partir do cimento, implicando uma maior probabilidade teórica de ocorrência de DEF quando há aumento da dosagem deste ligante na mistura. Isto denota elevado potencial para os BACED em estudo. Há ainda o fator temperatura de cura, que, segundo alguns autores, contribui significativamente no processo de formação da etringita tardia.

Assim, conjecturando o elevado consumo de cimento e a exposição dos betões a elevadas temperaturas, definiu-se que o ensaio de sulfatos por fonte interna ocorreriam por meio de quantificação de etringita secundária formada, a partir de análise em difratômetro de raio X de amostras com elevado consumo de cimento e submetidas a diferentes temperaturas de cura. As avaliações por difração de raio X foram realizadas com amostras em pó provenientes dos provetes ensaiados mecanicamente por resistência à compressão.

Conforme supracitado, os ensaios foram realizados aos 28 e aos 70 dias de vida dos betões, permitindo identificar a quantidade de etringita secundária formada, bem como seu comportamento ao longo do tempo.

### **3.4.3.2 Ataque de sulfatos por fonte externa**

Alternando a origem dos íons sulfatos para o ambiente externo, optou-se por submeter os betões ao ensaio de ataque de sulfatos baseado na *NP 1378 – Agregados: Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio*, a fim de se analisar a formação da etringita secundária, mas também em virtude de identificar a durabilidade dos betões quanto ao ataque de sulfatos.

Em Portugal, não há disponível até o momento uma norma que direcione o ensaio de ataque de sulfatos em betões. Logo, faz-se uso da NP 1378 de forma a aproximar ao máximo as diretrizes à situação vigente.

De acordo com a norma, pode-se utilizar sulfato de sódio ou sulfato de magnésio. Optou-se pela aplicação de sulfato de sódio, que pode ser do tipo anidro ou hidratado.

O ensaio se deu pela submissão de 3 provetes de cada tipo de betão a uma solução sulfatada, cessando no momento em que houve perda de massa dos exemplares, implicando que aconteceu o ataque, já que as reações do material são normalmente expansivas para a atuação dos sulfatos. A exposição à solução ocorre por meio de ciclos de imersão e secagem.

Antes de iniciar o processo, lixou-se as superfícies dos provetes e, em seguida, foram colocados por 24h em estufa a 105°C para a secagem dos poros, de modo a facilitar o ataque dos íons  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Inicialmente, utilizou-se o sulfato de sódio anidro, para o qual a norma estabelece uma proporção de 350 g para cada litro de água utilizado. Logo, selecionou-se o recipiente a ser usado, calculou-se a quantidade de água necessária e, em seguida, a quantidade de sal a ser despendida. A mistura foi feita, mediante agitação mecânica e dissolução completa do sal. Aferiu-se então a densidade da solução, alcançando-se o valor de 1,1565, que está dentro da faixa estabelecida pela NP 1378 de 1,151 a 1,174, para ambiente a  $21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ .

O sal cristaliza-se a temperatura ambiente e quando estagnada, tal que foi necessário a imersão do recipiente com a solução em outro com água aquecida por meio de resistência elétrica, de modo a manter a temperatura da solução em torno de  $28^\circ\text{C}$ , bem como inserir nos recipientes com a solução bombas de baixa potência para mantê-las em movimento (Figura 3.27). Os recipientes foram tapados com papel alumínio e placa cerâmica, com o intuito de evitar a evaporação da água e a entrada de elementos indesejados.

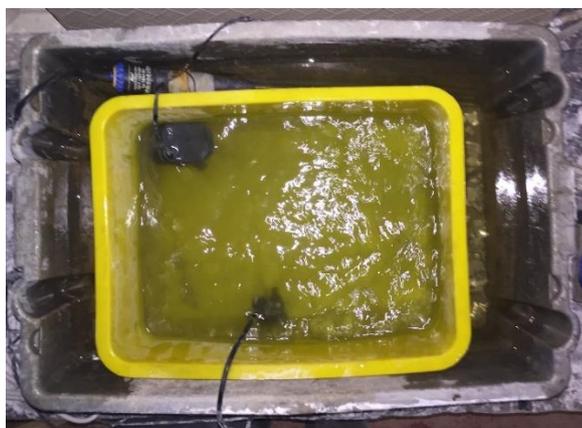


Figura 3.27 – Configuração do ensaio de ataque de sulfatos.

Fonte: Acervo pessoal.

Preparados os materiais e soluções, procedeu-se com o ensaio a partir do início do 1º ciclo. Cada ciclo foi definido pelas seguintes etapas sequenciais: imersão dos provetes na solução de sulfato de sódio durante 20h, observando uma distância mínima de 1,5 cm entre a superfície do líquido e a superfície dos provetes; retirada dos provetes da solução, aguardando 20 minutos de escoamento; secagem dos provetes em estufa a 105°C durante 48h; alcance de massa constante, sendo aferido por pesagem dos provetes 20 minutos após a secagem e 4h depois desta primeira medição, de modo a identificar uma variação inferior a 1g entre as duas aferições. Foram realizados 9 ciclos. É importante observar que a norma em questão indica

períodos de exposição e secagem inferiores aos adotados, sendo estes admitidos em virtude de se tratar de betões de elevado desempenho.

Após o 3º ciclo, houve a cristalização dos sais da solução. Logo, fez-se necessário o desenvolvimento de nova solução, que neste caso foi de sulfato de sódio hidratado, conforme disponibilidade do laboratório em uso. Após a adequada preparação da solução, deu-se continuidade ao ensaio.

#### 3.4.4 Determinação do potencial de resistência a carbonatação do betão

A análise do potencial de carbonatação dos betões em estudo foi baseada na especificação técnica do Comitê Europeu de Normalização FprCEN/TS 12390-12 de 2010.

Foram utilizados dois provetes cúbicos de 100 mm de aresta para cada tipo de betão estudado, curados por 90 dias a 20°C, submetidos a uma humidade relativa em torno de 65%.

Após 90 dias, os provetes foram impermeabilizados em quatro faces, deixando apenas duas faces paralelas expostas (Figura 3.28). A impermeabilização foi realizada por meio da aplicação de parafina em 3 camadas espessas. Após a impermeabilização, os provetes foram inseridos em câmara de carbonatação com 4% de CO<sub>2</sub>.



*Figura 3.28 – Provetes impermeabilizados para ensaio de resistência a carbonatação.  
Fonte: Acervo pessoal.*

As medições da profundidade de carbonatação ocorreram aos 7, 14, 30 e 40 dias. O processo de medição se deu pela aplicação de indicador ácido-base em amostras de 50 mm de espessura retiradas dos provetes ensaiados.

#### 3.4.5 Microscopia Eletrônica de Varimento - MEV

Os ensaios de microscopia eletrônica foram desenvolvidos a fim de se identificar a porosidade dos materiais em estudo, bem como a ocorrência de depósitos de sulfoaluminato tricálcico no entorno de agregados.

As análises ocorrem no Laboratório de Serviços de Caracterização de Materiais da Universidade do Minho (SEMAT/UM), aos 2 e aos 70 dias. O primeiro ensaio objetivou a identificação da porosidade do material nos instantes iniciais de vida dos betões; já o segundo foi definido para identificar a porosidade, além das possíveis deposições de etringita secundária e das ocorrências e quadros microfissuratórios característicos da DEF.

As amostras foram oriundas dos provetes ensaiados mecanicamente e devidamente preparadas com revestimento de ouro e paládio (Au/Pd). Em seguida, o equipamento foi ajustado para uma ampliação de 5000X, sendo despendidas escalas de 2 $\mu$ m, 4  $\mu$ m, 20  $\mu$ m e 100 $\mu$ m para a análise, registrando imagens em três pontos distintos para cada amostra. As figuras 3.29 e 3.30 elucidam o ensaio.



*Figura 3.29 – Equipamento MEV.*

*Disponível em:*

*[http://www.semat.lab.uminho.pt/Equipamento\\_1.htm](http://www.semat.lab.uminho.pt/Equipamento_1.htm) (acesso em 24/03/2016).*



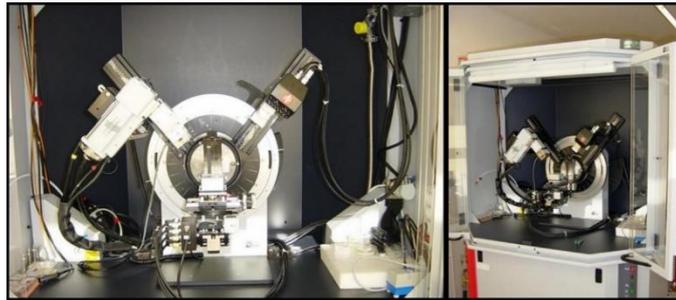
*Figura 3.30 – Amostras revestidas com Au/Pd inseridas no equipamento de MEV.  
Fonte: Acervo pessoal.*

### **3.4.6 Difração de Raio X - DRX**

Para a quantificação da etringita secundária formada nas amostras, foram desenvolvidos ensaios de DRX aos 28 e aos 70 dias. Desse modo, com a quantificação dos produtos do ataque de sulfatos em datas distintas, pôde-se avaliar a variação da quantidade do composto, indicativa do comportamento da formação de etringita secundária. Este procedimento permitiu a comparação entre o potencial de ocorrência de DEF para os diversos cenários existentes.

Os ensaios ocorreram no Laboratório de Serviços de Caracterização de Materiais da Universidade do Minho (SEMAT/UM).

As amostras foram oriundas dos provetes ensaiados mecanicamente, sendo ainda conduzidas à pó, já que esta é a melhor configuração para a obtenção de resultados fidedignos. A figura 3.31 apresenta o equipamento.



*Figura 3.31 – Equipamento de DRX.*

*Disponível em: [http://www.semat.lab.uminho.pt/Equipamento\\_2.htm](http://www.semat.lab.uminho.pt/Equipamento_2.htm) (acesso em 24/03/2016)*



## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados adquiridos por meio da realização dos ensaios descritos, efetuou-se a análise dos respectivos valores, de modo a comparar entre si e julgar os vários números encontrados. Dessa forma, conseguiu-se afirmar as características de cada material ensaiado nos contextos de desempenho e durabilidade.

### 4.1 POROSIDADE

Através de análises por MEV foram identificados os betões que apresentaram maior grau de porosidade, isto é, aqueles cujas imagens detectaram maior número de poros e microporos, analisando as respectivas dimensões.

Foram realizadas imagens aos 2 e aos 70 dias sob a mesma ampliação microscópica e em três pontos de cada amostra, podendo-se comparar então uma possível compactação ou dilatação dos poros. As figuras 4.1 a 4.18 apresentam o aspecto das superfícies observadas.

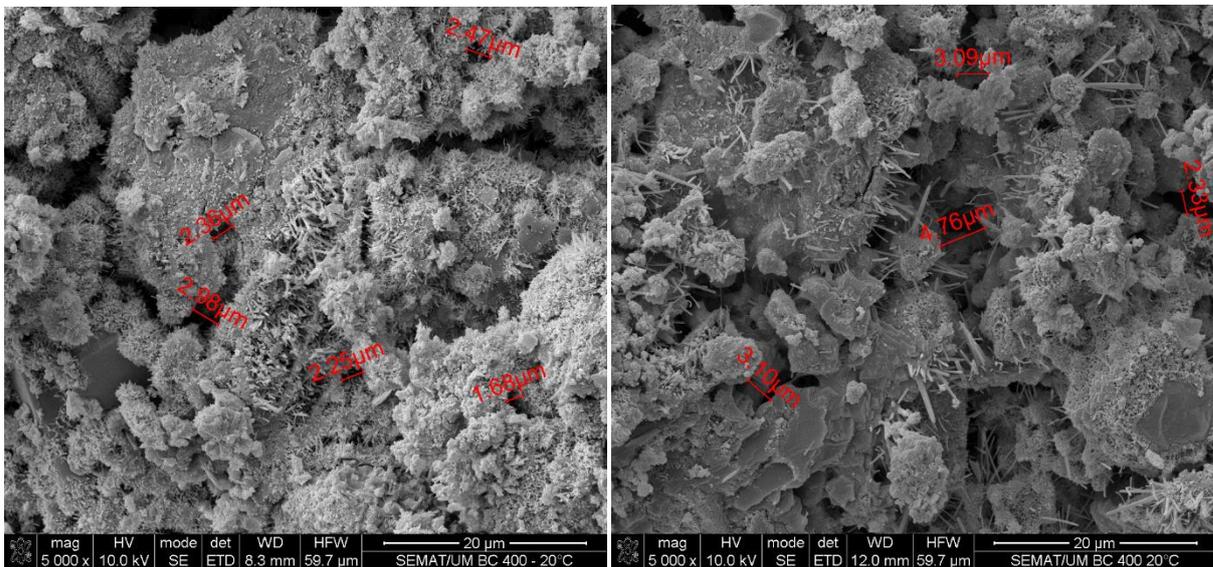


Figura 4.1 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BC\_400\_20°C.

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.2 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BC\_400\_20°C.

Fonte: Acervo pessoal.

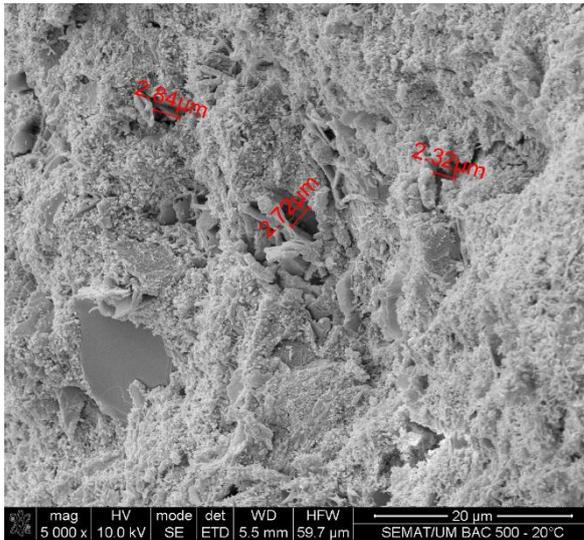


Figura 4.3 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED\_500\_20°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

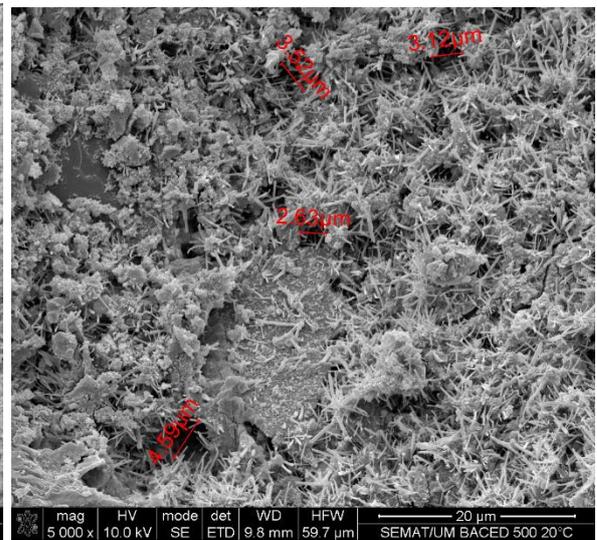


Figura 4.4 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED\_500\_20°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

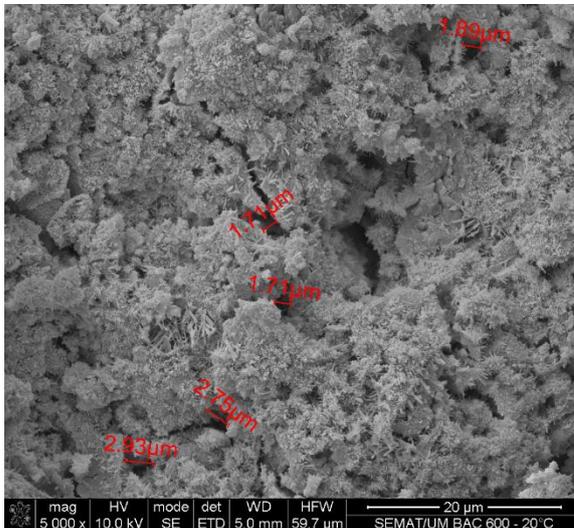


Figura 4.5 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED\_600\_20°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

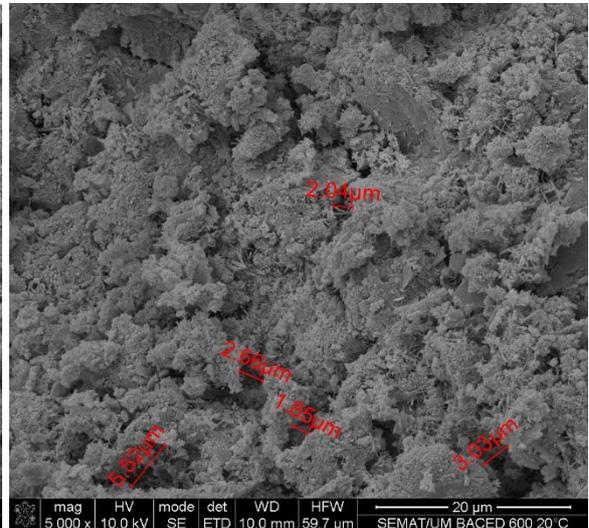


Figura 4.6 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED\_600\_20°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

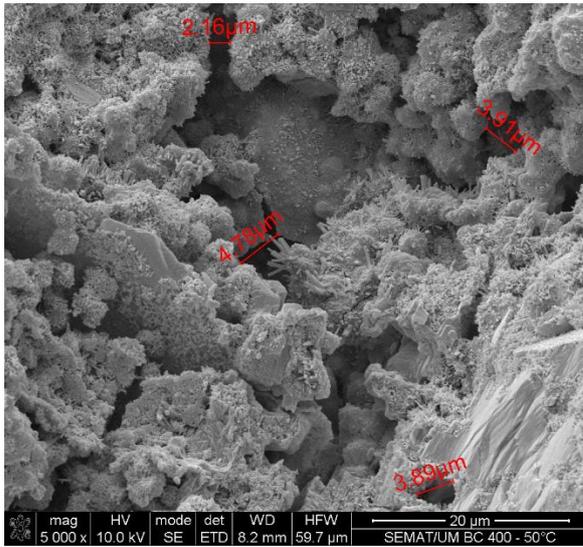


Figura 4.7 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BC\_400\_50°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

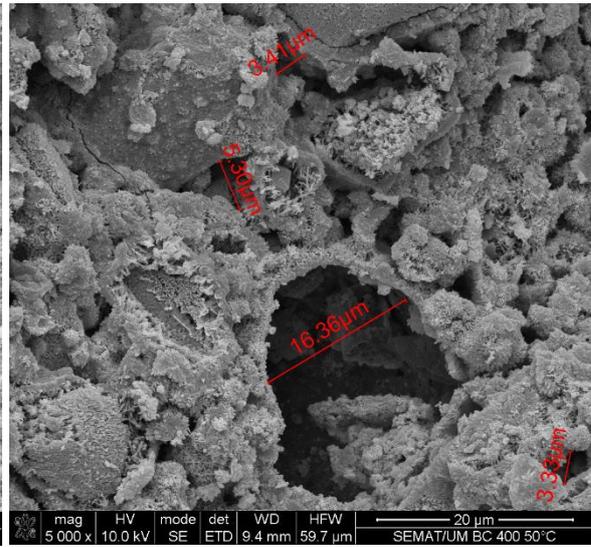


Figura 4.8 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BC\_400\_50°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

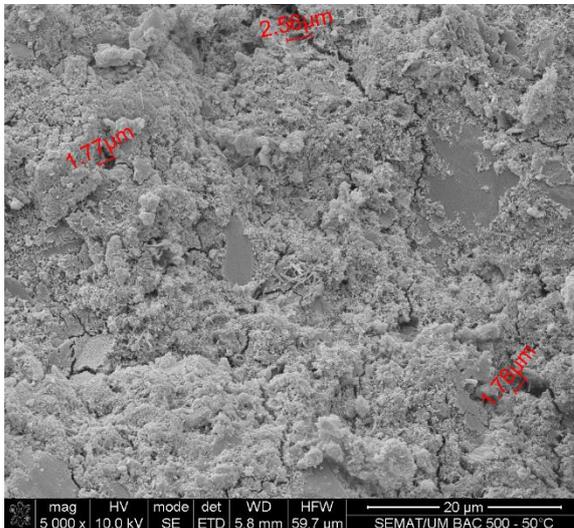


Figura 4.9 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED\_500\_50°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

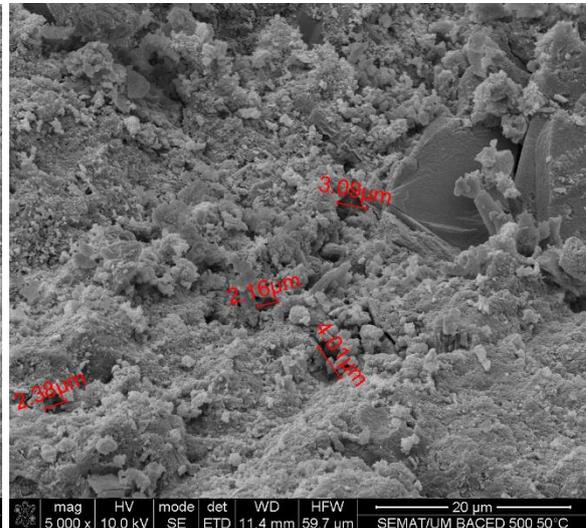


Figura 4.10 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED\_500\_50°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

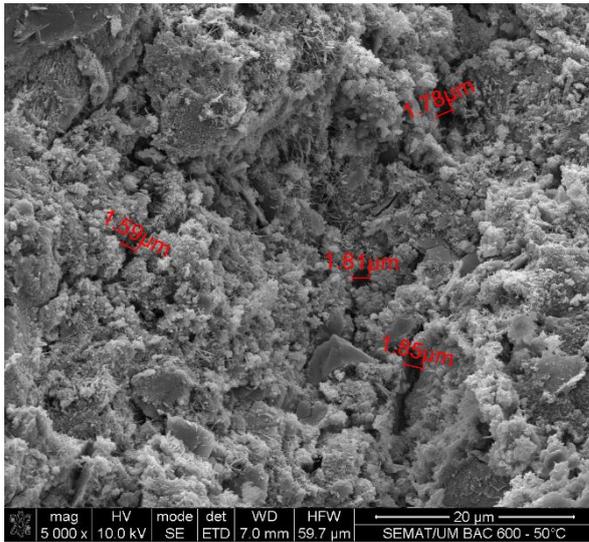


Figura 4.11 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED\_600\_50°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

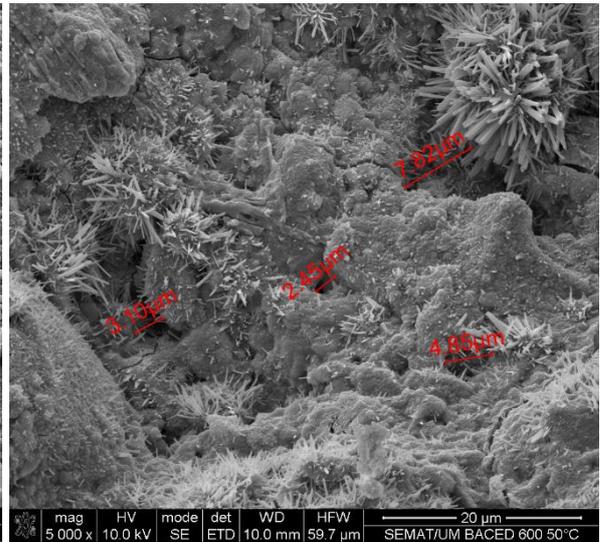


Figura 4.12 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED\_600\_50°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

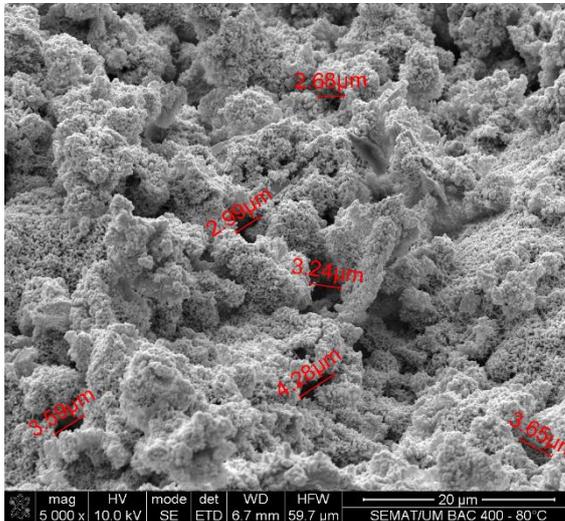


Figura 4.13 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BC\_400\_80°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

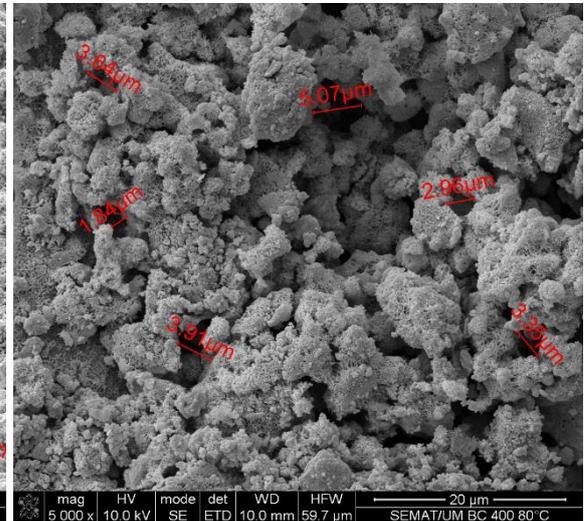


Figura 4.14 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BC\_400\_80°C.  
Fonte: Acervo pessoal.



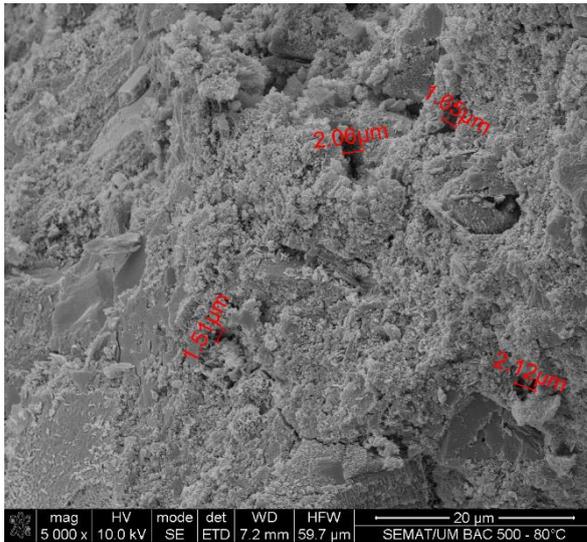


Figura 4.15 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED\_500\_80°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

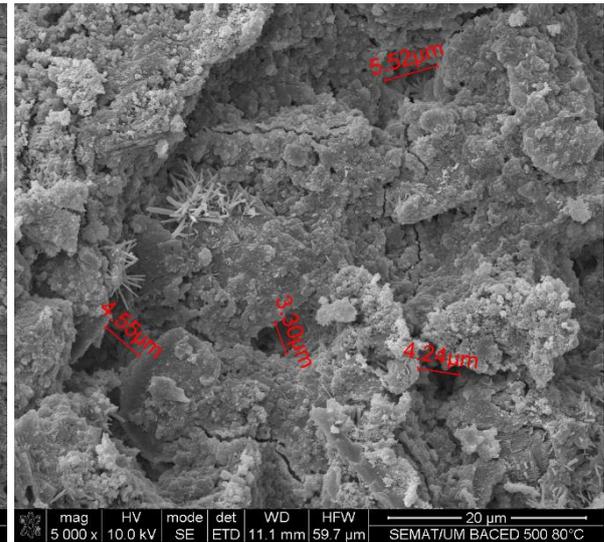


Figura 4.16 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED\_500\_80°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

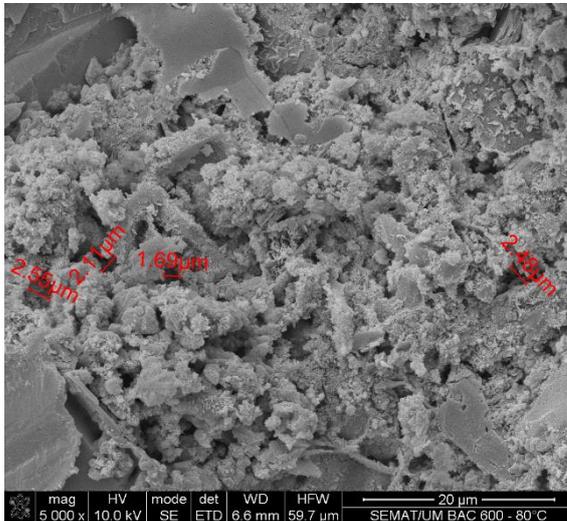


Figura 4.17 – Análise de porosidade por MEV aos 2 dias BACED\_600\_80°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

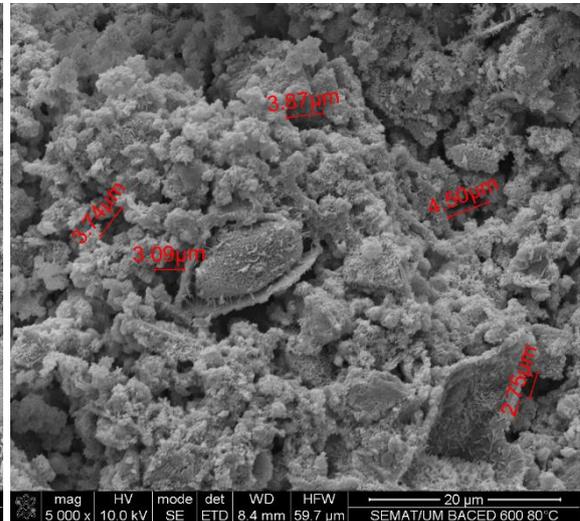


Figura 4.18 – Análise de porosidade por MEV aos 70 dias BACED\_600\_80°C.  
Fonte: Acervo pessoal.

A partir das diversas imagens realizadas, pode-se analisar qualitativamente os betões em estudo, comparando-os entre si quanto à porosidade, a qual é definida mediante a identificação das áreas negras das micrografias. Os quadros 4.1 e 4.2 elucidam a avaliação aos 2 e ao 70 dias, respectivamente, variando com as temperaturas de cura e os tipos de betão.

Quadro 4.1 – Porosidade aos 2 dias.

Fonte: Acervo pessoal.

	BC_400		BACED_500		BACED_600	
	Varição por temperatura	Varição por betão	Varição por temperatura	Varição por betão	Varição por temperatura	Varição por betão
20°C	Mais poroso	Porosidade intermediária	Menos poroso	Mais poroso	Porosidade intermediária	Mais poroso
50°C	Mais poroso	Mais poroso	Menos poroso	Menos poroso	Porosidade intermediária	Menos poroso
80°C	Mais poroso	Menos poroso	Menos poroso	Porosidade intermediária	Porosidade intermediária	Porosidade intermediária

Quadro 4.2 – Porosidade aos 70 dias.

Fonte: Acervo pessoal.

	BC_400		BACED_500		BACED_600	
	Varição por temperatura	Varição por betão	Varição por temperatura	Varição por betão	Varição por temperatura	Varição por betão
20°C	Mais poroso	Menos poroso	Menos poroso	Porosidade intermediária	Porosidade intermediária	Menos poroso
50°C	Mais poroso	Mais poroso	Menos poroso	Menos poroso	Porosidade intermediária	Porosidade intermediária
80°C	Mais poroso	Porosidade intermediária	Menos poroso	Mais poroso	Porosidade intermediária	Mais poroso

Logo, percebe-se a ocorrência, e a tendência geral, de menor dimensão dos poros nos betões auto-compactáveis de elevado desempenho. Uma condição importante a observar é o fato de haver uma tendência ao aumento das dimensões dos poros com a elevação da temperatura de cura aos 70 dias.

Entre os betões auto-compactáveis de elevado desempenho, o BACED\_600 apresentou uma porosidade maior, de maneira geral. Isto indica um desempenho mais lento deste betão quanto à solidificação, ou compactação, devido à hidratação do material.



## 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 2 dias, aos 28 dias e aos 70 dias, conforme indicado no capítulo anterior. A seguir são apresentados os resultados nos quadros 4.3 a 4.5.

Quadro 4.3 – Resultados ensaio de resistência à compressão aos 2 dias.

Fonte: Acervo pessoal.

Temperatura de cura entre as 24h e 48h	Resistência à compressão (MPa)		
	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	14,6	25,6	18,3
50°C	18,0	38,5	38,0
80°C	18,5	36,3	38,0

Quadro 4.4 – Resultados ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Fonte: Acervo pessoal.

Temperatura de cura entre as 24h e 48h	Resistência à compressão (MPa)		
	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	28,2	52,3	47,6
50°C	26,3	53,9	46,6
80°C	22,5	47,3	40,2

Quadro 4.5 – Resultados ensaio de resistência à compressão aos 70 dias.

Fonte: Acervo pessoal.

Temperatura de cura entre as 24h e 48h	Resistência à compressão (MPa)		
	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	39,3	62,0	59,7

Do ponto de vista mecânico, são pertinentes duas análises comparativas: quanto à variação entre os betões em estudo para cada temperatura avaliada e quanto à variação dos resultados para cada tipo de betão mediante a variação da temperatura de cura. A seguir são apresentadas as análises para cada tipo de betão, variando com a temperatura de cura entre as 24h e as 48h de vida do material.

- BC\_400 (20°C): Este betão apresentou resistência à compressão inicial razoável, em torno de 15,0 MPa. Aos 28 dias, o material exibiu considerável ganho da propriedade, 88,00%, indicando uma resistência de 28,2 MPa. Aos 70 dias, a resistência atingiu os 39,3 MPa, elucidando um desempenho bastante satisfatório do ponto de vista mecânico para um BC. Este comportamento decorre, principalmente, do teor de ligante em torno do limite superior para um betão convencional.
- BACED\_500 (20°C): O betão auto-compactável de elevado desempenho dosado com 500 kg/m<sup>3</sup> de cimento apresentou  $f_c$  aos 2 dias de 25,6 MPa. Aos 28 dias, o crescimento foi de 104,30%, indicando uma resistência de 52,3 MPa. Aos 70 dias, o betão atingiu 62,0 MPa. Estes últimos valores apontam um desempenho mecânico elevado do material, principalmente devido ao fato de sua constituição ser bastante próxima do betão convencional. De acordo com a EN 206-1, o limite inferior de classificação como BER para provetes cúbicos é de 60 MPa aos 28 dias, condição que o BACED\_500 não satisfaz. Do ponto de vista da resistência nos primeiros dias, expectou-se um melhor comportamento do material. No entanto, este desempenho é compreensível em virtude do uso do superplastificante, agravado pelo alto teor do aditivo necessário para a condição de auto-compactabilidade.
- BACED\_600 (20°C): Este material apresentou comportamento semelhante ao seu similar. A resistência inicial foi de 18,3 MPa, aos 28 dias foi de 47,6 MPa e aos 70 dias de 59,7 MPa. O ganho de resistência entre os 2 e os 28 dias foi de 160%. Quanto aos valores finais, o desempenho deste betão especial é inferior ao do BACED\_500. No entanto, em termos de ganhos efetivos ao longo do tempo, o betão dosado com 600 kg/m<sup>3</sup> de cimento indicou melhor comportamento. Em termos de classificação como BER, o valor obtido aos 28 dias foi bastante aquém do limite inferior imposto pela EN 206-1, o que não permite sua caracterização como betão de elevada resistência. O desempenho do BACED\_600, portanto, foi abaixo do expectado, tendo em vista que a utilização de um teor de ligante mais elevado conduz à ideia de maior resistência à compressão do betão. No entanto, observou-se a ocorrência de quadro de fissuração devido ao fenômeno de retração, explicando a redução da resistência à compressão relatada já que isto proporciona o desenvolvimento de uma rede de vazios interna no material (Figura 4.19). O acontecimento deletério pode ser explicado pelo elevado calor de hidratação em virtude do alto consumo de cimento do betão.





Figura 4.19 – Quadro fissuratório do BACED\_600 devido ao fenômeno de retração.  
Fonte: Acervo pessoal.

- BC\_400 (50°C): Quando submetido à temperatura de cura de 50°C, observou-se ganhos do ponto de vista da resistência inicial do betão convencional, da ordem de 23%. Este incremento, no entanto, é pouco significativo, sendo possível afirmar que o aumento da temperatura pouco contribui com a propriedade mecânica em questão. Aos 28 dias, observa-se uma variação ainda menos considerável.
- BACED\_500 (50°C): Nas primeiras idades, a variação da temperatura proporcionou um acréscimo de 50,40% no  $f_c$  do material, denotando bom desempenho mecânico no âmbito da resistência inicial para o betão curado a 50°C. Aos 28 dias, porém, a variação é muito pequena e, portanto, desconsiderável. O aumento de temperatura se mostrou benéfico para aplicações em que o ganho acentuado de resistência inicial é necessário. O material apresentou, pois, desempenho mecânico satisfatório no que diz respeito à aceleração das reações por cura térmica.
- BACED\_600 (50°C): Aos 2 dias, a resistência à compressão para os provetes curados a 50°C foi 2,08 vezes maior que a registrada para aqueles curados a temperatura ambiente, isto é, apresentou um acréscimo de 108%. Aos 28 dias, no entanto, a variação é de apenas 1,0 MPa e, logo, é desprezível. Assim como o BACED\_500, o material exibiu, pois, desempenho mecânico satisfatório no que diz respeito à aceleração das reações por cura térmica, inclusive melhor que o do seu similar.
- BC\_400 (80°C): Comportamento semelhante ao observado quando submetido a 50°C, destacando-se contudo, em relação a esta situação, a perda de resistência de 14,44% aos 28 dias.
- BACED\_500 (80°C): Comportamento semelhante ao observado quando submetido a 50°C, destacando-se contudo, em relação a esta situação, a perda de resistência de 12,24% aos 28 dias.

- BACED\_600 (80°C): Comportamento semelhante ao observado quando submetido a 50°C, destacando-se contudo, em relação a esta situação, a perda de resistência de 13,73% aos 28 dias.

A partir das análises acima, pode-se concluir que o betão auto-compactável de elevado desempenho de 500 kg/m<sup>3</sup> foi o que apresentou comportamento mais satisfatório do ponto de vista do desempenho mecânico. O BACED\_600 apesar de indicar maiores ganhos de resistência inicial quando submetido à cura térmica, exibiu resultados efetivos abaixo do BACED\_500, que, no contexto global, foi o material de melhor desempenho mecânico.

Um fato que requer atenção é a ocorrência da redução da resistência à compressão em todos os betões aos 28 dias submetidos à temperatura de 80°C quando comparados com aqueles postos a 50°C. Isto denota que entre 50°C e 80°C há uma temperatura a partir da qual a hidratação da pasta de cimento é prejudicada, acarretando a perda de resistência. Relacionando à DEF por ataque interno de sulfatos, sabe-se que a literatura indica o valor de 70°C como ponto de inflexão para a dissolução da etringita primária na formação da secundária. Esta depreciação pode então contribuir para a redução da resistência mecânica do betão.

Por se tratar de betões de elevado desempenho constituídos o mais semelhante possível aos betões convencionais, pode-se inferir que os comportamentos mecânicos dos materiais especiais em estudo foram bastante relevantes. A figura 4.20 apresenta os resultados mecânicos em gráficos para os betões em questão.

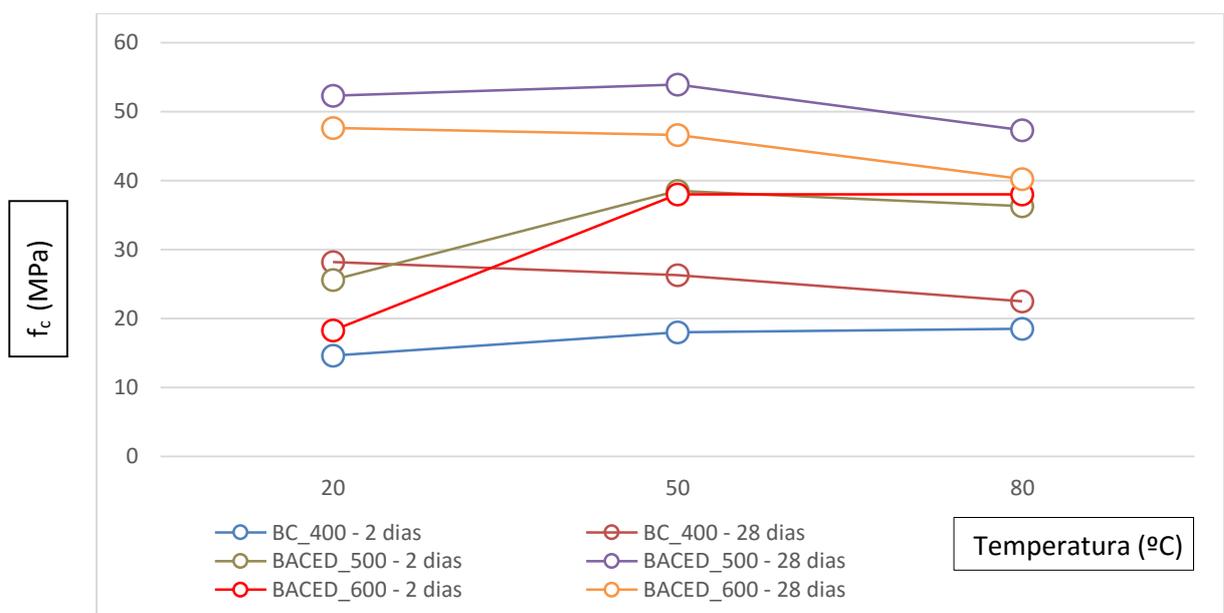


Figura 4.20 – Análise gráfica dos resultados mecânicos aos 2 e aos 28 dias.

Fonte: Acervo pessoal.



### 4.3 DIFUSÃO DE CLORETOS POR MIGRAÇÃO EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO

Conforme indicado no capítulo 3, este ensaio foi baseado na *Especificação LNEC E 463*, que indica o cálculo do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário. Através de planilha Excel disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, os devidos cálculos foram realizados, obtendo então os resultados que seguem no quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Resultados ensaio de difusão de cloretos.

Fonte: Acervo pessoal.

Composição	Amostra	Ø (mm)	L (mm)	U (V)	T <sub>M</sub> (°C)	t (h)	Profundidade penetração de cloretos (mm)							D <sub>NSSM</sub> (x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	D Médio (x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	
							1	2	3	4	5	6	7			x <sub>DM</sub>
BC_400	A	99,7	50,4	15,0	18,4	24,0	34,5	33,4	30,4	30,1	30,4	32,1	37,3	32,6	31,53	36,12
	B	99,8	50,2	15,0	18,4	24,0	45,2	38,5	37,9	37,3	33,6	36,9	42,1	38,8	37,89	
	C	99,7	50,2	15,0	18,4	24,0	44,2	39,4	35,9	36,9	34,9	40,6	46,9	39,8	38,94	
BACED_500	A	99,8	51,4	25,0	17,9	24,0	24,1	17,5	15,5	14,6	15,2	19,7	28,3	19,3	10,74	11,31
	B	100,0	51,3	25,0	17,9	24,0	26,2	21,5	16,0	17,9	16,7	19,0	31,1	21,2	11,88	
	C	99,8	50,8	25,0	17,9	24,0	26,0	20,8	16,0	18,2	14,1	20,6	27,2	20,4	11,32	
BACED_600	A	100,5	49,3	25,0	17,9	24,0	15,9	14,7	14,8	16,5	15,9	15,8	20,9	16,3	8,65	9,40
	B	99,8	51,9	25,0	17,9	24,0	35,7	16,8	14,4	13,2	14,1	14,4	19,4	18,3	10,24	
	C	100,0	51,0	25,0	17,9	24,0	17,7	15,6	14,9	17,3	17,1	16,8	19,7	17,0	9,31	

Como era esperado, o betão de referência BC\_400 foi o que apresentou maior coeficiente de difusão de cloretos. O BACED\_500 e o BACED\_600 indicam, por sua vez, difusão de cloretos menores, nesta ordem.

Isso é explicado devido à compactação dos materiais. Sabe-se que a difusão dos íons Cl<sup>-</sup> é potencializada quando o betão é permeável e possui rede capilar interna desenvolvida. Logo, sabendo-se que o BC\_400 apresenta maior suscetibilidade à ocorrência da porosidade diante de uma presença de água mais massiva, é coerente que haja maior difusão de cloretos neste betão. Por outro lado, o BACED\_600, por apresentar maior teor de ligante, baixa relação a/c e reduzidas segregação e exsudação no estado fresco, resultando em um betão menos poroso após sua cura, está menos suscetível à formação de cadeias porosas e, portanto, à difusão de cloretos.

Observa-se que os betões auto-compactáveis de elevado desempenho apresentam coeficientes de difusão de cloretos pequenos, quando comparados ao betão de referência, na ordem de 30% do valor do BC\_400. A figura 4.21 indica os gráficos relativos ao ensaio.

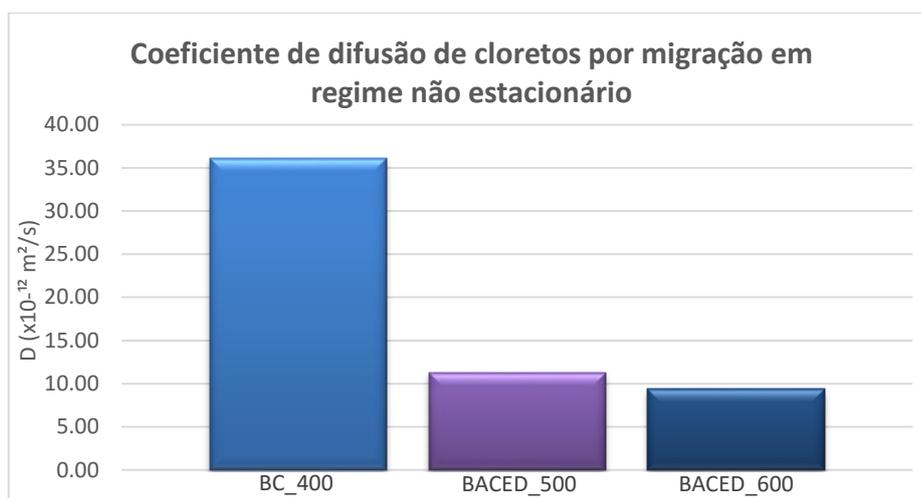


Figura 4.21 – Gráfico ensaio de difusão de cloretos.  
Fonte: Acervo pessoal.

Classifica-se, ainda, os betões quanto às suas resistências ao ataque de cloretos. Luping (1996) propôs uma classificação, conforme indica o quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Classificação quanto à difusão de cloretos.  
Fonte: Luping (1996).

Coeficiente de difusão em estado não estacionário, $D_{ns}$	Classe de resistência à penetração de cloretos
$D_{ns} \geq 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Reduzida
$10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 < 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito elevada
$D_{ns} < 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Ultra elevada

Portanto, o BC\_400 apresenta classe de resistência à penetração de cloretos *reduzida*, o BACED\_500 *moderada* e o BACED\_600 *elevada*. Isto, pois, ratifica as condições de elevado desempenho e de maior durabilidade desses últimos.

É importante observar que os betões especiais em estudo contêm aditivo superplastificante, que são constituídos também por um percentual de íons cloreto. Isto, em teoria, pode potencializar o ataque do Cl<sup>-</sup>. No entanto, observa-se que esses betões auto-compactáveis indicam muito bom desempenho quanto ao ataque de cloretos e, por conseguinte, não sofreram grande influência devido ao uso do aditivo. Fator importante para isto é também o reduzido teor de íons cloreto do superplastificante, abaixo de 0,1%.

## 4.4 ATAQUE DE SULFATOS

O estudo acerca do ataque de sulfatos foi desenvolvido sob os pontos de vista da fonte interna e da fonte externa dos íons  $\text{SO}_4^{2-}$ , observando a formação da etringita secundária, principalmente no âmbito de fonte interna. Logo, são dissertados a seguir os respectivos resultados e análises.

### 4.4.1 Ataque de sulfatos por fonte interna – Formação de etringita secundária

A análise da ocorrência de etringita tardia foi realizada pela quantificação do composto  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  aos 28 e aos 70 dias por DRX (Quadros 4.8 e 4.9).

Quadro 4.8 – Teor de etringita aos 28 dias – quantificação de etringita.

Fonte: Acervo pessoal.

Temperatura de cura entre 24h e 48h	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	0,0%	19,22%	5,43%
50°C	17,51%	21,04%	30,95%
80°C	0,0%	18,64%	0,0%

Quadro 4.9 – Teor de etringita aos 70 dias – quantificação de etringita.

Fonte: Acervo pessoal.

Temperatura de cura entre 24h e 48h	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	0,0%	0,0%	0,0%
50°C	2,98%	0,0%	0,0%
80°C	0,0%	0,0%	0,0%

O fato mais relevante neste ensaio decorre da massiva ausência de etringita aos 70 dias. De acordo com a literatura, isto se dá devido à formação de monossulfato a partir da etringita primária formada, conforme indica a equação (6) do item 2.3.3.3.1, quando há teor de  $\text{C}_3\text{A}$  acima de 5%, como é o caso do cimento usado que apresenta 5,82%. O gráfico ilustrado na figura 2.11 justifica esse comportamento.



Outro teor que subsidia a situação é o de  $C_4AF$ , que é de 10,65% para o CEM I 42,5 R. Assim como o monossulfato pode ser formado pela interação química entre o  $C_3A$  em excesso e a etringita primária, é possível o desenvolvimento de um composto semelhante pela reação entre a etringita inicial e o ferroaluminato tetracálcico, é a hidrogranada ( $C_4A(F)\bar{S}H_{18}$ ). Este tem formação e propriedades muito próximas às do monossulfato e, por natureza original do  $C_4AF$ , tende a ser formado mais lentamente, principalmente devido ao fato de que a reatividade da fase ferrita reduz à medida em que aumenta o teor de alumina. Por isso, então, a ocorrência da conversão de etringita em hidrogranada entre os 28 e os 70 dias.

Acredita-se que a ausência de uma fonte externa de água contribuiu para a não formação de etringita aos 70 dias. Além disso, a formação de monossulfato por redução da etringita é dada por uma reação que requer considerável menor quantidade de água que o processo inverso, o que reforça a proposição da formação de monossulfato e  $C_4A(F)\bar{S}H_{18}$ . Outro dado importante é indicado por Metha e Monteiro (2008), que afirmam que microporos da ordem de  $1\mu m$  são adequados para a deposição de monossulfato na pasta de cimento.

Há, pois, a observação de cristais de etringita aos 70 dias. Todavia, quando a quantidade é reduzida, o equipamento de difração de raio X não detecta a fase.

Portanto, pode-se afirmar que os betões estudados apresentaram grande transformação de etringita em monossulfato e hidrogranada, indicando grande potencial para a formação de etringita secundária através desses compostos.

Sob outro aspecto, este estudo proporciona um parâmetro global da potencialidade quanto à ocorrência de DEF a partir das três hipóteses propostas por Collepardi (2003), são elas: a existência de microfissuração, existência de água e a liberação tardia de íons sulfato.

Conforme apontado no item 4.1, a microporosidade e, ainda, a microfissuração são existentes nos betões em estudo, podendo-se ratificar a tendência ao aumento das dimensões das aberturas com a elevação da temperatura de cura.

Tendo em vista o objetivo de estudar betões submetidos às condições correntes, não se expôs os materiais ao condicionamento em água. Logo, os compostos de  $H_2O$  disponíveis para o processo são aqueles que constiuem o betão e os existentes na humidade do ambiente laboratorial ao qual foram expostos os provetes.

A liberação tardia de íons sulfatos é a hipótese que só pode ser avaliada com maior precisão ao longo do tempo. No entanto, algumas conclusões podem ser postas a partir dos resultados aos 28 dias:

- Quando curados a  $20^\circ C$ , os betões BC\_400 e BACED\_600 apresentaram reduzida ou nenhuma ocorrência de etringita, denotando a sua não formação.



- Quando curados a 50°C, aos 28 dias todos os betões apresentaram quantidade considerável de etringita, indicando que a etringita primária não se decompõe em virtude da exposição a essa temperatura e permanece na pasta.
- Quando curados a 80°C, o BC\_400 e o BACED\_600 não apresentaram etringita, denotando a decomposição da etringita primária, o que corrobora com a indicação da literatura.
- Os betões BC\_400 e BACED\_600 apresentaram comportamento semelhante. O BACED\_500 apresentou comportamento constante com a variação da temperatura.

Logo, a partir dessas conjecturas, pode-se afirmar que os íons  $\text{SO}_4^{2-}$ , bem como os de alumínio, podem ser mais facilmente encontrados, adsorvidos aos silicatos de cálcio, nas situações em que houve pequena formação de etringita aos 28 dias, ressaltando-se ainda maior potencialidade para os casos em que houve cura térmica.

A nível de comparação entre os betões, percebe-se um desempenho bastante satisfatório do BACED\_500, já que a etringita primária tendeu a se manter e não decompor, minimizando sua suscetibilidade à formação de etringita secundária. Já o BC\_400 e o BACED\_600 apresentaram desempenho regular, isto é, indicaram suscetibilidade à formação de etringita secundária quando submetidos à cura de 80°C, ao passo que exibiram redução de etringita aos 28 dias nesse caso.

As figuras 4.22 a 4.24 apresentam imagens feitas por MEV que indicam as presenças de monossulfato e pouca etringita aos 70 dias.

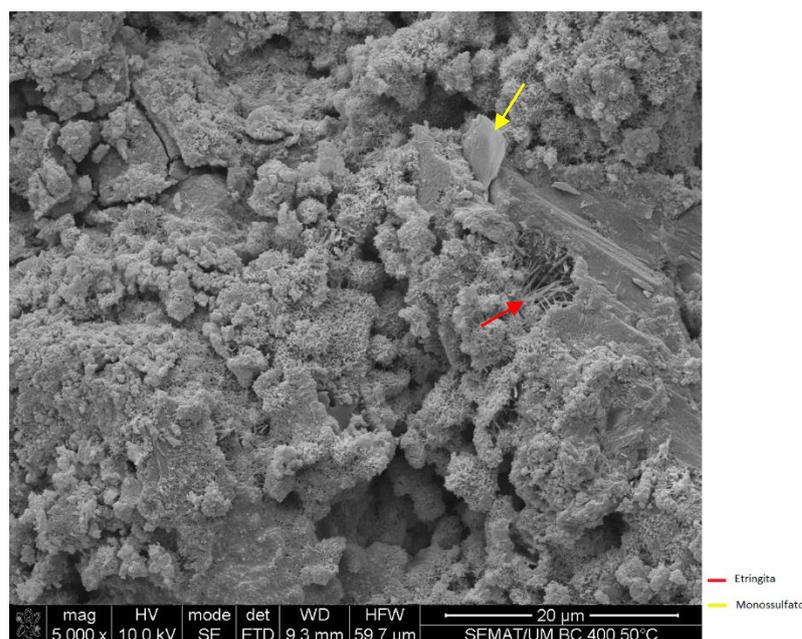


Figura 4.22 - Imagem MEV BC\_400 com presença de placas hexagonais de monossulfato e pouca etringita.

Fonte: Acervo pessoal

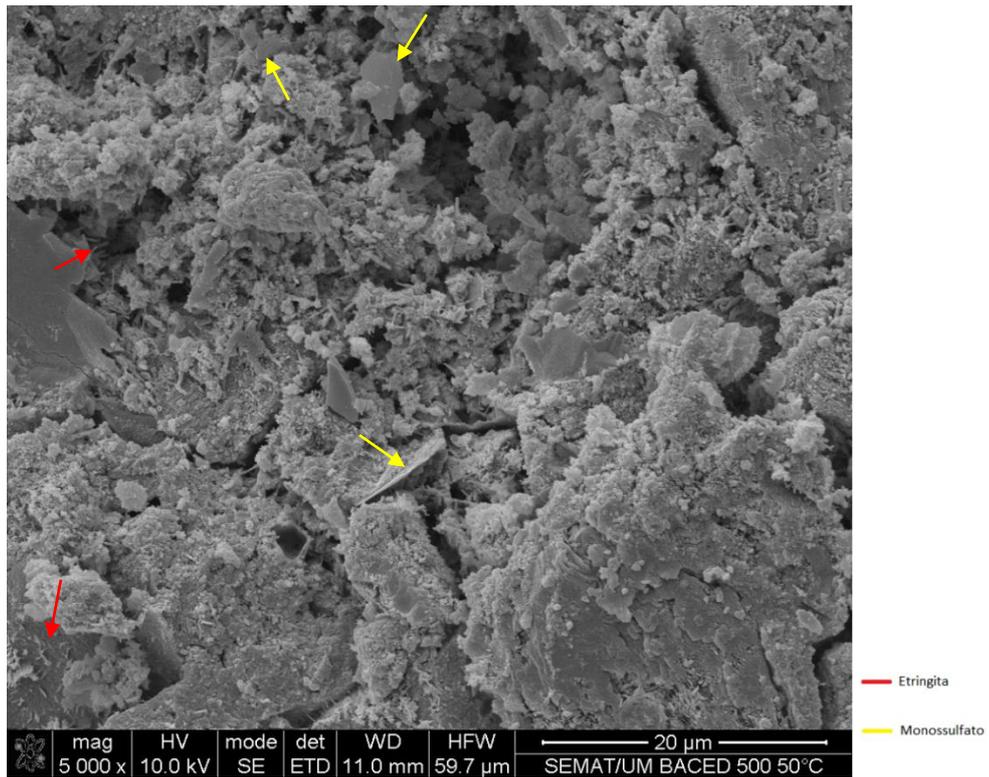


Figura 4.23 – Imagem MEV BACED\_500 com presença de placas hexagonais de monossulfato e pouca etringita.

Fonte: Acervo pessoal

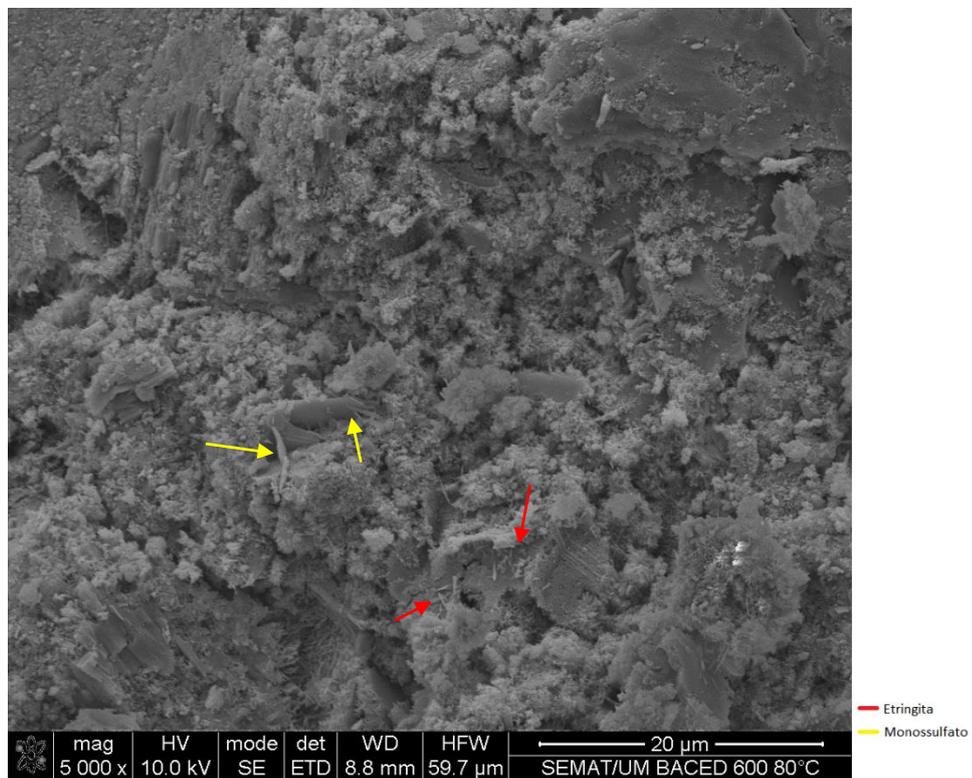


Figura 4.24 – Imagem MEV BACED\_600 com presença de placas hexagonais de monossulfato e pouca etringita.

Fonte: Acervo pessoal

#### 4.4.2 Ataque de sulfatos por fonte externa

Outro ensaio foi realizado no âmbito do ataque de sulfatos. Neste caso, submeteu-se provetes, curados sempre a temperatura ambiente, a uma solução de sulfato de sódio, com ciclos de imersão e secagem, avaliando-se a perda de massa dos betões. Os resultados são apresentados no quadro 4.10 e na figura 4.25.

Quadro 4.10 – Resultados ensaio ataque de sulfatos por fonte externa.  
Fonte: Acervo pessoal.

Ciclo	BC_400	Varição de massa	BACED_500	Varição de massa	BACED_600	Varição de massa
1º	2174,63	1.00	2232,57	1.00	2231,13	1.00
2º	2217,03	1.950%	2240,80	0.369%	2243,80	0.568%
3º	2237,97	0.945%	2248,40	0.339%	2256,90	0.584%
4º	2233,20	-0.213%	2249,57	0.052%	2260,13	0.143%
5º	2233,40	0.009%	2256,00	0.286%	2267,10	0.308%
6º	2244,10	0.479%	2263,90	0.350%	2276,63	0.420%
7º	2262,00	0.798%	2271,93	0.355%	2281,80	0.227%
8º	2254,97	-0.311%	2265,33	-0.291%	2275,87	-0.260%
9º	2249,60	-0.238%	2260,50	-0.213%	2270,67	-0.228%
<b>Perda de massa total</b>		<b>0,548%</b>		<b>0,503%</b>		<b>0,488%</b>

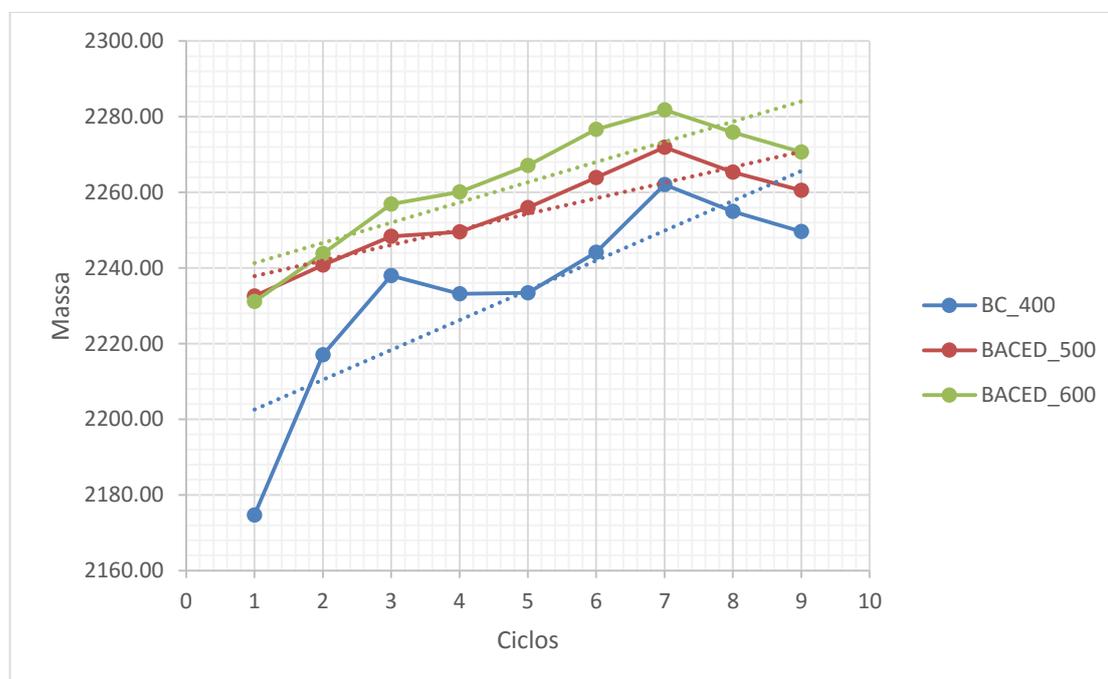


Figura 4.25 – Gráfico da variação de massa para o ensaio de ataque de sulfatos por fonte externa.  
Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados apontam que o betão de referência foi o que mais perdeu massa, ou seja, foi o mais deteriorado pelo ataque de sulfatos. Em seguida, o BACED\_500 e o BACED\_600,

nesta sequência. Os dois betões especiais, no entanto, mostraram perdas de massa similares, conforme indica o quadro 4.10. Logo, a resistência ao ataque de sulfatos por fonte externa dos betões auto-compactáveis de elevado desempenho foi superior à do convencional, tal que inclusive o aspecto dos provetes não foi demasiado alterado quando comparado ao aspecto do betão convencional.

Em princípio, o fornecimento externo e intenso de íons sulfatos potencializa a chance de ocorrência de degradação do betão, principalmente quando se trata de um caso em que houve grande redução da etringita primária para monossulfato. Contudo, o ciclo do ensaio ocorre por fases de imersão em solução e posterior secagem a 105°C. Isto, pois, de acordo com Skalny *et al.* (2002), promove a cristalização dos sais nos poros dos betões e não a sua dissolução no interior do material. Logo, o sal cristalizado é muito menos reativo do ponto de vista do ataque de sulfatos, inibindo a sua interação química no interior do betão.

Por outro lado, identificou-se a ocorrência de expansão nos provetes, bem como houve perda de massa. Isto, no entanto, ocorreu em virtude das pressões geradas pela cristalização de sais nos poros. Conforme identificado no quadro 4.10 e considerando a maior porosidade indicada no item 4.1 do BC\_400, verifica-se que este betão foi o mais afetado, pois é aquele em que pôde haver maior deposição dos sais. O aumento mais acentuado do peso desse betão ao longo dos ciclos também ratifica a ideia. A figura 4.26 ilustra os aspectos dos betões após o último ciclo do ensaio, indicando a cristalização dos sais na superfície dos betões, bem como a exposição de agregados finos e graúdos à superfície.

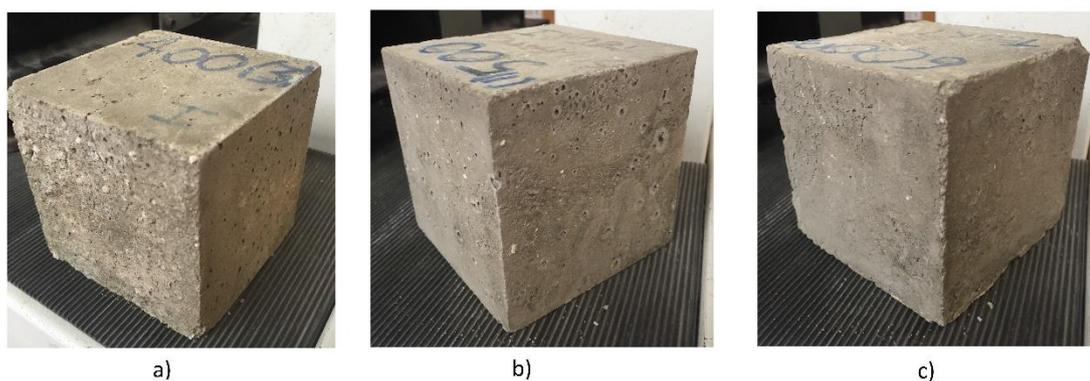


Figura 4.26 – Aspectos dos provetes após o ensaio de ataque de sulfatos por fonte externa: a) BC\_400; b) BACED\_500; c) BACED\_600.

Fonte: Acervo pessoal.

Sob o contexto da formação de etringita secundária por ataque de sulfatos por fonte externa, desenvolveram-se as quantificações por difração de raio X também para amostras dos betões submetidos ao ensaio em questão, o que ocorreu aos 70 dias. No entanto, assim como na análise por fonte interna, as amostras não apresentaram nenhuma quantidade de etringita.

Os comportamentos desses provetes foram, portanto, semelhantes àqueles curados sempre a 20°C cuja quantificação aos 70 dias por ataque de sulfatos por fonte interna também foi de 0,00%. Logo, como os betões são os mesmos para os provetes submetidos aos dois tipos de fonte de sulfatos, sabe-se que há a conversão de etringita primária em monossulfato, o que, pois, justifica a não quantificação da etringita também nesse caso de ataque por fonte externa.

#### 4.4.3 Potencial de ocorrência de etringita secundária

A partir dos resultados e discussões postos acima, percebe-se relevante conversão de etringita primária em monossulfato. Portanto, há demasiado potencial de formação de etringita secundária a partir do monossulfato existente.

Esta conversão ocorre na presença de dióxido de carbono, como indica a equação (10). Logo, para que haja a conversão, é necessária a estabilização do pH para que o CO<sub>2</sub> possa atuar nesta reação com maior facilidade.

Os betões BC\_400 e BACED\_600 curados a 80°C, por sua vez, apresentaram nenhuma ocorrência de etringita aos 28 e 70 dias. Isto denota que há uma possibilidade acentuada de decomposição da etringita primária nesses casos, em virtude da cura térmica, o que também pode promover a formação de etringita secundária.

Considerando as hipóteses de Colleparidi (2003) para a ocorrência de DEF, são necessárias ainda a presença de microfissuração e da água para a ocorrência de DEF. Logo, aqueles betões que apresentaram maior porosidade também são os mais suscetíveis à entrada de água e à deposição da etringita secundária.

Propõe-se, pois, uma classificação. Admite-se então que os betões que mostraram potencialidade na formação de etringita secundária através do monossulfato são considerados como de potencial moderado, haja vista o fato de que o CO<sub>2</sub> é bem mais reativo com o Ca(OH)<sub>2</sub> no processo de carbonatação, e que aqueles em que o potencial identificado ocorreu devido à cura térmica são classificados como de potencial elevado, já que neste caso a reformação da etringita torna-se mais fácil devido ao fato de a reação química precisar apenas da presença de água, conforme indica a equação (5). Aqueles em que não houve quantificação aos 28 e aos 70 dias e foram curados a 20°C possivelmente apresentaram baixíssima formação de etringita primária, assim como de secundária, o que implica em sua classificação como de potencial reduzido. O quadro 4.11 aponta a classificação.



Quadro 4.11 – Classificação quanto à potencialidade na formação de etringita secundária.

Fonte: Acervo pessoal.

Temperatura de cura entre 24h e 48h	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	Reduzido	Moderado	Reduzido
50°C	Moderado	Moderado	Moderado
80°C	Elevado	Moderado	Elevado

#### 4.5 POTENCIAL DE RESISTÊNCIA A CARBONATAÇÃO

A análise do potencial de resistência a carbonatação foi aferida aos 7, 14, 30 e 40 dias. Aos 7 e aos 14 dias, não houve qualquer profundidade de carbonatação, conforme ilustra a figura 4.27. Aos 30 e 40 dias, no entanto, observa-se ocorrência de carbonatação (Figuras 4.28 e 4.29). O Quadro 4.12 indica os resultados.

Quadro 4.12 – Resultados ensaio de profundidade de carbonatação.

Fonte: Acervo pessoal.

Períodos (dias)	Profundidade de carbonatação (mm)		
	BC_400	BACED_500	BACED_600
7	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00
30	17,00	13,10	0,00
40	17,50	14,40	0,00

Os resultados elucidam um melhor desempenho do BACED\_600 em relação ao de referência e ao BACED\_500.

A não ocorrência de carbonatação do BACED\_600 dentro de 40 dias elucidada, inicialmente, pouca disponibilidade de hidróxido de cálcio para reagir com o CO<sub>2</sub> ao qual estava submetido. Teoricamente, o betão com maior quantidade de cimento indica maior teor de Ca(OH)<sub>2</sub>, porém o BACED\_600 apresenta uma superfície bastante compacta, dificultando a penetração do gás. Sem a penetração do composto a ocorrência da carbonatação é portanto inibida.





Figura 4.27 – Aferição de profundidade de carbonatação aos 7 dias.  
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 4.28 – Aferição de profundidade de carbonatação aos 30 dias.  
Fonte: Acervo pessoal.

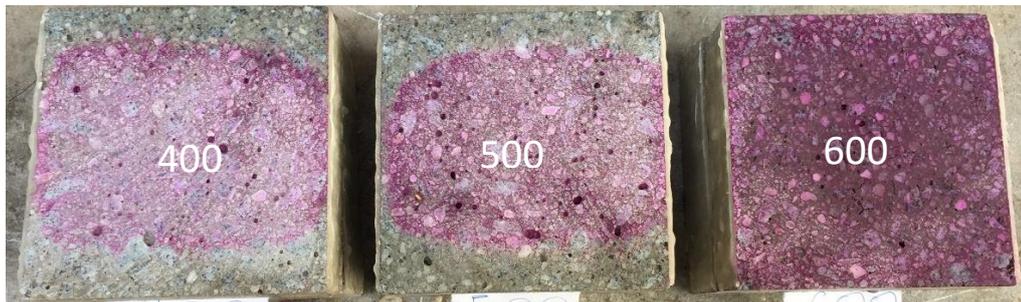


Figura 4.29 – Aferição de profundidade de carbonatação aos 40 dias.  
Fonte: Acervo pessoal.



## 5 CONCLUSÃO E FUTURAS INVESTIGAÇÕES

Após a realização dos ensaios, pôde-se concluir com êxito os objetivos estabelecidos no início do trabalho. É fato que há conclusões que são surpreendentes, mas estas são também contribuintes para o estudo e fortalecem a necessidade de um entendimento contínuo acerca dos materiais utilizados na construção civil.

No que se refere à resistência à compressão, os betões auto-compactáveis de elevado desempenho apresentaram resultados intermédios, isto é, acima do convencional, mas que não possibilitaram sua classificação como de elevada resistência. Apesar disso, sua caracterização como de elevado desempenho não é colocada em risco, como percebe-se a seguir. Deve-se atentar ainda para a conclusão de que o aumento considerável do teor de cimento não foi suficiente para elevar demasiadamente a resistência mecânica em questão do material; faz-se necessário, para casos em que se busca a elevada resistência à compressão, um maior controle da porosidade do betão e uma melhor qualidade da pasta que permita o aumento da sua resistência mecânica, já que os rompimentos se deram pela pasta e não pelo agregado.

Os ensaios de difusão de cloretos, por sua vez, apontaram que os BACED apresentam uma resistência à penetração dos íons de cloro satisfatória quando comparada ao betão de referência. De acordo com a classificação pelo método de Luping apontada no capítulo anterior, o BACED\_600 é o que indica melhor comportamento. Em termos de resistência à difusão de cloretos, portanto, os betões especiais confirmam sua condição de elevado desempenho, bem como indicam serem materiais duráveis quanto a este ataque.

A análise do potencial de formação de etringita secundária foi uma das partes de maior relevância neste trabalho. Com base nos ensaios desenvolvidos, não foi possível a aferição de qual tipo de betão apresentou maior formação de etringita secundária, o que é plausível já que o processo de formação deste produto químico requer tempo, normalmente meses ou anos. No entanto, a investigação proporcionou afirmar quais os tipos de betão que, associados às condições de cura, indicam maior potencial de ocorrência de DEF. Em corroboração ao elucidado na literatura, a cura acima de 70°C foi bastante colaborativa para a precipitação da etringita primária, sendo, contudo, o BACED\_500 pouco expressivo quanto à precipitação deste composto mesmo submetido a 80°C. O betão de referência e o BACED\_600 curados a 80°C foram os que indicaram maior suscetibilidade para a formação de etringita secundária. Pode-se então levantar a questão de que não só a temperatura contribui para a ocorrência de DEF, mas também a dosagem de cimento pode ser uma variável.



O potencial de carbonatação foi o último fator avaliado no âmbito da durabilidade. De acordo com os ensaios, entre os betões especiais o BACED\_500 foi consideravelmente mais suscetível à carbonatação que o BACED\_600. Apesar de apresentar maior quantidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  devido à maior dosagem de cimento, este último é mais compacto, o que dificulta a entrada do  $\text{CO}_2$ . Outra consideração a ser feita é a relação entre o potencial de carbonatação e a formação da etringita secundária a partir do monossulfato, que ocorre em função da reação com o dióxido de carbono. Sabe-se que o BACED\_500 apresenta potencial moderado para a formação da etringita secundária, isto é que indica potencial de formação do composto de sulfato por meio da reação do dióxido de carbono com o monossulfato, e que este material foi mais suscetível à carbonatação que o seu similar. Logo, o BACED\_500 apresenta considerável potencial para a formação da etringita secundária através da reação entre o  $\text{CO}_2$  e o monossulfato. O BACED\_600, por sua vez, indicou baixa suscetibilidade à carbonatação, de modo que a formação de etringita secundária por meio do monossulfato reagindo com o  $\text{CO}_2$  é de ocorrência menos provável que no BACED\_500.

Tendo em vista que o escopo deste trabalho está baseado no estudo da durabilidade de betões auto-compactáveis de elevado desempenho desenvolvidos sob circunstâncias mais próximas possíveis dos betões convencionais, obteve-se êxito neste objetivo à medida em que se conseguiu a auto-compactabilidade e o elevado desempenho para esses betões. Comparativamente, pode-se dizer que o BACED\_600 apresenta maior elevado desempenho, já que o betão de dosagem de  $500 \text{ kg/m}^3$  apresentou-se melhor quanto à resistência à compressão e que o betão de  $600 \text{ kg/m}^3$  apresentou-se melhor quanto à difusão de cloretos, à resistência à carbonatação e ao potencial de formação de etringita secundária, este último mediante à correlação entre as análises dos ensaio de potencial de carbonatação e de potencial de formação de etringita secundária.

Este estudo almejou o entendimento da durabilidade de betões auto-compactáveis de elevado desempenho face ao ataque químico de determinados agentes. No entanto, conforme já discutido, sabe-se que a investigação acerca da durabilidade do betão deve ser um processo contínuo e abrangente, dados os inúmeros agentes deletérios possíveis e a existência da progressão dos ataques conhecidos. Nesse contexto, outros ramos de pesquisa surgem na complementação desta investigação como a avaliação da durabilidade de betões auto-compactáveis de elevado desempenho face ao ataque químico de ácidos, à exposição a ciclos de gelo e degelo, à reação álcali-agregado, ao ataque biológico, entre outros. Degradação por ação física e mecânica também são vertentes que merecem atenção e contribuem para o conhecimento acerca do BACED.



Especificamente, um estudo mais acentuado e que permita uma extensão temporal maior acerca da formação de etringita secundária em betões auto-compactáveis de elevado desempenho se faz bastante complementar à pesquisa realizada. Analisar o comportamento desses materiais ao longo de meses e anos de modo a quantificar a formação de etringita secundária e avaliar o nível de degradação é um estudo que complementa e proporciona continuidade ao desenvolvido neste trabalho, tal que permite confirmar ou não os potenciais de ocorrência de DEF identificados.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 562-13: **Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings**, 2013.
- AÏTCIN, P. -C. **Concreto de Alto Desempenho**. Trad. Geraldo C. Serra, PINI. São Paulo, Brasil, 2000.
- AGUIAR, J. B. **Qualidade de betões**. Apontamentos – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2015.
- Bogue, R. H. **The Chemistry of Portland Cement**. Reinhold Publishing Corporation. New York, United States of America, 1995.
- BRUNETAUD, X. **Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton**. Thèse de doctorat (Physico-Chimie des Matériaux), Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Ecole Centrale. Paris, França, 2005.
- CAMÕES, A. **Betões de elevado desempenho**. Seminário INOVAÇÃO EM BETÕES – Nova normalização e produção de betões especiais CONSTRUNOR. Guimarães, Portugal, 2006.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em Concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. PINI, São Paulo, Brasil, 1997.
- CEN/TS 12390-12 **Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method**. European Committee for Standardization. Bruxelas, Bélgica, 2010.
- COLLEPARDI, M. **A state-of-the art review on delayed ettringite attack on concrete**. Cement and concrete research, 2003.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. LNEC, Lisboa, Portugal, 1988.
- COUTINHO, J. S. **Ataque por sulfatos**. Durabilidade – FEUP, Porto, Portugal, 2001.
- DACOL, K. A. **Receita do Desempenho**. Técnica. São Paulo, Brasil, 2012.
- DAY, R. L. **The Effect of Secondary Ettringite on the Durability of Concrete: A Literature Analysis**. Portland Cement Association, Research and Development Bulletin RD108T. Calgary, Canadá, 1992.
- E 463 **Betão: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal, 2004.



E 464 **Betões: Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às ações ambientais.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal, 2007.

FERREIRA, E. G. A. **Avaliação da alteração nas propriedades da pasta de cimento em ambiente de repositório.** Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2013.

FERREIRA, R. M. S. **Betão Auto-Compactável Metodologia de Composição.** Dissertação (Mestrado em Materiais e Reabilitação da Construção). Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 2001.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras.** Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Olinda, Brasil, 2005.

FU, Y.; XIE, P.; GU, P.; BEADOIN, J. J. **Significance of pre-existing cracks on nucleation of secondary ettringite in steam cured cement paste.** Cement and concrete research, 1994.

GOMES, A.; PINTO, A. P. F; PINTO, J. B. **Cimento Portland e Adições.** Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2013.

HARRIS, D. K. **Application of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) for Sustainable Building Components.** US-Israel Workshop on: Sustainable Buildings – Materials and Energy. Haifa, Israel, 2010.

HEINZ, D.; KALDE, M.; LUDWIG, U.; RUEDIGER, I. **Present state of investigation on damaging late ettringite formation (DLEF) in mortars and concretes.** Ettringite: the sometimes host of destruction. American Concrete Institute, ERLIN, Bernard (editor). Michigan, Estados Unidos da América, 1999.

HELENE, P. R. L. **Introdução da durabilidade no projeto.** Ambient. Constr. São Paulo, Brasil, 1997.

HELENE, P. R. L.; MOREIRA, H. P.; FIGUEIREDO, E. P. **Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP: EDUSP. São Paulo, Brasil, 2001.

JÚNIOR, E. L. F.; CAMARINI, G. **Formação de etringita retardada em concretos submetidos à cura térmica.** V Simpósio EDUSP sobre estruturas do concreto. São Paulo, Brasil, 2003.

LAWRENCE, C. D. **Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effect of curing period and temperature.** Cement and concrete research, 1995.

LOUREIRO, P. M. B. **Otimização da Quantidade de Cinzas Volantes em Betões – Benefício Económico.** Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis) – Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 2013.

LUPING, T. **Chloride transport in Concrete – Measurement and Prediction.** Chalmers University of Technology. Gotemburgo, Suécia, 1996.

MATTOS, P. M. F.; BARBOSA, N. P. **Patologia estrutural e projeto de intervenção em estrutura de concreto armado para o laboratório de sistemas de refrigeração por adsorção da Universidade Federal da Paraíba.** Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto. Bonito, Brasil, 2015.

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento.** Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2002.

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

MENDONÇA, A. F. **Concepção estrutural e concreto de alta resistência – fatores relevantes no projeto estrutural de edifícios.** Congresso Brasileiro do Concreto – REIBRAC/ IBRACON. Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** Trad. IBRACON. São Paulo, São Paulo, 2008.

METHA, P. K.; AÏTCIN, P. -C. **Principals underlying the production of high performance concrete.** Cement, Concrete and Aggregates. ASTM, 1990.

NP 1378 **Agregados – Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio.** Repartição de Normalização (IGPAI). Lisboa, Portugal, 1976.

NP EN 197-1 **Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.** Instituto Português da Qualidade (IPQ). Lisboa, Portugal, 2012.

NP EN 1008 **Água de amassadura para betão: Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria do betão, para o fabrico do betão.** Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica, Portugal, 2003.

NP EN 12350 **Ensaio do betão fresco.** Instituto Português da Qualidade (IPQ). Lisboa, Portugal, 2009.

NP EN 12620 **Agregados para betão.** Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica, Portugal, 2010.

NP EN 13670-1 **Execução de estruturas em betão – parte 1: Regras gerais.** Instituto Português da Qualidade (IPQ). Lisboa, Portugal, 2007.

EN 206-1 **Betão – parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.** Instituto Português da Qualidade (IPQ). Lisboa, Portugal, 2013.

ODLER, I. **Hydration, setting and hardening of Portland cement.** Lea's chemistry of cement and concrete. Elsevier: Butterworth Heinemann, China, 2007.

OLIVEIRA, E. M. B. N. **Betão Auto-Compactável Metodologia de Composição**. Dissertação (Mestrado em Gestão Física e Tecnologia da Construção) – Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 2009.

PINHEIRO-ALVES, M. T.; GOMÀ, F.; JALALI, S. **Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos**. Congresso Construção 2007 – 3º Congresso Nacional. Coimbra, Portugal, 2007.

PIOVEZAM, I. A. R.; MELEIRO, L. P.; ISA, M. M. **Resistência à compressão do concreto autoadensável: influência da atividade pozolânica do calcário e do basalto**. RECIE. Uberlândia, Brasil, 2006.

POULSON, B. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. Norfolk, Inglaterra, 2002.

SANTOS, M. R. G. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso**. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil, 2012.

SILVA, P.; BRITO, J. **Betão auto-compactável (BAC) – estado actual do conhecimento**. Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal, 2009.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; OLDER, I. **Sulfate Attack on Concrete**. SPON PRESS Taylor & Francis Group. Londres, Inglaterra, 2002.

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

STANCIU, D.; ION, I. M.; AGUIAR, J. B.; ANGELESCU, N. **Self-compacting concrete. A comparison between the workability properties, density, porosity and mechanical properties**. Metalurgia Internacional. Romênia, 2013.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Thomas Telford, 2ª edição, Londres, Inglaterra, 1997.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. **Delayed ettringite formation**. Cement and concrete research, 102º Annual Meeting of the American Ceramic Society. St. Louis, Estados Unidos da América, 2001.

TEIXEIRA, S. B. **Betões de elevada resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal, 2007.

THOMAS, M.; FOLLIARD, K.; DRIMALAS, T.; RAMLOCHAN, T. **Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structure**. Cement and concrete research, 2008.

YE, G. **Experimental Study and Numerical Simulation of the Development of the Microstructure and Permeability of Cementitious Materials**. Thesis (Master of Engineering) – Asian Institute of Technology geboren te Xiangtan. Hunan Province, China, 2003.

## 7 ANEXOS

Quadro 7.1 – Composição BC\_400 kg/m<sup>3</sup>.

Fonte: Acervo pessoal.

 Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil <b>Laboratório de Materiais de Construção</b>  Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães Tel: 253 510 249 Fax: 253 510 217/249 e-Mail: aires@civil.uminho.pt		<b>Composição de betões Método de Faury</b>			
		REQUERENTE			
		Dissertação de Mestrado - Phelipe Mattos			
		MATERIAL			
		<b>BC - 400</b>			
<b>1 - AGREGADOS</b>					
Peneiro EN		% retidos acumulados			
mm	areia média	-	brita 4/8 BRITAMINHO		
63,0	0,000	0,0	0,0		
45,0	0,000	0,0	0,0		
31,5	0,000	0,0	0,0		
22,4	0,000	0,0	0,0		
16,0	0,000	0,0	0,0		
11,2	0,000	0,0	0,0		
8,0	0,000	0,0	7,0		
5,6	0,000	0,0	7,0		
4,0	2,639	0,0	89,0		
2,0	16,008	0,0	97,0		
1,0	35,716	0,0	98,0		
0,5	58,395	0,0	99,0		
0,25	79,350	0,0	99,0		
0,125	94,324	0,0	99,0		
0,063	99,416	0,0	99,0		
Absorção de Água (%)		1,52%	0,00%	0,40%	0,00%
Humidade (%)		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )		2569	1	2640	1
	D <sub>máx.</sub> (ASTM)	4,00	0,06	5,60	0,06
	Módulo Finura	3,86	0,00	6,94	0,00
<b>2 - LIGANTE</b>					
	Designação	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )	% adição	
cimento	CEM I 42.5 R	3150	400	-	

cinza volante	Pegop	2362	0	
silica de fumo	-	2300	0	

% de adição = adição/(cimento + Σadições)

### 3 - VOLUME VAZIOS

ACI 211.1		Valor adoptado (L/m³):	34,0
D <sub>máx.</sub> (mm)	V <sub>v</sub> (L/m³)		
9,53	30		
12,7	25		
19,1	20		
25,4	15		
38,1	10		
50,8	5		
76,2	3		
101,6	2,7	(por interpolação linear)	
152,4	2		

### 4 - ÁGUA DE AMASSADURA

razão água/ligante = $A^1_{(C+CV+SF)}$	0,55	At(L/m³) =	220,00
At - água total		C - cimento	
CV - cinza volante		SF - silica de fumo	

### 5 - ADJUVANTES

Superplastificante (SP)	Teor de Sólidos	(sól.SP)/(C+CV+SF)	Dosagem (kg/m³)
SP	20,0%		0,00

Adjuvante		Dosagem (kg/m3)
Designação	Tipo	

### 6 - PARÂMETROS DA CURVA DE FAURY

Consistência	Meios de compactação	Valores de A			Valor es de B
		Natureza dos Agregados			
		Areia rolada		Areia e Agregado grosso britado	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado		
Terra Húmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)	≤18	≤19	≤20	1
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5



Mole	Apiloamento	28	30	32	2	
Fluida	Espalhamento e compactação pelo peso próprio	32	34	38	2	
Areia rolada e agregado grosso britado:		A = 20 + slump (cm)			Valores adoptados	
Areia rolada e agregado grosso rolado:		A = 18 + slump (cm)			A	B
					34	2

**7 - RAIO MÉDIO DO MOLDE**

R(mm) = 5,60

**8 - RESULTADOS**

Peneiro EN	% retidos acumulados		
mm	c+m	m	m*
63,0	0,00	0,00	0,00
45,0	0,00	0,00	0,00
31,5	0,00	0,00	0,00
22,4	0,00	0,00	0,00
16,0	0,00	0,00	0,00
11,2	0,00	0,00	0,00
8,0	0,00	0,00	2,25
5,60	0,00	0,00	2,25
4,00	17,10	20,60	30,39
2,00	40,12	48,35	42,06
1,00	51,48	62,04	55,80
0,500	61,38	73,97	71,56
0,250	69,99	84,35	85,83
0,125	77,49	93,39	96,03
0,063	84,02	100,00	99,49
D <sub>máx.</sub> (ASTM)	5,60	5,60	5,60
Módulo Finura	4,02	4,83	4,86

c + m: curva de referência de Faury: ligante + agregados

m - curva teórica de referência de Faury: agregados

m\* - curva real: agregados

**8.1 - Material a introduzir na mistura**

Material	Dosagens por m <sup>3</sup> de Betão	Dosagens para uma amassadura de (L):	18
cimento	400,00 kg	7,20 kg	
cinza volante			
sílica de fumo			
areia média	1089,95 kg	19,62 kg	
-	0,00 kg	0,00 kg	
brita 4/8 BRITAMINHO	514,19 kg	9,26 kg	
0	0,00 kg	0,00 kg	
0	0,00 kg	0,00 kg	
SP	0,00 kg	0,00 kg	
A	238,62 L	4,30 L	



A - água a introduzir na mistura

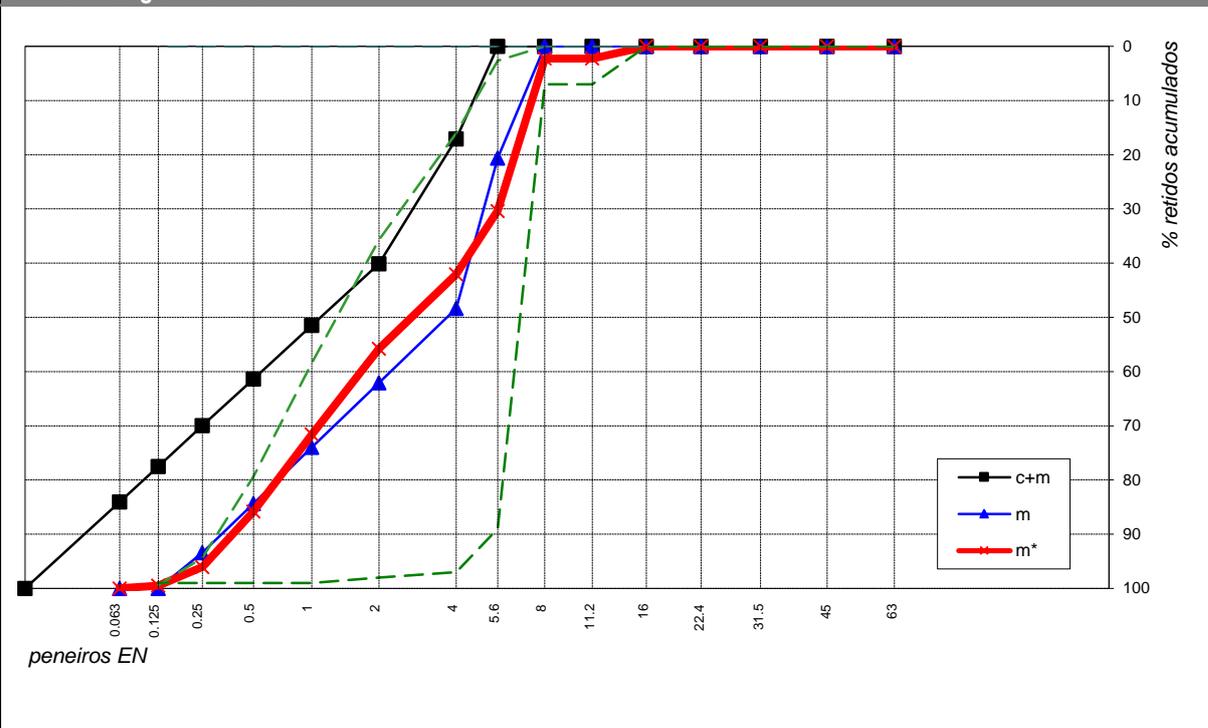
$$A = At - (1 - \%SP) \times SP - \%H.I. \times M + \%A.I. \times M$$

%SP - teor de sólidos do SP

%H.I. - humidade dos inerte

%A.I. - absorção de água dos inertes

### 8.2 - Curvas granulométricas



Quadro 7.2 – Composição BACED\_500 kg/m<sup>3</sup>.

Fonte: Acervo pessoal.

 Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Materiais de Construção  Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães Tel: 253 510 249 Fax: 253 510 217/249 e-Mail: aires@civil.uminho.pt	<h2>Composição de betões Método de Faury</h2>
	REQUERENTE Dissertação de Mestrado - Phelipe Mattos
	MATERIAL <h3>BACED - 500</h3>

### 1 - AGREGADOS

Peneiro EN mm	% retidos acumulados			
	areia média	-	brita 4/8 BRITAMINHO	
63,0	0,000	0,0	0,0	
45,0	0,000	0,0	0,0	
31,5	0,000	0,0	0,0	
22,4	0,000	0,0	0,0	
16,0	0,000	0,0	0,0	



11,2	0,000	0,0	0,0		
8,0	0,000	0,0	7,0		
5,6	0,000	0,0	7,0		
4,0	2,639	0,0	89,0		
2,0	16,008	0,0	97,0		
1,0	35,716	0,0	98,0		
0,5	58,395	0,0	99,0		
0,25	79,350	0,0	99,0		
0,125	94,324	0,0	99,0		
0,063	99,416	0,0	99,0		
Absorção de Água (%)		1,52%	0,00%	0,40%	0,00%
Humidade (%)		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )		2569	1	2640	1
D <sub>máx.</sub> (ASTM)		4,00	0,06	5,60	0,06
Módulo Finura		3,86	0,00	6,94	0,00

## 2 - LIGANTE

	Designação	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )	% adição
cimento	CEM I 42.5 R	3150	500	-
cinza volante	Pegop	2362	0	
silica de fumo	--	2300	0	

% de adição = adição/(cimento +  $\Sigma$ adições)

## 3 - VOLUME VAZIOS

ACI 211.1		Valor adoptado (L/m <sup>3</sup> ):
D <sub>máx.</sub> (mm)	V <sub>v</sub> (L/m <sup>3</sup> )	34,0
9,53	30	
12,7	25	
19,1	20	
25,4	15	
38,1	10	
50,8	5	
76,2	3	
101,6	2,7	
152,4	2	

(por interpolação linear)

## 4 - ÁGUA DE AMASSADURA

razão água/ligante = $\frac{At}{(C+CV+SF)}$ =	0,4	At(L/m <sup>3</sup> ) =	200,00
At - água total		C - cimento	
CV - cinza volante		SF - silica de fumo	

## 5 - ADJUVANTES

Superplastificante (SP)	Teor de Sólidos	(sól.SP)/(C+CV+SF)	Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )
SP	18,1%	0,6%	15,19



Adjuvante		Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )
Designação	Tipo	

**6 - PARÂMETROS DA CURVA DE FAURY**

Consistência	Meios de compactação	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos Agregados			
		Areia rolada		Areia e Agregado grosso britado	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado		
Terra Úmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)	≤18	≤19	≤20	1
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluida	Espalhamento e compactação pelo peso próprio	32	34	38	2

Areia rolada e agregado grosso britado:

$$A = 20 + slump \text{ (cm)}$$

Areia rolada e agregado grosso rolado:

$$A = 18 + slump \text{ (cm)}$$

Valores adoptados

A	B
34	2

**7 - RAIÓ MÉDIO DO MOLDE**

R(mm) = 5,60

**8 - RESULTADOS**

Peneiro EN	% retidos acumulados	m	m*
mm	c+m	m	m*
63,0	0,00	0,00	0,00
45,0	0,00	0,00	0,00
31,5	0,00	0,00	0,00
22,4	0,00	0,00	0,00
16,0	0,00	0,00	0,00
11,2	0,00	0,00	0,00
8,0	0,00	0,00	2,42
5,60	0,00	0,00	2,42
4,00	17,10	21,57	32,61
2,00	40,12	50,60	44,59
1,00	51,48	64,94	58,52
0,500	61,38	77,42	74,49
0,250	69,99	88,29	88,93
0,125	77,49	97,74	99,25
0,063	84,02	100,00	102,76
D <sub>máx.</sub> (ASTM)	5,60	5,60	5,60



Módulo Finura	4,02	5,01	5,06
---------------	------	------	------

c + m: curva de referência de Faury: ligante + agregados  
 m - curva teórica de referência de Faury: agregados  
 m\* - curva real: agregados

**8.1 - Material a introduzir na mistura**

Material	Dosagens por m <sup>3</sup> de Betão	Dosagens para uma amassadura de (L):	10,35
cimento	500,00 kg	5,18 kg	
cinza volante			
silica de fumo			
areia média	1048,10 kg	10,85 kg	
-	0,00 kg	0,00 kg	
brita 4/8 BRITAMINHO	526,18 kg	5,45 kg	
0	0,00 kg	0,00 kg	
0	0,00 kg	0,00 kg	
SP	15,19 kg	0,16 kg	
A	205,59 L	2,13 L	

A - água a introduzir na mistura

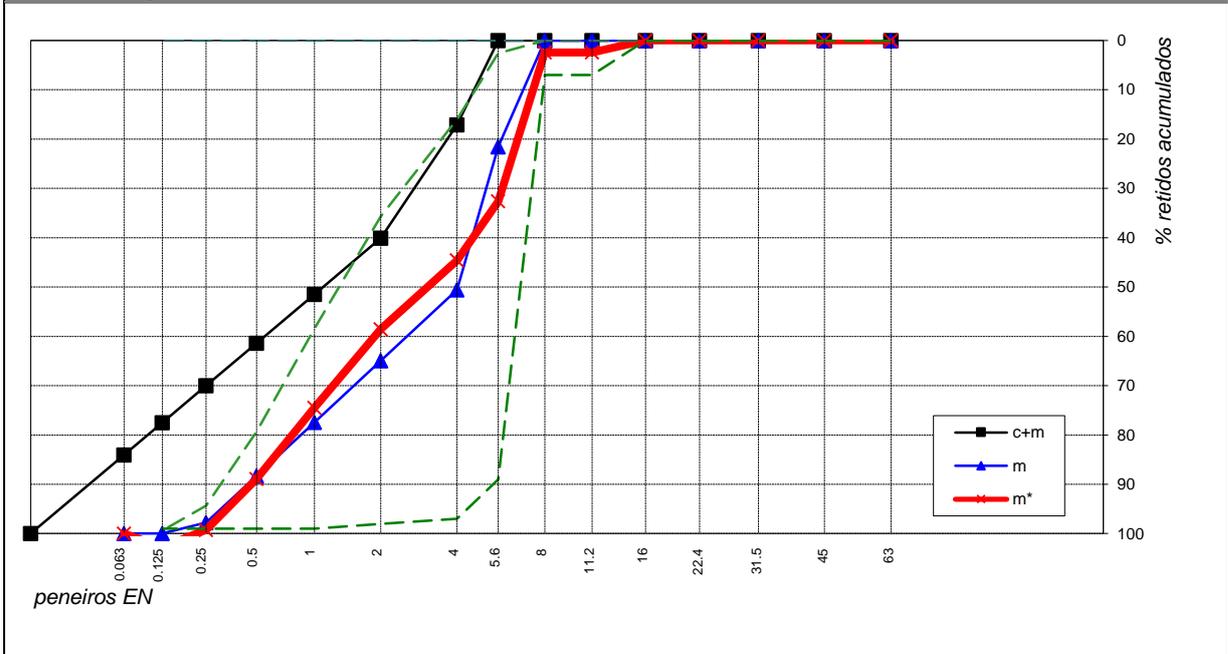
$$A = At - (1 - \%SP) \times SP - \%H.I. \times M + \%A.I. \times M$$

%SP - teor de sólidos do SP

%H.I. - humidade dos inerte

%A.I. - absorção de água dos inertes

**8.2 - Curvas granulométricas**



Quadro 7.3 – Composição BACED\_2%SP\_600 kg/m<sup>3</sup>.

Fonte: Acervo pessoal.

 <p>Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil <b>Laboratório de Materiais de Construção</b></p> <p>Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães Tel: 253 510 249 Fax: 253 510 217/249 e-Mail: aires@civil.uminho.pt</p>		<b>Composição de betões Método de Faury</b>			
		REQUERENTE			
		Dissertação de Mestrado - Felipe Mattos			
		MATERIAL			
		<b>BACED - 600</b>			
<b>1 - AGREGADOS</b>					
Peneiro EN		% retidos acumulados			
mm	areia média	-	brita 4/8 BRITAMINHO		
63,0	0,000	0,0	0,0		
45,0	0,000	0,0	0,0		
31,5	0,000	0,0	0,0		
22,4	0,000	0,0	0,0		
16,0	0,000	0,0	0,0		
11,2	0,000	0,0	0,0		
8,0	0,000	0,0	7,0		
5,6	0,000	0,0	7,0		
4,0	2,639	0,0	89,0		
2,0	16,008	0,0	97,0		
1,0	35,716	0,0	98,0		
0,5	58,395	0,0	99,0		
0,25	79,350	0,0	99,0		
0,125	94,324	0,0	99,0		
0,063	99,416	0,0	99,0		
Absorção de Água (%)		1,52%	0,00%	0,40%	0,00%
Humidade (%)		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )		2569	1	2640	1
	D <sub>máx.</sub> (ASTM)	4,00	0,06	5,60	0,06
	Módulo Finura	3,86	0,00	6,94	0,00
<b>2 - LIGANTE</b>					
	Designação	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )	% adição	
cimento	CEM I 42.5 R	3150	600	-	
cinza volante	Pegop	2362	0		
sílica de fumo	--	2300	0		
% de adição = adição/(cimento + $\Sigma$ adições)					
<b>3 - VOLUME VAZIOS</b>					
ACI 211.1		Valor adoptado (L/m <sup>3</sup> ):		34,0	
D <sub>máx.</sub> (mm)	V <sub>v</sub> (L/m <sup>3</sup> )				
9,53	30				

12,7	25	(por interpolação linear)
19,1	20	
25,4	15	
38,1	10	
50,8	5	
76,2	3	
101,6	2,7	
152,4	2	

#### 4 - ÁGUA DE AMASSADURA

razão água/ligante = $\frac{At}{(C+CV+SF)}$ =	0,4	At(L/m <sup>3</sup> ) =	240,00
At - água total		C - cimento	
CV - cinza volante		SF - sílica de fumo	

#### 5 - ADJUVANTES

Superplastificante (SP)	Teor de Sólidos	(sól.SP)/(C+CV+SF)	Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )
SP	18,1%	0,4%	11,60
Adjuvante	Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )		
Designação	Tipo		

#### 6 - PARÂMETROS DA CURVA DE FAURY

Consistência	Meios de compactação	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos Agregados			
		Areia rolada		Areia e Agregado grosso britado	
		Agregado grosso rolado	Agregado grosso britado		
Terra Húmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)	≤18	≤19	≤20	1
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluida	Espalhamento e compactação pelo peso próprio	32	34	38	2

Areia rolada e agregado grosso britado:

$$A = 20 + slump \text{ (cm)}$$

Areia rolada e agregado grosso rolado:

$$A = 18 + slump \text{ (cm)}$$

Valores adotados	
A	B
34	2

#### 7 - RAIÓ MÉDIO DO MOLDE

R(mm) =	5,60
---------	------



**8 - RESULTADOS**

Peneiro EN	% retidos acumulados		
	c+m	m	m*
63,0	0,00	0,00	0,00
45,0	0,00	0,00	0,00
31,5	0,00	0,00	0,00
22,4	0,00	0,00	0,00
16,0	0,00	0,00	0,00
11,2	0,00	0,00	0,00
8,0	0,00	0,00	2,72
5,60	0,00	0,00	2,72
4,00	17,10	23,18	36,41
2,00	40,12	54,39	48,59
1,00	51,48	69,80	62,35
0,500	61,38	83,21	78,12
0,250	69,99	94,89	92,33
0,125	77,49	100,00	102,48
0,063	84,02	100,00	105,94
D <sub>máx.</sub> (ASTM)	5,60	5,60	5,60
Módulo Finura	4,02	5,25	5,32

c + m: curva de referência de Faury: ligante + agregados

m - curva teórica de referência de Faury: agregados

m\* - curva real: agregados

**8.1 - Material a introduzir na mistura**

Material	Dosagens por m <sup>3</sup> de Betão	Dosagens para uma amassadura de (L):	10,35
cimento	600,00 kg	6,21 kg	
cinza volante			
sílica de fumo			
areia média	882,95 kg	9,14 kg	
-	0,00 kg	0,00 kg	
brita 4/8 BRITAMINHO	506,49 kg	5,24 kg	
0	0,00 kg	0,00 kg	
0	0,00 kg	0,00 kg	
SP	11,60 kg	0,12 kg	
A	245,94 L	2,55 L	

A - água a introduzir na mistura

$$A = At - (1 - \%SP) \times SP - \%H.I. \times M + \%A.I. \times M$$

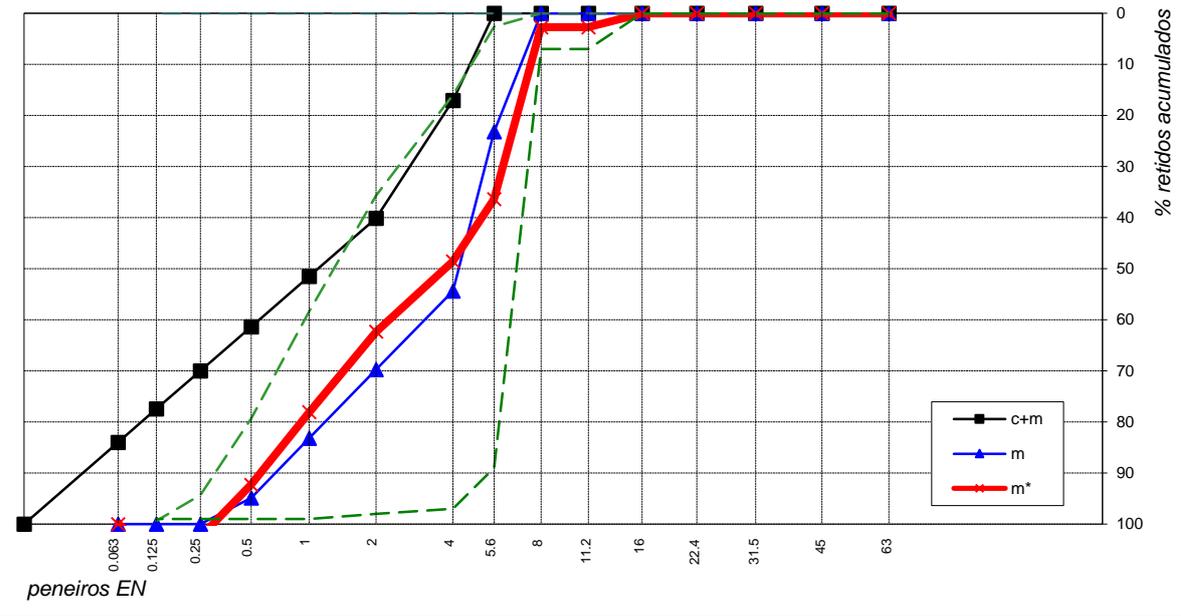
%SP - teor de sólidos do SP

%H.I. - humidade dos inerte

%A.I. - absorção de água dos inertes



8.2 - Curvas granulométricas



Quadro 7.4 – Resultados de autocontrolo CEM I 42,5 R Secil.  
 Fonte: Acervo pessoal.



**RESULTADOS DO AUTOCONTRÓLO**

AUTOCONTROL RESULTS | RÉSULTATS DE L'AUTOCONTRÔLE

VALORES MÉDIOS

AVERAGE RESULTS | RÉSULTATS MOYENNE

REFERÊNCIA Cimento Portland - EN 197-1 CEM I 42,5 R  
 REFERENCE Portland Cement | Ciment Portland

BOLETIM Nº ACM-008/2014  
 REPORT N. | RAPPORT N.

FÁBRICA Maceira-Liz  
 PLANT | USINE

DATA 14-02-2014  
 DATE

MÊS Dezembro 2013  
 MONTH | MOIS December | Décembre

**ENSAIOS MECÂNICOS**  
 MECHANICAL TESTS | ESSAIS MECANIKES [NP EN 196-1]

IDADE AGE	Resistência à Flexão (MPa) Flexural Strength Résistance à la Flexion		Resistência à Compressão (MPa) Compressive Strength Résistance à la Compression	
	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN
	2 dias days   jours	5,9	5,9	34,0
7 dias days   jours	7,8	7,8	46,1	47,7
28 dias days   jours	8,9	9,0	58,4	58,2

**ENSAIOS FÍSICOS**  
 PHYSICAL TESTS | ESSAIS PHYSIQUES

	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN
Peso Específico (g/cm³) Specific weight   Masse volumique	3,13	3,12
Resíduo de Peneiração (%) Sieve Residue   Rélicue de Tamisage [NP EN 196-6]	45 µm	3,02
	32 µm	9,26
Superfície Específica de Blaine (cm²/g) Blaine Spec. Surface   Surface spécif. Blaine [NP EN 196-2]	4133	4072
Água na Pasta Normal (%) Water demand   Eau de Gâchage [NP EN 196-3]	29,1	28,8
Tempo de Presa (min) Setting Time   Temps de Prise [NP EN 196-3]	Início Initial   Debut	178
	Fim Final   Fin	232
Expansibilidade (mm) Soundness   Expansion [NP EN 196-3]	1,06	0,84
Índice de Reflectância (0 a 100) Reflection (Whiteness)   Index de reflectance		

**INFORMAÇÃO ADICIONAL**  
 ADDITIONAL INFORMATION | INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

--

**ANÁLISE QUÍMICA**  
 CHEMICAL ANALYSIS | ANALYSES CHIMIQUES

	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN
Perda ao Fogo (%) Loss on ignition   Perte au Feu	-	2,15
Resíduo Insolúvel (%) Insoluble Residue   Résidu insoluble	-	0,99
Óxido de Silício (%) Silicon Oxide   Oxyde de Silicium	SiO <sub>2</sub>	17,85
Óxido de Alumínio (%) Aluminium Oxide   Oxyde de Aluminium	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,15
Óxido de Ferro (%) Ferric Oxide   Oxyde de Fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,71
Óxido de Cálcio (%) Calcium Oxide   Oxyde de Calcium	CaO	65,06
Óxido de Magnésio (%) Magnesium Oxide   Oxyde de Magnésium	MgO	1,85
Sulfatos (%) Sulfates   Sulfates	SO <sub>3</sub>	3,44
Óxido de Potássio (%) Potassium Oxide   Oxyde de Potassium	K <sub>2</sub> O	0,91
Óxido de Sódio (%) Sodium Oxide   Oxyde de Sodium	Na <sub>2</sub> O	0,28
Cloratos (%) Chloride   Chlorure [NP EN 196-2]	Cl	0,06
Cal Livre (%) Free Lime   Chaux Libre		
Índice da Saturação em Cal Lime Saturation Factor   Depot de Chaux		
Índice Silicioso Silica Ratio   Ind. de Silicieux		
Índice Aluminoso Alumina-iron Ratio   Indice Alumineux		

**COMPOSIÇÃO POTENCIAL DE BOGUE**  
 BOGUE'S COMPOSITION | COMPOSITION POTENCIAL DE BOGUE

	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN
Silicato Tricálcico (%) Tricalcium Silicate   Silicate Tricalcique	C <sub>3</sub> S	57,50 (DIRL) 58,30 (DIRL)
Silicato Bicálcico (%) Dicalcium Silicate   Silicate Bicalcique	C <sub>2</sub> S	15,30 14,50
Aluminato Tricálcico (%) Tricalcium Aluminate   Aluminate Tricalcique	C <sub>3</sub> A	
Ferro-aluminato Tetracálcico (%) Tetracalcium Alumino-ferite   Ferrosilicate Tetracalcique	C <sub>4</sub> AF	

APROVADO  
 APPROVED | APPROVÉ

BPM

ANO | YEAR | AN Últimos 12 meses. Last 12 months. Dernier 12 mois.  
 NOTA | NOTE Os parâmetros são determinados por métodos internos, exceto quando a [standard] é indicada. Les paramètres sont déterminés par méthodes internes, except leurs que indique la [norme appliquée].