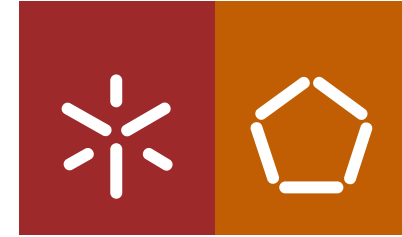


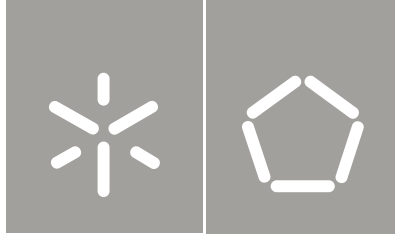


Tiago Manuel da Rocha Martins

UTILIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS PARA OBTENÇÃO DE BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Manuel da Rocha Martins

UTILIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS PARA OBTENÇÃO DE BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil
Perfil de Construções

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

e co-orientação de
Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível graças ao contributo e apoio de todos aqueles que me ajudaram na sua concretização e desde já manifesto o meu sincero agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar e co-orientador Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal, o meu profundo agradecimento pela paciência, orientação, transmissão de conhecimento e auxílio ao longo da realização desta dissertação.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção de Engenharia Civil da Universidade do Minho, nomeadamente Fernando Pokee e em especial ao Carlos Jesus, o meu obrigado pela disponibilidade e ajuda prestada na preparação e realização dos ensaios.

Quero também dirigir uma palavra de apreço aos meus familiares e amigos mais próximos que, durante este trabalho, me dedicaram apoio e disponibilidade.

Resumo

A produção do principal constituinte do betão, cimento Portland, representa cerca de 80% das emissões totais de CO₂ do betão que por sua vez corresponde, a cerca de 6-7% das emissões de CO₂ no Planeta.

Em 1980 Roger Lacroix, apresentam a primeira designação de betões de elevado desempenho, que classificaram composições de betão segundo três características diferentes: alta resistência, elevada trabalhabilidade e elevada durabilidade (Betões de elevado desempenho). As razões que levam ao uso dos betões de elevado desempenho consistem na melhoria da durabilidade, na redução dos custos de manutenção, reparação e substituição a longo prazo.

O objetivo desta dissertação é a utilização de nano-partículas de TiO₂ para obtenção de betões de elevado desempenho, verificar se o TiO₂ contribui para aumentar a reação pozolânica, avaliar as características mecânicas e durabilidade do betão com a incorporação de TiO₂ e também do betão com a incorporação de cinzas volantes e TiO₂

A presente dissertação apresenta resultados sobre o abaixamento, resistência à compressão, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário, ataque por ácido sulfúrico, ultra sons e resistividade elétrica de betões no qual se utilizou uma razão água/ligante de 0,35 nos betões com TiO₂ e 0,325 para betões com cinzas volantes.

Os resultados da investigação experimental mostram que os betões com percentagens crescentes de nano-partículas de TiO₂ apresentam uma redução de durabilidade. Os resultados comprovaram que um betão com 1% de nano-partículas de TiO₂ em relação à massa do ligante e com substituição parcial de 30% de cimento Portland por cinzas volantes apresentam uma elevada resistência mecânica (C55/C67) e uma elevada durabilidade.

PALAVRAS-CHAVE

TiO₂, betões de elevado desempenho, resistência à compressão, absorção de água, ataque químico

ABSTRACT

The production of the primary constituent of concrete, Portland cement, represents about 80 % of total CO₂ emissions of the concrete which in turn corresponds to about 6-7 % of CO₂ emissions on the planet.

In 1980, Roger Lacroix provide the first description of high-performance concrete, which concrete compositions classified according to three different characteristics: high strength, high workability and high durability (high performance concretes). The reasons for the use of high performance concretes are to improve durability, reduce maintenance costs, repair and replacement in the long term.

The objective of this dissertation is the use of nanoparticle TiO₂ to obtain high performance concrete, verify if the TiO₂ contributes to increasing the pozzolanic reaction, evaluate the mechanical characteristics and durability of concrete with the incorporation of nanoparticle TiO₂ and also the concrete with the incorporation of fly ash and nanoparticle TiO₂.

This dissertation presents results on lowering, the compressive strength, water absorption by immersion, water absorption by capillarity, diffusion of chlorides by migration under non-stationary, attack by sulfuric acid, ultrasonic and electrical resistivity of concrete in which used a water / binder ratio of 0.35 in concrete with TiO₂ and 0.325 for concrete with fly ash.

The experimental research results show that concrete with increasing percentages of TiO₂ nanoparticles exhibit reduced durability. The results showed a concrete with 1% TiO₂ nanoparticles in the mass of the binder and 30% partial replacement of Portland cement by fly ash present a high mechanical strength (C55/C67) and a high durability.

KEYWORDS

TiO₂, high-performance concretes, compressive strength, water absorption, chemical attack

Índice

Agradecimentos	III
Resumo	V
ABSTRACT.....	VII
Índice	IX
Índice de figuras.....	XIII
Índice de quadros	XVII
1. Introdução.....	1
1.1. Aspetos gerais	1
1.2. Objetivo do trabalho	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Estado da arte	3
2.1. Evolução do betão.....	3
2.2. Betões de elevado desempenho	4
2.3. Métodos de composição de betões de elevado desempenho	5
2.3.1 Métodos analíticos.....	5
2.3.2 Métodos experimentais	5
2.4. Fabrico, transporte e controlo	7
2.4.1. Processo de fabrico e tipo de betoneira	7
2.4.2. Transporte e colocação em obra	8
2.4.3. Controlo no estado fresco	9
2.4.4. Controlo no endurecimento.....	10
2.4.5. Controlo no estado endurecido.....	10
2.5. Nanotecnologia	11
2.6. Nano-partículas utilizadas para obtenção de betões de elevado desempenho.....	13
2.6.1. Nanosílica.....	13

2.6.2. Nanotitânia	15
2.6.3. Nano-partículas de Óxido de Ferro	17
2.6.4. Nano-Alumina.....	18
2.7. Lixiviação do hidróxido de cálcio	19
2.8. Problemas da dispersão das nano-partículas.	19
3. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E ENSAIOS	21
3.1. Materiais	21
3.1.1. Agregados	21
3.1.2. Cimento Portland.....	24
3.1.3. Cinzas Volantes.....	25
3.1.4. Água	27
3.1.5. Superplastificante	27
3.1.6. Nanotitânia.....	28
3.2. Composições	29
3.2.1 Composição de referência.....	32
3.2.2 Composição com dióxido de titânio	32
3.2.3 Composição com cinzas volantes.....	34
3.2.4 Composição com cinzas volantes e dióxido de titânio	35
3.3. Ensaio no Betão	35
3.3.1. Amassadura.....	36
3.3.2. Comportamento do betão fresco	37
3.3.3. Moldagem, conservação, tipo e dimensões dos provetes	38
3.3.4. Resistência à Compressão.....	40
3.3.5. Absorção de água por imersão	41
3.3.6. Absorção de água por capilaridade	42
3.3.7. Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário	44
3.3.8. Ataque químico	48

3.3.9. Ultra sons	51
3.3.10. Resistividade elétrica	52
4. Análise de resultados.....	55
4.1. Ensaio de abaixamento.....	55
4.2. Resistência à Compressão	56
4.2.1. Betão de referência (BR)	57
4.2.2. Composições com dióxido de titânio.....	58
4.2.3. Composições com cinzas volantes	59
4.2.3. Composições com cinzas volantes e dióxido de titânio.....	60
4.3. Absorção de água por imersão.....	62
4.4. Absorção de água por capilaridade	64
4.5. Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário	68
4.6. Ataque químico.....	71
4.6.1 Composição de referência.....	72
4.6.2 Composições com dióxido de titânio.....	73
4.6.3 Composição com cinzas volantes.....	75
4.6.4 Composição com cinzas volantes e dióxido de titânio	76
4.7. Ultra sons.....	79
4.8. Resistividade elétrica	82
5. Conclusão.....	85
5.1. Trabalhos futuros	87
Bibliografia	89
Anexos.....	95
Anexo 1 Resistência a compressão.....	96
Anexo 2 Absorção de água por imersão	97
Anexo 3 Absorção de água por capilaridade composição BR	98
Anexo 4 Absorção de água por capilaridade composição BR, continuação	99

Anexo 5 Absorção de água por capilaridade composição B 30%CV	100
Anexo 6 Absorção de água por capilaridade composição B 30%CV, continuação.....	101
Anexo 7 Absorção de água por capilaridade composição B 30%CV+1%TiO ₂	102
Anexo 8 Absorção de água por capilaridade composição B 30%CV+1%TiO ₂ , continuação	103
Anexo 9 Absorção de água por capilaridade composição B 1%TiO ₂	104
Anexo 10 Absorção de água por capilaridade composição B 1%TiO ₂ , continuação...	105
Anexo 11 Absorção de água por capilaridade composição B 2%TiO ₂	106
Anexo 12 Absorção de água por capilaridade composição B 2%TiO ₂ , continuação...	107
Anexo 13 Absorção de água por capilaridade composição B 3%TiO ₂	108
Anexo 14 Absorção de água por capilaridade composição B 3%TiO ₂ , continuação...	109
Anexo 15 Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário.....	110
Anexo 16 Ataque químico	111
Anexo 17 Ataque químico, continuação.....	112
Anexo 18 Ataque químico, continuação.....	113
Anexo 19 Ultra Sons.....	114
Anexo 20 Resistividade elétrica	115

Índice de figuras

Figura 1 - Abordagens "top-down" e "bottom-up" em nanotecnologia. Adaptação de [19,20].....	12
Figura 2 - O tamanho das partículas e a área de superfície específica relacionada com materiais de betão [18]	12
Figura 3 - Nano-esferas de SiO ₂ com distribuição uniforme observadas usando TEM [22].	13
Figura 4 - Resistência à compressão de argamassas de cimento com dosagem diferente de nano-SiO ₂ (NS) e nano-Fe ₂ O ₃ (NF) vs argamassas de referência cimento Portland e sílica ativa (SF. Adaptado [22].	14
Figura 5 - Fotografia de amostras de TiO ₂	15
Figura 6 - Reação fotocatalítica do nano-TiO ₂	16
Figura 7 - Fotografia Nano_Fe ₂ O ₃ em diferentes cores.....	17
Figura 8 - Nano-Al ₂ O ₃	18
Figura 9 - Brita 4/8 mm	22
Figura 10 – Areia 0/4 mm.....	22
Figura 11 – Curva granulométrica dos agregados.....	24
Figura 12 – Imagem microscópica ampliada a 200.000 vezes do TiO ₂	29
Figura 13 - Variação da fluidez com a quantidade de superplastificante na pasta de cimento (V=300 mml)	31
Figura 14 - Diagrama das composições com Dióxido de Titânio	33
Figura 15 - Diagrama das composições com cinzas volantes.....	34
Figura 16 - Diagrama das composições com cinzas volantes e dióxido de titânio	35
Figura 17 – Betoneira	36
Figura 18 - Equipamentos necessários para a realização ensaio abaixamento	37
Figura 19 – Pormenorização Cone de Abrams	37
Figura 20 – Molde de provetes cúbicos (100x100x100) (mm ³).....	39
Figura 21 - Molde de provetes cúbicos (150x150x150) (mm ³)	39
Figura 22 – Molde provetes cilíndricos (Ø100xH200) (mm ³).....	39
Figura 23 – Prensa para resistência à compressão	40
Figura 24 - Provetes no tabuleiro durante ensaio de absorção de água por capilaridade ..	44
Figura 25 – Esquema do corte das rodela do provete cilíndrico (Ø100xH200) (mm ³) ..	44

Figura 26 – Provete de betão no suporte plástico no reservatório catódico.....	47
Figura 27 – Metade de um provete cilíndrico ($\varnothing 100 \times H 50$) (mm ³), com divisão marcada para a medição da profundidade	48
Figura 28 – Medição da profundidade da penetração de cloretos com paquímetro digital.....	48
Figura 29 – Provete dentro do recipiente emergidos numa solução de 10 % ácido sulfúrico.....	50
Figura 30 – Transmissão direta.....	51
Figura 31 – Transmissão semi-direta	51
Figura 32 – Medição da resistividade elétrica num provete cilíndrico	53
Figura 33 – Colocação do provete para medição da resistividade elétrica num provete cilíndrico.....	53
Figura 34 - Abaixamento obtido para cada composição	56
Figura 35 – Resistência à compressão do betão de referência	57
Figura 36- Resistência à compressão do betão com TiO ₂	58
Figura 37 - Resistência à compressão do betão com cinza volante	59
Figura 38 - Resistência à compressão do betão com 30% cinzas volante e 1% TiO ₂	60
Figura 39 - Resistência à compressão de todas as composições	61
Figura 40 - Resultados da absorção de água por imersão de todas as composições.....	63
Figura 41 - Absorção de água por capilaridade de todas as composições	65
Figura 42 Coeficiente de absorção de água por capilaridade de todas as composições ...	66
Figura 43 – Ensaio de absorção de água por capilaridade de todas as composições para os tempos, 60 minutos, 90 minutos, 180 minutos, 24 horas e 72 horas	67
Figura 44 – Amostras de todas as composições relativamente à penetração de cloretos do ensaio de difusão.....	69
Figura 45 - Resultados difusão de cloretos de todas as composições.....	70
Figura 46 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição de referência	72
Figura 47 - Resultados do ensaio de ataque químico das composições com dióxido de titânio.....	73
Figura 48 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volantes	75
Figura 49 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volante e dióxido de titânio	77
Figura 50 - Resultados do ensaio de ataque químico de todas as composições	78

Figura 51 - Resultados do ensaio ultra sons por transmissão direta de todas as composições.....	80
Figura 52 - Resultados do ensaio ultra sons por transmissão semi-direta de todas as composições.....	82
Figura 53 - Resultados da resistividade elétrica de todas as composições.....	83

Índice de quadros

Quadro 1 – Características dos agregados	23
Quadro 2 – Distribuição granulométrica da areia e da brita	23
Quadro 3 - Características Químicas.....	25
Quadro 4 – Características Mecânicas	25
Quadro 5 – Características Físicas	25
Quadro 6 – Caraterísticas das Cinzas Volantes	26
Quadro 7 – Caraterísticas Glenium Sky 617	27
Quadro 8 – Caraterísticas Físicas e Químicas do Aeroxide TiO ₂ P25	28
Quadro 9 – Influência da dosagem do SP no tempo de fluidez	31
Quadro 10 - Composição do betão de referência por m ³ de betão.....	32
Quadro 11 - Composições do betão com Dióxido de Titânio por m ³ de betão	34
Quadro 12 - Composição do betão com cinzas volantes por m ³ de betão.....	34
Quadro 13 – Composição do betão com cinzas volantes e dióxido de titânio por m ³ de betão	35
Quadro 14 – Propriedades do Ácido Sulfúrico	49
Quadro 15 – Quantidades dos constituintes e abaixamento obtido para cada composição	55
Quadro 16 – Dados resistência à compressão do betão de referência.....	57
Quadro 17 - Dados resistência à compressão do betão com dióxido de titânio.....	58
Quadro 18 - Dados resistência à compressão do betão com cinzas volantes	59
Quadro 19 - Dados resistência à compressão do betão com cinzas volantes e dióxido de titânio	60
Quadro 20 - Dados resistência à compressão de todas as composições.....	62
Quadro 21 – Resultados da absorção de água por imersão de todas as composições.....	63
Quadro 22 - Absorção de água por capilaridade de todas as composições	65
Quadro 23 – Resultados difusão de cloretos de todas as composições	69
Quadro 24 - Resistência à penetração de cloretos baseada nos resultados do ensaio NT Build 492	71
Quadro 25 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição de referência.....	72

Quadro 26 – Amostras do ensaio de ataque químico da composição de referência	72
Quadro 27 - Resultados do ensaio de ataque químico das composições com dióxido de titânio	73
Quadro 28 - Amostras do ensaio de ataque químico das composições com dióxido de titânio	74
Quadro 29 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volantes	75
Quadro 30 - Amostras do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volantes	76
Quadro 31 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volante e dióxido de titânio	76
Quadro 32 - Amostras do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volantes e dióxido de titânio	77
Quadro 33 – Resultados do ensaio ultra sons por transmissão direta de todas as composições.....	79
Quadro 34 - Resultados do ensaio ultra sons por transmissão semi-direta de todas as composições.....	81
Quadro 35 – Resultados da resistividade elétrica de todas as composições	83
Quadro 36 - Risco de corrosão de acordo com a resistividade do betão.....	84

1. Introdução

1.1. Aspetos gerais

A indústria do betão é uma das responsáveis pela degradação ambiental e o betão é o material de construção mais usado no Planeta. A produção deste material, atualmente atinge cerca de 10 km³/ano [1].

A produção do principal constituinte do betão, o cimento Portland, representa cerca de 80% das emissões totais de CO₂ do betão o que por sua vez corresponde, a cerca de 6-7% das emissões de CO₂ [2,3] no Planeta. A procura de cimento Portland deverá aumentar quase 200% até 2050 [3].

Torna-se assim urgente encontrar formas de minimizar o impacto ambiental do betão. Por exemplo, produzindo betões de elevado desempenho que tem maior durabilidade e logo menor impacto ambiental. De acordo com as estatísticas da ERMCO [4] a produção de betão pronto centra-se esmagadoramente nas classes de resistência C25/30 e C30/37. Apenas 11% respeitam a classes de resistência elevada.

Atualmente, só em estruturas de grande envergadura é que se recorre ao uso de betões de elevado desempenho, já que se tratam de estruturas de elevado custo e sujeitas a ambientes mais agressivos. Como tal, o uso betões de elevado desempenho deve-se ao facto de estes requererem menos operações de manutenção e de conservação comparativamente com os betões tradicionais que requerem frequentes operações de manutenção, conservação ou mesmo toda a sua substituição. Assim, a utilização de betões de elevado desempenho, sendo estes mais resistentes e mais duráveis, possibilita a execução de estruturas com menor consumo de aço, menor consumo de betão, permitem a sua colocação em serviço em prazos mais curtos. Apresentam, ainda, a vantagem de terem uma vida útil superior e consequentemente um menor impacto ambiental [5].

1.2. Objetivo do trabalho

Os objetivos desta dissertação são:

- Utilização de nano-partículas para obtenção de betões de elevado desempenho;
- Verificar se as nano-partículas de TiO_2 contribuem para o aumento da reação pozolânica;
- Avaliação das características mecânicas do betão com a incorporação de nano-partículas de TiO_2 e também do betão com a incorporação de cinzas volantes e nano-partículas de TiO_2 , através do ensaio de resistência à compressão e o ensaio de abaixamento;
- Avaliação da durabilidade do betão com a incorporação de nano-partículas de TiO_2 e também do betão com a incorporação de cinzas volantes e TiO_2 , através do ensaio de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário, ataque químico, ultra sons e resistividade elétrica.

1.3. Estrutura da dissertação

Neste capítulo são apresentados os 7 capítulos elaborados ao longo da dissertação, sendo abordados de forma breve.

No capítulo 1 é descrito os objetivos e o enquadramento desta dissertação.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte sobre a utilização de nano-partículas para obtenção de betões de elevado desempenho, sendo abordada a evolução do betão, os betões de elevado desempenho, os métodos de composição de betões de elevado desempenho, fabrico, o transporte e controlo do betão, nanotecnologia, nano-partículas utilizadas para a obtenção de betões de elevado desempenho, lixiviação do hidróxido de cálcio e o problema da dispersão das nano-partículas.

No capítulo 3 é apresentada uma descrição dos materiais utilizados nesta dissertação, as composições estudadas e a descrição dos ensaios realizados.

No capítulo 4 são expostos os resultados obtidos e procede-se à sua análise.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões desta dissertação bem como as propostas de futuros trabalhos como seguimento desta.

2. Estado da arte

2.1. Evolução do betão

Com a invenção do betão armado em 1848 por Lambot foi possível mudar o rumo à construção do século XX, tornando-se atualmente o material mais usado na construção [3].

A utilização do betão na construção deve-se principalmente à grande facilidade de moldagem de elementos mais ao menos complexos, ao baixo custo dos materiais e processos utilizados. O betão manteve-se aproximadamente num século como um material composto quase exclusivamente por uma mistura de agregados, cimento e água. Mas devido à complexidade das estruturas, às exigências ambientais, tornou-se necessário assegurar a durabilidade e resistência do betão, como tal os materiais constituintes do betão têm que lhe conferir tais características. Por esse motivo, tornou-se necessária a evolução desses materiais e mesmo até a utilização de materiais mais inovadores.

Em 1991, Mehta referiu que a maioria das evoluções surgidas não foi resultado direto da necessidade de aumentar a durabilidade do material [6]. As principais evoluções registadas, com mais impacto na durabilidade e na composição dos betões, foram os melhoramentos tecnológicos do cimento Portland, a implementação de novas tecnologias com a utilização de betão pronto, o aparecimento de adjuvantes introdutórios de ar, redutores de água de alta gama (superplastificantes) e também as evoluções verificadas na aplicação de adições minerais.

Nos últimos quarenta anos o cimento Portland evoluiu muito quanto à sua composição e finura. Nos EUA o conteúdo de silicato tricácico, C_3S , de um cimento Portland tipo I aumentou em cerca de 30%, valor típico de 1950, para valores entre os 45% a 50% em 1970, 56% em 1998 [7]. No mesmo período de tempo a finura do cimento sofreu um acréscimo de 100 para 400 m^2/kg . Devido o aumento de C_3S e ao aumento da finura, a hidratação do cimento Portland moderno é mais rápida, permitindo assim, obter betões com uma resistência à compressão semelhantes e com uma menor quantidade de cimento e maior razão A/L. Mas não existem só vantagens, também podem surgir problemas associados à retração por secagem e ao calor de hidratação, afetando a durabilidade do material.

Foi através do uso de superplastificantes que se verificou a maior evolução na melhoria das características do betão, sendo a quantidade destes “controladores” da trabalhabilidade.

As adições minerais foram usadas no betão com o objetivo de reduzir o calor de hidratação e melhorar a resistência, trabalhabilidade, durabilidade e permitindo, também, a reutilização de subprodutos industriais [8].

2.2. Betões de elevado desempenho

A designação de betões de elevado desempenho surgiu em 1980 por Roger Lacroix, que classificaram composições de betão em três características diferentes: alta resistência, elevada trabalhabilidade e elevada durabilidade (Betões de elevado desempenho) [3].

O betão de elevado desempenho é fabricado com uma seleção cuidada e rigorosa de materiais de qualidade. A sua composição tem que ser obtida através de métodos que otimizem a compacidade da sua mistura, na escolha correta do processo de fabrico e o tipo de betoneira, na escolha de transporte e a forma como é transportada bem como os métodos de colocação em obra, um controlo rigoroso do betão no estado fresco, no controlo do endurecimento e no estado endurecido.

O betão de elevado desempenho tem uma razão A/L muito reduzida, inferior a 0,4, tendo necessidade de ter a adição de um adjuvante redutor de água de alta gama (superplastificante).

As razões que levam ao uso dos betões de elevado desempenho consistem na melhoria da durabilidade, na redução dos custos de manutenção, reparação e substituição a longo prazo. O betão de elevado desempenho apresenta uma elevada resistência inicial, propriedades mecânicas a longo prazo, permeabilidade, densidade, calor de hidratação, tenacidade, estabilidade volumétrica e, por último, o elevado período de vida útil em ambientes agressivos. Estas questões abrangem a grande temática atual “Construção Sustentável” construções com custos de manutenção menores, períodos de vida útil maiores e com o menor impacto no ambiente.

2.3. Métodos de composição de betões de elevado desempenho

Já foram propostos vários métodos para o cálculo das percentagens dos componentes de betões de elevado desempenho. Alguns desses métodos são inclusivamente, comercializados sob forma de ferramentas informáticas [9].

2.3.1 Métodos analíticos

De Larrard et al. [10] apud [9] propuseram um método de composição de betões de alta resistência na qual a resistência é expressa em função da quantidade e qualidade dos componentes. Apresenta uma fórmula idêntica à de Renê Feret, mas com alguns ajustes devido à introdução de sílica de fumo e superplastificante.

2.3.2 Métodos experimentais

Aïtcin et al. [11] apud [9] propõe um procedimento que se baseia no cumprimento dos seguintes aspetos:

- Graduação da resistência – de 60 a 120 MPa;
- Máxima dimensão dos agregados - de 10 a 15 mm;
- Trabalhabilidade – Abaixamento de 20 a 25 cm;
- Ar incluído – assume um valor de 2% que pode ser revisto para 5% ou 6% quando forem usados introdutores de ar;
- Volume de agregados – assume um valor ótimo 65% do volume do betão;
- Relação A/C – ajustada através do cone de *Abrams*;

Após o cumprimento destes aspetos iniciais, propõem os seguintes passos:

- Passo 1 – Determinação da resistência: uma tabela fornece uma gama de resistência, aos 28 dias, entre 60 e os 120 MPa;
- Passo 2 – Razão água /cimento: especificada em função da resistência;

- Passo 3 – Seleção do aglomerante: assume-se 35% de pasta em relação ao volume total do betão; para a gama de resistências propostas é admissível não utilizar adições minerais ou substituir o cimento em 25% por escórias de alto forno ou 10% de sílicas de fumo;
- Passo 4 – Quantidade de agregados: assume como valor ótimo 65% do volume do betão; indica valores para a quantidade de finos;
- Passo 5 – Peso final da mistura: indica valores de referência para os componentes;
- Passo 6 – Percentagem de superplastificantes: recomenda iniciar o estudo com 1%;
- Passo 7 – Ajuste da quantidade da água: a água da mistura deve ser subtraída da água contida no superplastificante e da humidade dos componentes;
- Passo 8 - Ajuste por tentativas.

Cánovas e Alaejos [12] apud [9] fazem uma série de considerações da forma como se executam betões de elevado desempenho, sem prescindir de ensaios de ajuste, das quais se destacam:

- Relação A/C – fator mais importante a ter em conta para se conseguir obter altas gamas de resistência. Para resistências à compressão superior a 50 MPa, A/C <0,4, normalmente 0,35. Para resistência à volta 100 MPa, A/C < 0,3;
- Tamanho máximo do agregado – os agregados devem ser pequenos de forma a que as superfícies de contacto pasta- agregados sejam o maior possível e assim aumentar a aderência. Diâmetros mais usados são de 12 a 14mm,
- Quanto ao tipo de cimento:
 - Produção de uma argamassa de alta resistência com cimento tipo I 45 ou I 55;
 - Cimento de composição uniforme;
 - De forma a atingir uma resistência da ordem dos 100 MPa, o cimento I 45 deve ser incorporado em maior quantidade e o I 55 por este ser mais fino, é necessário maior atenção à efetividade e compatibilidade do superplastificante;

- Consumo de cimento é da ordem dos 400 a 500 kg/m³;
- Agregados – Agregado grosso proveniente da britagem e com boa resistência e o agregado fino rolado e com um módulo de finura na ordem de 3;
- Adições minerais – 5 a 10% no caso da sílica de fumo e até 25% no caso das cinzas volantes, do volume do ligante;
- Adjuvante (superplastificante) – necessidade de estudos para cada tipo.

Mindess [13] apud [9] referem que os betões de elevado desempenho podem ser modelados com um material composto por três fases e cada uma das fases deve ser otimizada.

- Pasta de cimento endurecida;
- Agregados;
- Interface entre a pasta de cimento endurecida e os agregados.

2.4. Fabrico, transporte e controlo

2.4.1. Processo de fabrico e tipo de betoneira

Não existe uma unanimidade quando ao melhor procedimento do fabrico das amassaduras de betões de elevado desempenho, havendo várias propostas quanto à sequência de introdução dos componentes, tempo de mistura e os vários tipos de betoneiras utilizadas [9].

Existem dois tipos de procedimento referentes ao tipo de mistura:

- Um desses procedimentos é que a amassadura pode ser obtida em qualquer betoneira mecânica e adotando os procedimentos de mistura dos betões convencionais.
- O outro procedimento já é diferente das convencionais. O ACI Committe 363 [14] apud [9], recomenda a implementação da completa homogeneização dos componentes da mistura, de preferência através de betoneiras de alta velocidade.

2.4.2. Transporte e colocação em obra

Nos dias de hoje o fabrico do betão em centrais próprias e o posterior transporte em camiões betoneira até á obra tem sido mais corrente, pelo motivo de apresentarem a vantagem de ser mais económico e possibilitar o melhor controlo de qualidade. A vantagem de ser mais económico deve-se ao facto de já não haver a necessidade de instalações de grandes equipamentos em obra.

O problema deste procedimento é o que pode ocorrer desde as centrais até à obra, tal como:

- O tempo - necessário tomar medidas adequadas de forma a que o tempo de transporte não comprometa certas propriedades, principalmente a trabalhabilidade;

O transporte do betão em camião pode ser realizado de três formas:

- Introduzir os componentes no camião e a mistura é realizada durante o transporte, parando o tambor quando o camião está próximo ou mesmo já na obra;
- A amassadura é realizada primeiro na central e só depois é que é introduzida no camião e levando-a até à obra com a câmara a rodar;
- Introduzir no tambor do camião todos os componentes à exceção da água, fazendo o transporte em seco e introduzindo a água já próximo ou mesmo no local da obra.

Esta última hipótese parece ser a mais adequada para betões de elevado desempenho, uma vez que a perda de trabalhabilidade pode comprometer a betonagem em boas condições. Mas este procedimento tem a desvantagem da possibilidade de que a humidade contida nos agregados, e que deve ser subtraída à quantidade de água introduzida na amassadura, produza uma hidratação parcial do cimento durante o trajeto [9].

2.4.3. Controlo no estado fresco

Nos betões de elevado desempenho é muito importante conhecer a sua reologia, capacidade e forma de manipulação, e viabilidade ou facilidade de compactação [9]. O comportamento reológico dos betões de elevado desempenho difere muitos dos betões convencionais, apresentando no estado fresco elevada coesão e viscosidade, apesar de a sua consistência poder ser plástica e fluida, devido à incorporação dos superplastificantes. A junção destes fatores com a perda da trabalhabilidade com o tempo, dificuldades da sua colocação em obra por bombagem e a incompatibilidade entre o cimento e superplastificantes contribui para um problema difícil de resolver [9].

Os estudos reológicos baseiam-se essencialmente em ensaios de medição da trabalhabilidade ou consistência dos betões através do cone de *Abrams* realizados em obra ou em laboratório, apresentado a desvantagem de não ser muito fiável para abaixamentos superiores a 20 cm, mas para betões de elevado desempenho é raro acontecer.

Segundo Badu et al [15] apud [9], estão em curso investigações que possam levar ao desenvolvimento de outros métodos e aparelhos de ensaio de forma a medirem com maior rigor o comportamento reológico e respetiva trabalhabilidade dos betões de elevado desempenho, onde o modelo mais avançado é baseado no modelo de Bingham que consiste na determinação da coesão e da viscosidade, mas é estabelecida para uma situação de ensaio bem definida. As equações do modelo de Bingham apresentam-se a seguir:

$$\bullet \quad \tau = \tau_0 + \mu_p \times \gamma; \quad (1)$$

$$\bullet \quad T = g + h \times N; \quad (2)$$

Onde:

T = torsor de uma velocidade angular N ;

H = inclinação da reta que mede a fluidez ou mobilidade da mistura;

$1/h$ = viscosidade plástica da mistura;

g = torsor inicial de uma velocidade igual a zero = coesão.

Este modelo parece ser mais adequado para o estabelecimento do comportamento reológico dos betões de elevado desempenho, devido à sua sensibilidade aos aspetos da coesão e

viscosidade. Estes ensaios podem ser realizados pelos equipamentos reómetro ou viscómetro, ou por equipamentos de medição da velocidade angular e de medição de potência nas betoneiras. Sendo necessário para este último caso a realização de várias amassaduras de aferição.

Quanto à amassadura de elevada fluidez, alguns autores Aïtcin et al. [11], De Larrard. et al [9] e Cánovas e Alaejos [12] apud [9], referem que a adequada compactação por vibração ajuda na remoção das bolhas de ar presas nos capilares, muitas vezes causadas pelo uso de superplastificantes, obtendo assim uma distribuição uniforme dos materiais componentes.

2.4.4. Controlo no endurecimento

Para obter um betão de elevado desempenho é fundamental assegurar a sua cura seja realizada corretamente. O potencial de resistência e as restantes propriedades requeridas só se desenvolvem caso o processo de cura seja realizado de forma adequada, com as condições de humidade e temperatura recomendáveis durante um período de tempo pré estabelecido [9].

Para betões de elevado desempenho a cura mais apropriada é aquela que proporcione água em abundância de uma forma permanente, devido á baixa relação A/C dos betões de elevado desempenho, correndo o risco de não se realizar na totalidade a reação de hidratação. Mas existe outro problema, a evaporação de água através da superfície do betão, causando elevadas pressões capilares que conduzem a uma retração plástica que irá provocar fissuras que podem propagar-se até ao interior dos elementos. Para evitar este problema De Larrard. et al [10] sugerem a cura do betão mantendo as superfícies molhadas com água ou com a utilização de um produto de cura de boa qualidade.

2.4.5. Controlo no estado endurecido

Durante o processo de cura existe a necessidade de verificar se o betão satisfaz as condições para o qual foi projetado, fundamentalmente para as idades de referência ou noutras dependentes da rapidez do processo construtivo. Para a verificação das condições para o

qual o betão foi projetado é necessário realizar ensaios de verificação de resistência à compressão, tração, desgaste e durabilidade. Sendo estes ensaios realizados a diversas idades, fazendo posteriormente a avaliação da evolução do desempenho [9].

É de salientar que o único ensaio em que é necessário apresentar algumas considerações nos seus procedimentos é o ensaio da resistência à compressão, uma vez que se trata de betões de elevado desempenho, os restantes ensaios pode-se utilizar procedimentos usados em betões convencionais. Na determinação da capacidade de resistência à compressão uniaxial dos betões temos necessidade de ter em atenção os seguintes aspetos:

- A forma e dimensão dos provetes a ensaiar;
- O estado das superfícies de contacto dos provetes com os pratos da prensa;
- O tipo e características do equipamento de carga.

2.5. Nanotecnologia

Em 1959, Richard Feynman, vencedor de dois prémios Nobel, sugeriu que seria possível a manipulação átomo a átomo mostrando que não havia qualquer razão física que impedisse tal proeza. Mas foi em 1981, com a criação do microscópio de varredura por tunelamento (STM) pelos pesquisadores da IBM, que foi possível obter imagens de nanoestruturas assim como a sua manipulação [16]. A nanotecnologia envolve o estudo em escala nanoscópica ($1\text{nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$). De maneira a ter um ponto de comparação, um cabelo tem uma espessura de 80.000 nm. As nano-partículas podem ser concebidas por dois métodos, através da síntese de processos químicos ou através de uma elevada energia de moagem [17,18].

No processo químico, usa-se a abordagem “bottom-up” conhecido como “nanotecnologia molecular” ou “manufatura molecular”, onde basicamente faz-se a construção da estrutura átomo a átomo, por um processo de montagem ou automontagem. A síntese química é utilizada para obter matérias-primas em que são utilizadas moléculas ou partículas nano. No processo onde se faz a moagem, é usada a abordagem “top-down”, que baseia na utilização de um bloco sólido e este é reduzido a uma nano escala, mantendo as suas propriedades originais [19, 20]. Na figura 1 pode-se ver a ilustração das abordagens "top-down" e "bottom-up" em nanotecnologia.

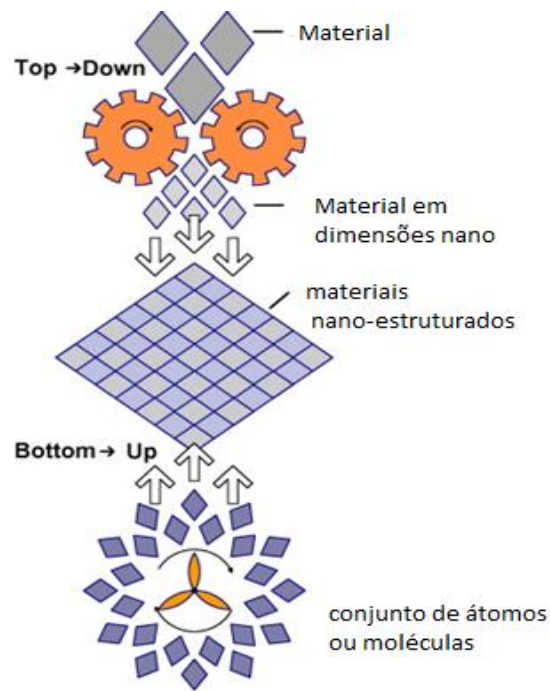


Figura 1 - Abordagens "top-down" e "bottom-up" em nanotecnologia. Adaptação de [19,20].

A vantagem da utilização das nano-partículas é que estas apresentam uma elevada razão superfície específica por volume (Figura 2) e também à elevada reatividade que estas apresentam permitindo comportarem-se como centros de nucleação [17].

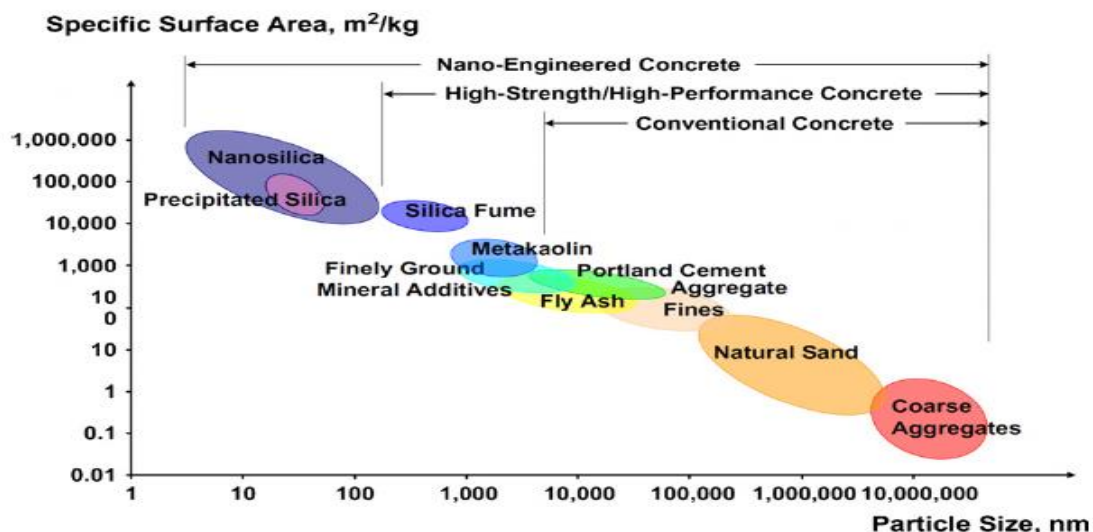


Figura 2 - O tamanho das partículas e a área de superfície específica relacionada com materiais constituintes do betão [18]

2.6. Nano-partículas utilizadas para obtenção de betões de elevado desempenho

Segundo Zu W et al [21] apud Pacheco-Torgal et al [18] uma das áreas referidas no relatório RILEM TC 197-NCM “Nanotechnology in construction materials” elaborado por Antonio Porro em 2004 é a utilização de nano-partículas com vista à obtenção de betões de elevado desempenho.

Muitas das investigações referentes à obtenção de betões de elevado desempenho recorrem a nano-partículas como a nano sílica (nano-SiO₂) e nano titânia (TiO₂), apesar de já terem sido utilizadas nano-partículas de Fe₂O₃. [20] e nano alumina (nano-Al₂O₃) [23].

2.6.1. Nanosílica

A nanosilica (nano-SiO₂) (Figura 3) foi utilizada para melhorar a trabalhabilidade, resistência mecânica, resistência à penetração da água e controlar a lixiviação do cálcio.

A nano-SiO₂ pode ser obtida por processo bottom-up.

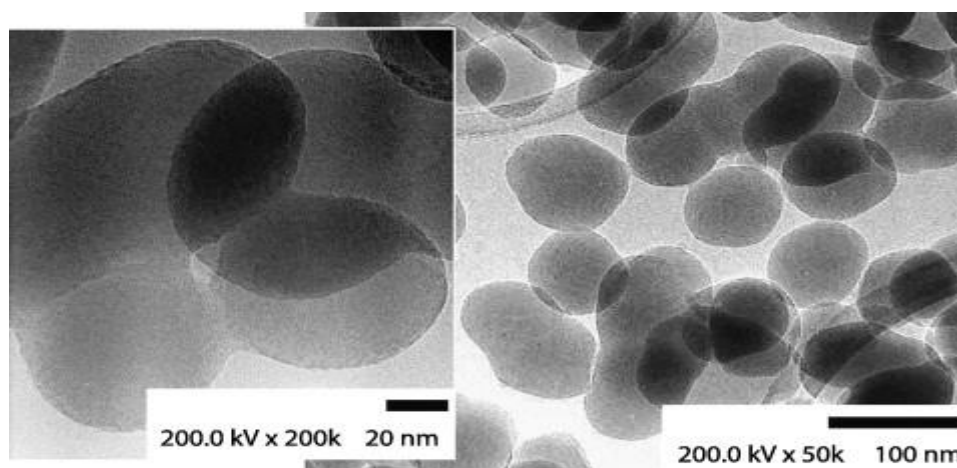


Figura 3 - Nano-esferas de SiO₂ com distribuição uniforme observadas usando TEM [22].

Li et al [24] (Figura 4) referem que a utilização de nano-SiO₂ contribui para aumentar a resistência à compressão da argamassa de cimento. Ao adicionar 10% de nano-SiO₂ com agentes de dispersão, a resistência à compressão da argamassa de cimento aumentou em 26% aos 28 dias em comparação com a adição de sílica de fumos que apenas aumentou em 15% a resistência à compressão (Figura 3).

Sobolev et al [25] observaram, com uma adição de apenas de 0,25% de nano-SiO₂, há um melhoramento de 10% na resistência à compressão aos 28 dias e 25% na resistência à flexão.

Jo et al [26] concluíram que a nano-SiO₂ comporta-se como um material de enchimento que melhora a microestrutura e também como um ativador que promove as reações pozolânicas.

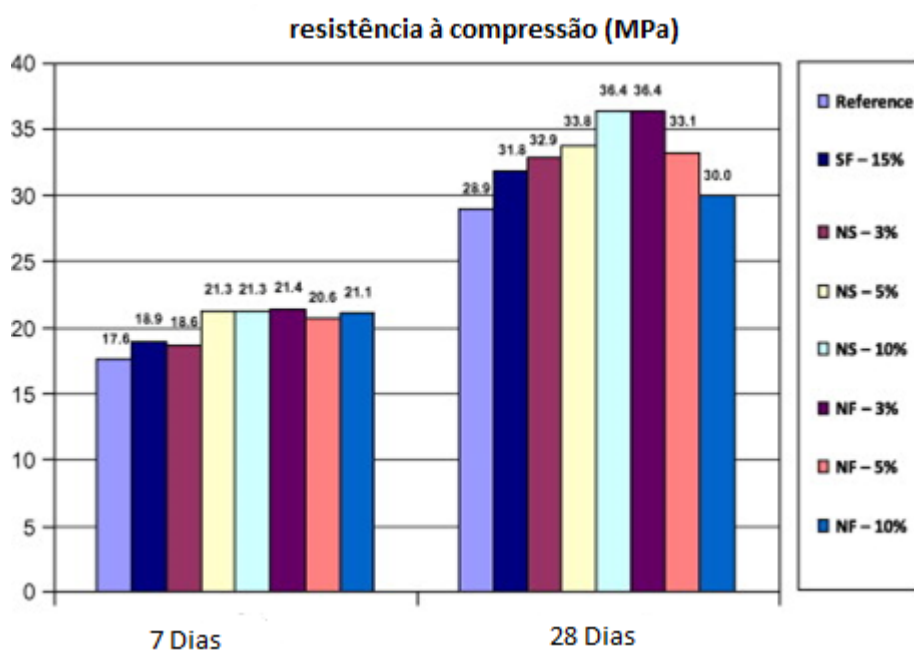


Figura 4 - Resistência à compressão de argamassas de cimento com dosagem diferente de nano-SiO₂ (NS) e nano-Fe₂O₃ (NF) vs argamassas de referência cimento Portland e sílica ativa (SF). Adaptado [22].

Ji et al [27] observaram através do ensaio de permeabilidade à água, que ao utilizar nano-SiO₂ o betão apresenta uma menor permeabilidade à água comparativamente ao betão

normal e que o teste ESEM revela que a microestrutura do betão com nano-SiO₂ é mais uniforme e compacta do que a do betão normal.

Gaitero et al [28] observaram que a utilização de nano-SiO₂ modifica a pasta de cimento em três maneiras:

- Redução da porosidade;

A redução da porosidade vai tornar mais difícil a entrada da solução agressiva.

- Transforma o cimento Portland em gel CSH pela reação pozolânica;

A reação pozolânica transforma o hidróxido de cálcio, sendo este mais suscetível à lixiviação de cálcio, em gel C-S-H que melhora os desempenhos mecânicos tornando a pasta de cimento mais resistente aos ataques químicos.

- Modifica a estrutura interna do gel CSH aumentando o comprimento médio de cadeias de silicato.

A modificação da estrutura interna do gel para mais cadeias de silicato de cálcio vai aumentar a estabilização.

2.6.2. Nanotitânia

Betões com nano dióxido de titânio (TiO₂) (Figura 5 e 6) apresentam grandes benefícios ambientais já que a nano-TiO₂ tem propriedades fotocatalíticas, que consequentemente acarreta propriedades de auto-limpeza e de despoluição (Figura 6) [22].



Figura 5 - Fotografia de amostras de TiO₂.



Figura 6 - Reação fotocatalítica do nano-TiO₂

Li et al [29,30] constataram que a resistência à abrasão está interligada com a resistência à compressão. Ao utilizar nano-partículas de TiO₂ no betão vai aumentar a resistência à compressão que consequentemente vai melhorar a resistência à abrasão, Estas duas referências apresentam uma relação linear.

Li et al [29] referem que o grau de reforço da resistência à abrasão do betão que contém nano-partículas diminui com o aumento do teor de nano-partículas e que utilizando nano-partículas de TiO₂ no betão a resistência à abrasão do betão vai ser melhor do que os betões com a mesma quantidade de nano-SiO₂.

Khoshakhlagh et al [31] apud Pacheco-Torgal [17] observaram que ao utilizar 4% de nano-TiO₂ por massa de cimento e a substituição de 45% de cimento por escória de alto-forno há uma redução da permeabilidade no betão.

Valle et al [32], Murata et al [33] apud [22] referem que as nano-partículas de TiO₂ por ter propriedades fotocatalíticas vai "desencadear uma degradação fotocatalítica de poluentes, como NO_x, monóxido de carbono, VOCs, clorofenóis, e aldeídos de emissões veiculares e industriais" [22], proporcionando assim grandes benefícios ambientais.

Pacheco-Torgal e Jalali [34] referem que as nano-partículas de TiO₂ podem cristalizar sobre três formas: rutilo, anatase e broquite. O rutilo é a mais estável das três em termos termodinâmicos e é a mais disponível de se obter (é o 9º elemento mais abundante da crosta terrestre). A nanopartícula de TiO₂ é um material semi-condutor com capacidade

fotocatalítica que durante o processo de absorção dos raios ultravioletas da luz solar juntamente com a presença de moléculas de água, formam substâncias que possuem um forte poder oxidante que vão reagir com a sujidade ou outros compostos orgânicos e inorgânicos. Esta reação vai então desintegrar estes compostos [35], e também contribuir para o aumento do efeito auto-limpante.

Nazari et al [54] estudaram a incorporação de diferentes percentagens de nano-partículas de TiO_2 (0%, 0.5%, 1.5% e 2%) no betão como substituição de cimento e constataram que o betão com 1% de TiO_2 foi o que obteve melhor resultado de resistência à compressão e também que os betões com nano-partículas de TiO_2 a sua resistência à compressão aumentaram até aos 90 dias.

2.6.3. Nano-partículas de Óxido de Ferro

A nano- Fe_2O_3 (Figura 7) foi utilizado para a capacidade de auto-sensor e melhoria das resistências à compressão e à flexão do betão (Figura 4).



Figura 7 - Fotografia Nano_ Fe_2O_3 em diferentes cores

Ozyildirim et al [36] apud Pacheco-Torgal [17] referem que betões com 4% de nano-partículas de Fe_2O_3 por massa de cimento apresentam uma permeabilidade menor que os betões normais.

Nasibulin et al [37] observou que ao utilizar nanomateriais em pastas de cimento houve um aumento do dobro da resistência à compressão e um aumento de 40 vezes na condutividade elétrica, conferindo assim uma excelente aptidão funcional como material sensor.

Vários autores confirmaram a aptidão das argamassas com nano-Fe₂O₃ funcionarem também como materiais sensores Li et al [38], Lin et al [39] apud Pacheco-Torgal e Jalali [40].

2.6.4. Nano-Alumina

A Nano-Al₂O₃ (Figura 8) foi utilizada para aumentar até 143% o módulo de elasticidade com uma dosagem de 5%, para ter um efeito limitado sobre a resistência à compressão [22].

Shekari et al [41] apud Pacheco-Torgal [17] compararam o desempenho de betões com 1,5% de quatro tipos diferentes de nano-partículas (ZrO₂, TiO₂, Al₂O₃ e Fe₃O₄) e constataram que o betão com melhores resultados foi o betão com nano-Al₂O₃.

Nazari et al [42] apud Pacheco-Torgal [17] estudaram betões com diferentes percentagens de nano- Al₂O₃ com dimensões médias de 15 nm e constataram que utilizando 1% de nano-Al₂O₃ já se otimiza o desempenho do betão.



Figura 8 - Nano-Al₂O₃

2.7. Lixiviação do hidróxido de cálcio

Carde C et al [43] e Gaitero et al [44] apud Pacheco-Torgal et al [18] referem que a lixiviação de cálcio consiste na degradação progressiva da dissolução da pasta de cimento, através da migração de átomos de cálcio à solução agressiva e que as fases da pasta de cimento têm diferentes taxas de degradação. O cimento Portland dissolve-se completamente na solução agressiva, enquanto o gel CSH sofre um ligeiro aumento da porosidade. O aumento da porosidade do betão vai induzir consequências como o aumento da permeabilidade, permitindo que a água e outros elementos agressivos penetrem no betão, conduzindo à carbonatação e a problemas de corrosão. Gaitero et al [45] apud [18] estudaram a influência de nano-partículas de sílica sobre a redução de lixiviação de cálcio.

2.8. Problemas da dispersão das nano-partículas.

Um dos problemas das nano-partículas é a sua dispersão eficiente.

Veras-Agulho et al [46] apud [18] referem que a utilização de nano-partículas é responsável pelo aumento do grau de hidratação de composto de cimento quanto maior for a dispersão de nano-partículas.

Givi et al [47] apud [18] referem que, para o controlo adequado da dispersão das nano-partículas de SiO_2 , estas foram agitadas com uma parte da água de mistura de alta velocidade (120rpm) durante 1 minuto e de seguida adicionou-se à mistura as nano-partículas.

Zang et al [48] apud [18] utilizaram um agente de redução de água (UNF-5, um tipo de ácido sulfónico de naftaleno b e condensados de formaldeído) como auxílio na dispersão de nano-partículas nas pastas de cimento para obterem uma boa trabalhabilidade do betão. Também utilizaram um agente anti-espuma (fosfato de tributilo) para reduzir a quantidade de bolhas de ar. Para a preparação das nano-partículas no betão, começaram por misturar o agente de redução de água em água num misturador de argamassas, depois, adicionaram nano-partículas e agitaram a uma velocidade elevada durante 5 minutos, depois, adicionaram o anti-espuma com agitação. Depois o cimento, areia e agregado grosso, onde a mistura foi feita a baixa velocidade durante 2 minutos num misturador de betão centrífugo

e por último a mistura de água, redutor de água, nano-partículas e anti-espumante foi introduzida lentamente e agitou-se a uma velocidade baixa por 2 minutos de forma a conseguir uma boa trabalhabilidade.

3. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E ENSAIOS

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados, bem como as suas características, as composições que irão ser alvo de estudo e os procedimentos de todos os ensaios realizados.

Todos os materiais utilizados são certificados de forma a eliminar as interferências que poderiam influenciar os resultados dos ensaios. Após a escolha dos materiais procedeu-se ao estudo das várias composições em estudo com vista a obtenção de betões de elevado desempenho, bem como estudar a sua trabalhabilidade, durabilidade e características mecânicas.

Todos os requisitos e especificações, métodos de verificação para o betão tiveram como base a norma NP EN 206-1 (2005).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construções do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, localizado no Campus de Azurém, Guimarães.

3.1. Materiais

3.1.1. Agregados

Os agregados são os constituintes que mais volume ocupam no fabrico do betão e argamassas, representando cerca de 60% a 75% do seu volume.

Existem vários tipos de agregados e com diferentes dimensões. Estes podem ser classificados como agregado natural, agregado de origem mineral que foi sujeito apenas a processamento mecânico, agregado de granulometria extensa, agregado que consiste numa mistura de agregados grossos e agregados finos, agregado artificial, agregado de origem mineral resultante de um processo industrial compreendendo modificações térmicas ou outras, agregado reciclado, agregado resultante do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção.

Neste trabalho experimental optou-se por agregados britados cedidos pela pedreira Britaminho-Granitos e Brita do Minho Lda. da pedreira “Sorte do Mato das Lagedas”

localizada na freguesia de Gonça, concelho de Guimarães devido ao facto de ser uma empresa certificada, garantindo assim a qualidade dos agregados.



Figura 9 - Brita 4/8 mm



Figura 10 – Areia 0/4 mm

Para as composições realizadas neste trabalho experimental, utilizou-se dois tipos de dimensões de agregados, uma brita de dimensão compreendida entre 4 e 8mm (figura 9) e uma areia de dimensão compreendida entre 0 e 4mm (figura 10). No quadro 1 são apresentadas as principais características dos agregados fornecidos pelo fabricante.

Quadro 1 – Características dos agregados

Agregado	D_{máx.} (mm³)	Teor de finos	Massa Volúmica (kg/m³)	Absorção de água (%)
0/4	4	≤ 3	2660,00	0,20
0/8	8	≤ 1,5	2620,00	0,60

A distribuição granulométrica de ambos os agregados estão apresentadas no Quadro 2. As suas curvas granulométricas estão apresentadas na Figura 11.

Quadro 2 – Distribuição granulométrica da areia e da brita

Peneiro	Retidos acumulados Areia	Retidos acumulados Brita
(mm ³)	(%)	(%)
63	0	0
31,5	0	0
16	0	0
8	0	7
4	8	89
2	32	97
1	53	98
0,5	68	99
0,25	78	99
0,125	89	99
0,063	97	99

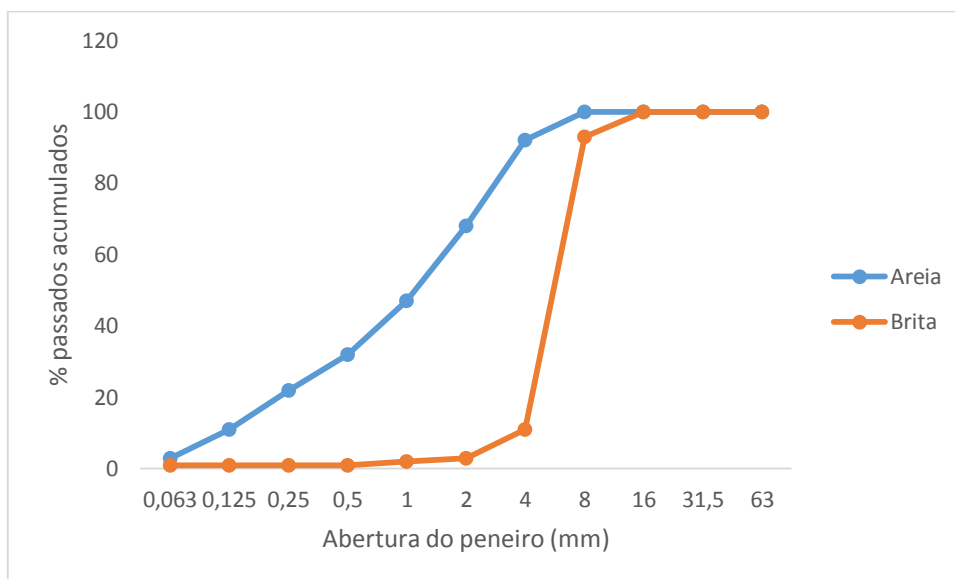


Figura 11 – Curva granulométrica dos agregados

As características avaliadas dos agregados estão de acordo com o estabelecido na norma NP EN 206-1 indicando a sua adequabilidade para a produção de betões.

3.1.2. Cimento Portland

O cimento Portland é um material inorgânico fino, podendo ser definido como um pó, com propriedades aglomerantes e ligantes que com adição de água irá-se-á tornar uma pasta homogenia, capaz de endurecer e conservar a sua estrutura.

Neste trabalho experimental escolheu-se o Cimento Portland CEM I 42,5R certificado segundo a NP EN 197-1 fornecido pela SECIL Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A pois trata-se de um produto de elevada qualidade muito utilizado em obras de engenharia civil. Este tipo de cimento permite o fabrico de betões de elevado desempenho e resistência.

As principais características químicas, físicas, mecânicas encontram-se descritas nos quadros 3, 4 e 5, sendo todos estes valores fornecidos pelo fabricante.

Quadro 3 - Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especifico
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	$\leq 5,0\%$
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	$\leq 5,0\%$
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	$\leq 4,0\%$
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	$\leq 0,1\%$

Quadro 4 – Características Mecânicas

Resistência à compressão (MPa), NP EN 196-1		
2 dias	7 dias	28 dias
≥ 20	-	$\geq 42,5$ a $\leq 62,5$

Quadro 5 – Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especifico
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm
Peso específico (kg/cm ³)	LENEC E 64	3130

3.1.3. Cinzas Volantes

As cinzas volantes são um subproduto obtido pela precipitação electrostática, ou captação mecânica em filtros de saco ou dispositivos semelhantes, das poeiras contidas no fumo produzido pela queima de combustível nas centrais termoeléctricas. As vantagens da incorporação das cinzas volantes devem-se ao facto destas conferirem o melhoramento de algumas propriedades do betão, tais como, maior resistência à corrosão, maior trabalhabilidade, redução da permeabilidade. Uma outra vantagem é sob o ponto de vista

ambiental tem a ver com a substituição parcial de cimento Portland por cinzas volantes devido à capacidade pozolânica destas [49].

Neste trabalho experimental para o estudo de algumas composições utilizou-se a adição de cinzas volantes (adição pozolânica tipo II), provenientes da Endesa Generation S.A de Compostela, sendo esta classificada de acordo com a EN 450-1 (2006).

As principais características das cinzas volantes encontram-se descritas no quadro 6, sendo certificado pelo LNEC.

Quadro 6 – Características das Cinzas Volantes

Caraterísticas	Valor Caraterístico	Limites para Valores Individuais	Valor Declarado
Perda ao Fogo	2% - 7%	<9%	-
Finura	$\leq 40\%$ e $VD \pm 10\%$	$\leq 40\%$ e $VD \pm 15\%$	N, 20%
Óxido Cálcio Livre	$\leq 2,5\%$	<2,6%	-
Óxido Cálcio Total	<10%	-	-
Cloretos	$\leq 0,10\%$	<0,10%	-
Sulfatos	$\leq 3\%$	<3,5%	-
Massa Volúmica	$\pm 200\text{kg/m}^3$ do VD	$\pm 225\text{kg/m}^3$ do VD	2300kg/m^3
Índice de Atividade			
28 dias	>75%	<70%	-
90 dias	>85%	<80%	-
Expansividade	<10mm	<10mm	-

3.1.4. Água

A função da água é transformar o cimento numa pasta aglomerante. Se a quantidade de água utilizada for muito pequena, a reação química entre ela e o cimento não ocorrerá por completo e dará pequena trabalhabilidade ao betão. Contudo, se for utilizada em grande quantidade a resistência do betão diminuirá devido ao excesso de poros que ocorrerão quando esta evaporar. Como tal, terá que haver o cuidado de utilizar a quantidade ideal de água.

Neste trabalho experimental, em todas as composições, foi utilizada uma água proveniente da rede pública, não havendo a necessidade de analisar as suas características, bastando esta ser potável conforme indicado na EN 1009 (2005).

3.1.5. Superplastificante

O superplastificante é um adjuvante redutor de água que irá conferir ao betão uma boa trabalhabilidade mesmo com a redução da quantidade de água de amassadura. A trabalhabilidade do betão influencia decisivamente os parâmetros fundamentais relacionados com a eficácia da sua utilização [50].

Neste trabalho experimental utilizou-se o superplastificante Glenium Sky 617 fornecido pela BASF, em todas as composições. O Glenium Sky 617 é um superplastificante de nova geração indicado para a produção de betão pronto com elevada manutenção da trabalhabilidade e durabilidade.

As principais características do Glenium Sky 617 encontram-se descritas no quadro 7.

Quadro 7 – Características Glenium Sky 617

Função Principal	Superplastificante/Forte redutor de água
Marcação CE	NP EN 934-2
Aspeto	Líquido Castanho
Densidade relativa (20°C)	1,05±0,02g/cm ³
pH	7,3±1,5
Teor em iões cloreto	<0,1%

3.1.6. Nanotitânia

A nanotitânia, também conhecido como Dióxido de Titânio (TiO_2) (Figura 12) é uma nanopartícula que confere ao betão grandes benefícios ambientais já que a nanopartícula de TiO_2 tem propriedades fotocatalíticas, que conseqüentemente acarreta propriedades de auto-limpeza e de despoluição.

O dióxido de titânio escolhido foi o Aeroxide TiO_2 P25 fornecida pela Evonix Industries.

As principais características do Aeroxide TiO_2 P25 encontram-se descrita no quadro 8.

Quadro 8 – Características Físicas e Químicas do Aeroxide TiO_2 P25

Propriedades	Unidade	Valor típico
Área de superfície específica	m^2/g	50 ± 15
Tamanho médio de partícula primária	nm	21
Massa Volúmica	Kg/m^3	≈ 130
Humidade a 2 horas a 105°C	%	$\leq 1,50$
Perda de ignição a 2 horas a 1000°C , com base em material seco durante 2 horas a 105°C	%	$\leq 2,00$
pH 4% em dispersão		3,5 - 4,5
Dióxido de titânio	%	$\geq 99,5$
Al_2O_3	%	$\leq 0,30$
SiO_2	%	$\leq 0,20$
Fe_2O_3	%	$\leq 0,01$
HCl	%	$\leq 0,30$
Resíduo peneiro, $45\mu\text{m}$	%	$\leq 0,05$

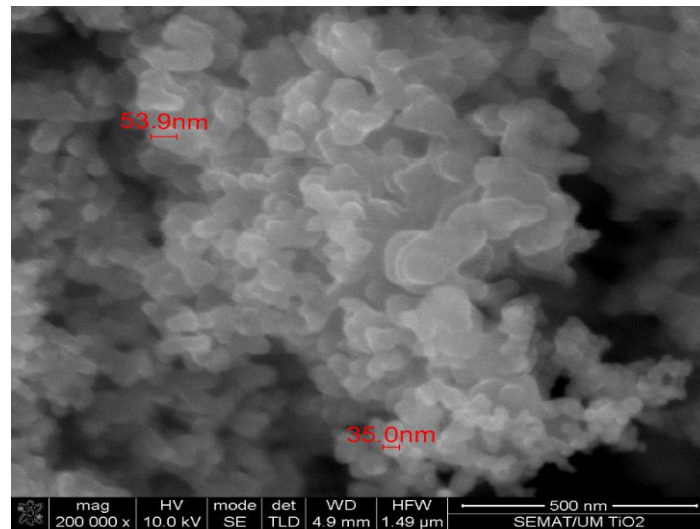


Figura 12 – Imagem microscópica ampliada a 200.000 vezes do TiO_2

3.2. Composições

Neste trabalho experimental foram realizadas seis composições diferentes, uma composição de referência com cimento, areia, brita, superplastificante e água, três composições com os mesmos materiais da composição de referência e com diferentes percentagens de dióxido de titânio, 15%, 45% e 75% em volume (1%, 2% e 3% em peso respetivamente) de cimento/ligante em substituição de ligante, uma composição com os mesmos materiais da composição de referência e com substituição de 30% em peso de cimento por cinzas volantes e por último, uma composição com substituição 30% em peso de cimento por cinzas volantes e de 1% em peso de ligante (cinzas volantes + cimento) por dióxido de titânio. O estudo de todas as composições foi feita a partir do método de Faury (folha de cálculo Excel elaborada por Camões A. 2011). A escolha deste método deve-se ao facto de ser um método que tem em consideração a influência das condições de compactação do betão, a forma do agregado, a razão água/ligante, com a finalidade de conseguir a máxima compactação dos componentes sólidos. O teor de humidade dos agregados não foi considerado para a formulação das composições, uma vez que estes foram previamente secos em estufa antes da sua utilização, sendo apenas contabilizado a sua absorção de água (Brita=0,6% e Areia=0,2%) para a relação água/ligante.

Como este trabalho experimental se trata de betões de elevado desempenho, onde a resistência e a durabilidade são os aspetos importantes deste tipo de betões, fixou-se uma dosagem de cimento de 500 kg/m^3 , uma vez que a dosagem de ligante influencia fundamentalmente a trabalhabilidade do betão. As percentagens de substituição de ligante por TiO_2 foram feitas em volume, pelo facto desta forma ser mais rigorosa.

Outro aspeto a ter em conta foi a relação água/ligante, uma vez que este parâmetro influencia as propriedades do betão, como a sua resistência mecânica, e durabilidade. Para as composições sem cinzas volantes a razão água/ligante foi de 0,35 e as composições com cinzas volantes a relação água/ligante foi de 0,325, a redução deste parâmetro deve-se ao facto de que as cinzas volantes conferem mais trabalhabilidade ao betão. Assim, de forma a tentar manter a mesma trabalhabilidade entre as composições ajustou-se a razão água/ligante.

Contudo, uma relação água/ligante desta magnitude é muito pequena para conferir ao betão uma boa trabalhabilidade, daí a necessidade de utilizar um adjuvante (superplastificante). A ficha técnica do superplastificante Glenium Sky 617 recomenda uma dosagem de 1,3kg por 100kg de cimento, contudo é possível utilizar dosagens superiores ou inferiores de 1 litro a 1,7 litros por 100kg de ligante consoante a relação água/ligante, tipo de cimento, granulometria utilizada, etc. Contudo, para saber a dosagem exata de superplastificante para obtenção de uma melhor trabalhabilidade do betão fez-se um estudo para determinar o desempenho da dosagem de diferentes percentagens de superplastificante na pasta de cimento em função da relação água/ligante.

As percentagens de superplastificante estudadas foram respetivamente de 1%, 1,5%, 1,7%, 2%, 2,5% e 3%, para uma relação água/ligante=0,3 com 1500g de cimento CEM I 42,5R. Este estudo consiste em determinar o tempo (s) que demora a pasta de cimento a encher um recipiente (volume). No quadro 9 e figura 13 pode-se verificar o desempenho do superplastificante.

Quadro 9 – Influência da dosagem do SP no tempo de fluidez

SP (%)	Volume (mml)											
	50	100	150	200	300	350	400	500	600	700	800	900
	Tempo de Fluidez (s)											
1,0	10,31	20,28	34,54	58,73	115,00	-	-	-	-	-	-	-
1,5	-	9,66	17,47	25,02	43,62	53,51	63,40	85,24	114,58	162,33	-	-
1,7	-	7,70	14,02	24,70	30,52	37,50	51,45	66,70	86,32	-	-	-
2,0	-	4,69	7,08	9,52	14,58	17,33	20,06	26,28	33,05	40,04	48,36	60,82
2,5	-	3,32	5,56	7,69	12,71	15,20	17,93	23,67	29,70	36,13	44,29	55,23
3,0	-	3,50	5,46	7,45	11,43	13,33	15,42	19,89	25,10	30,57	36,73	45,16

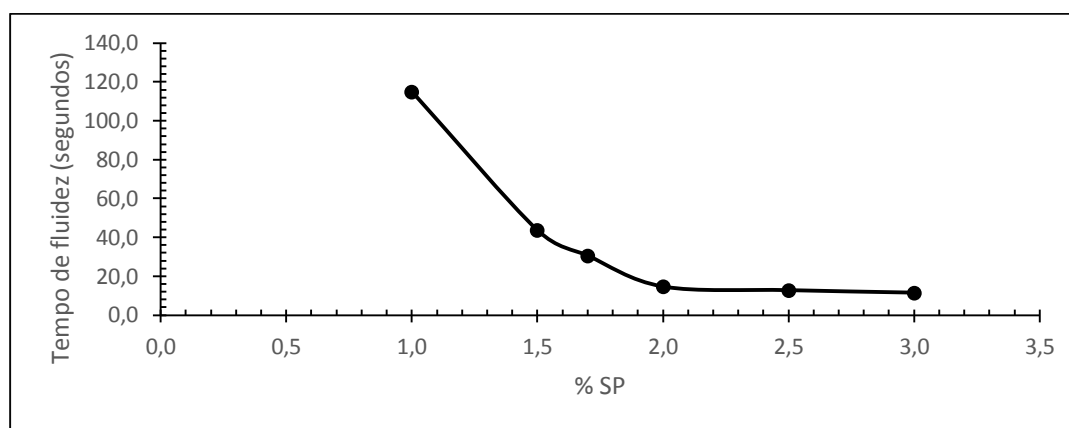


Figura 13 - Variação da fluidez com a quantidade de superplastificante na pasta de cimento (V=300 mml)

Como se pode verificar na figura 13, a partir de 2% de superplastificante o desempenho da fluidez deste não melhora muito. Assim segundo estes dados a dosagem ótima de superplastificante é de 2%. Como referido anteriormente, a ficha técnica do superplastificante Glenium Sky 617 recomenda uma dosagem de 1,3kg por 100 kg de cimento, mas como se pretende um betão de elevado desempenho com elevada quantidade de ligante requiere uma dosagem maior de superplastificante.

3.2.1 Composição de referência

O objetivo da composição de referência (BR) é servir como ponto de comparação, de forma a verificar as diferenças que ocorreram com as restantes composições quando se implementa um novo constituinte à composição.

Como referido anteriormente, a determinação de cada composição foi realizada com a utilização do método de Faury. Assim, através deste método obteve-se as dosagens em kg/m^3 de cada constituinte (Quadro 10).

Quadro 10 - Composição do betão de referência por m^3 de betão

Composição	Cimento (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	Superplastificante (l/m^3)	Água (l/m^3)
BR	500,00	851,60	822,85	10,00	181,64

3.2.2 Composição com dióxido de titânio

Após a determinação da composição de referência foram determinadas as composições com dióxido de titânio que iriam ser alvo de estudo. Determinou-se três composições com diferentes percentagens de dióxido de titânio, 15%, 45% e 75% relativamente ao volume de ligante que corresponde a 1%, 2% e 3% relativamente em peso do ligante) de cimento/ligante em substituição de ligante (Figura 14)

A escolha destas percentagens deve-se a razões económicas (2,00€ a 2,50€ por kg + IVA) e também ao facto da massa volúmica da nanopartícula de TiO_2 ser bastante pequena ($\gamma_{\text{sTiO}_2}=130 \text{ kg/m}^3$) que tem consequências na determinação da composição pelo método de Faury que leva a uma diminuição substancial de areia (0-4mm) com o aumento da percentagem de nano-partículas de TiO_2 .

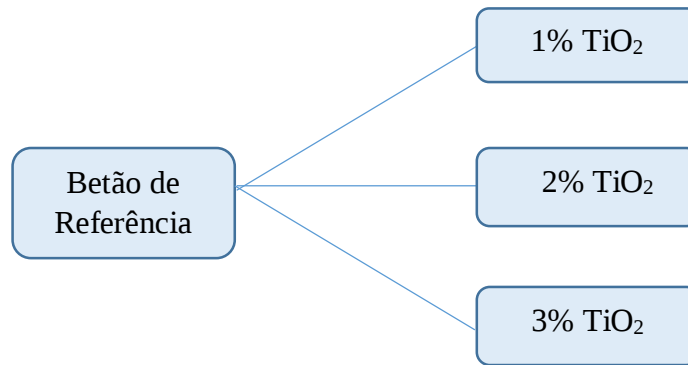


Figura 14 - Diagrama das composições com Dióxido de Titânio

A quantidade de dióxido de titânio para as diferentes percentagens foi feita segundo as seguintes fórmulas:

$$x \left(\frac{C}{\gamma_{sc}} \right) = \frac{TiO_2}{\gamma_{sTiO_2}}, \text{ para composições com dióxido de titânio};$$

$$x \left(\frac{C}{\gamma_{sc}} + \frac{CV}{\gamma_{scv}} \right) = \frac{TiO_2}{\gamma_{sTiO_2}}, \text{ para composições com dióxido de titânio e cinzas volantes};$$

Onde:

X: percentagem de ligante a substituir por dióxido de titânio, 15%, 45% e 75%, em relação com o volume de ligante;

C (Cimento) = 500 kg/m³;

CV (Cinzas Volantes) = 150kg/m³, correspondendo a 30% de cinzas volantes;

γ_{sc} =3130kg/m³, massa volúmica real cimento;

γ_{scv} =2330kg/m³, massa volúmica real cinzas volantes;

γ_{sTiO_2} =130kg/m³, massa volúmica real dióxido titânio;

As dosagens em kg/m³ de cada constituinte para as composições com dióxido de titânio obtidas pelo método de Faury pode ser verificado no quadro 11.

Quadro 11 - Composições do betão com Dióxido de Titânio por m³ de betão

Composição	Cimento (kg/m ³)	TiO ₂ (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Superplastificante (l/m ³)	Água (l/m ³)
B 1% TiO ₂	496,88	3,12	764,45	848,42	10,00	181,62
B 2% TiO ₂	490,65	9,35	601,43	888,65	10,00	181,53
B 3% TiO ₂	484,42	15,58	452,92	914,58	10,00	181,39

3.2.3 Composição com cinzas volantes

As cinzas volantes são uma das adições pozolânicas mais utilizadas atualmente, devido ao grande volume de cinzas provenientes das centrais termoelétricas, às suas características químicas, físicas e mecânicas e, também, por razões económicas que ao substituir uma percentagem de cimento por esta, vai se diminuir os custos de produção de betão. Na prática corrente os níveis de substituição do cimento por cinzas volantes são inferiores a 40%. Assim, neste trabalho experimental optou-se por uma substituição de 30% (Figura 15).



Figura 15 - Diagrama das composições com cinzas volantes

As dosagens em kg/m³ de cada constituinte para as composições com Cinzas Volantes obtidas pelo método de Faury podem ser verificadas no quadro 12.

Quadro 12 - Composição do betão com cinzas volantes por m³ de betão

Composição	Cimento (kg/m ³)	Cinza Volante (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Superplastificante (l/m ³)	Água (l/m ³)
B 30% CV	350,00	150,00	809,00	852,24	10,00	169,23

3.2.4 Composição com cinzas volantes e dióxido de titânio

Após a determinação das composições base com os constituintes, dióxido de titânio e de cinzas volantes pretende-se nesta composição a influência da junção de 30% de cinzas volantes e 1% de dióxido de titânio no betão de referência.

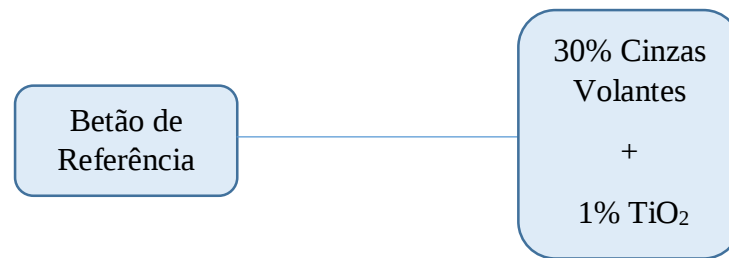


Figura 16 - Diagrama das composições com cinzas volantes e dióxido de titânio

As dosagens em kg/m^3 de cada constituinte para as composições com cinzas volantes e dióxido de titânio obtidas pelo método de Faury pode ser verificado no quadro 13.

Quadro 13 – Composição do betão com cinzas volantes e dióxido de titânio por m^3 de betão

Composição	Cimento (kg/m^3)	Cinza Volante (kg/m^3)	TiO ₂ (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	Superplastificante (l/m^3)	Água (l/m^3)
B 30% CV + 1%TiO ₂	345,65	150,00	4,35	698,21	881,76	10,00	169,19

3.3. Ensaio no Betão

Neste trabalho experimental foram estudadas as propriedades dos betões frescos, através do ensaio de abaixamento (Slump) para todas as composições.

Também foi realizado o estudo das propriedades mecânicas de todas as composições em betão endurecido através dos ensaios de resistência à compressão.

Também irá ser realizado o estudo da durabilidade de todas as composições em betões endurecidos. Nesta tarefa serão realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, ensaio de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário, o ensaio de resistência ao ácido sulfúrico, ensaio de resistividade elétrica e o ensaio de ultra sons.

3.3.1. Amassadura

Durante a amassadura do betão, existe a preocupação de assegurar a homogeneidade da mistura. Assim, vai-se adotar um procedimento de mistura único baseado na experiência laboratorial e na norma NP EN 206-1 (2005).

As amassaduras realizadas neste trabalho experimental foram produzidas na mesma betoneira com uma capacidade máxima de 50 litros (Figura 17). As betoneiras devem ser capazes de assegurar uma distribuição uniforme dos materiais constituintes e uma consistência uniforme do betão dentro do tempo de amassadura e para a capacidade de mistura e não devem ser carregadas para além da sua capacidade nominal de amassadura.



Figura 17 – Betoneira

A mistura foi realizada pelo seguinte procedimento:

0. Mistura do ligante com o dióxido de titânio na betoneira secundária durante 5 minutos de forma a conferir uma boa dispersão da nanopartícula dióxido de titânio: Este ponto só é realizado para as composições com dióxido de titânio;
1. Introdução dos agregados na betoneira realizada pela seguinte sequência:
 - a. Brita;
 - b. Areia.

2. Mistura dos agregados na betoneira durante 2 minutos;
3. Introdução do ligante (cimento, cinzas volantes);
4. Mistura do ligante com os agregados na betoneira durante 2 minutos;
5. Introdução de 70% da água de amassadura à mistura;
6. Mistura durante 2 minutos;
7. Introdução do superplastificante e dos 30% de água de amassadura em falta;
8. Mistura durante 2 minutos.

3.3.2. Comportamento do betão fresco

Após a execução de cada amassadura procedeu-se, de imediato, à avaliação das propriedades do betão no estado fresco, a sua trabalhabilidade através do ensaio de abaixamento (Slump) de acordo com a NP EN 12350-2 (1999).

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio são (Figura 18 e 19):



Figura 18 - Equipamentos necessários para a realização ensaio abaixamento

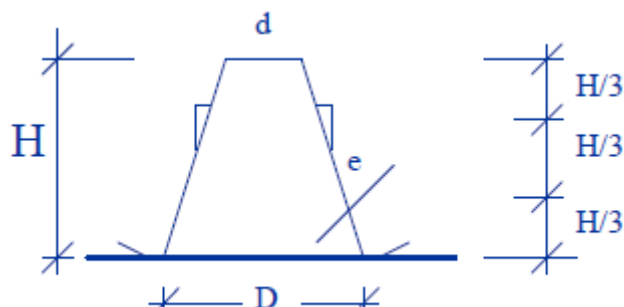


Figura 19 – Pormenorização Cone de Abrams

- Cone de forma tronco-cónico (Cone de Abrams), com:

- $H = 300 \pm 2 \text{ mm}$;
- $d = 100 \pm 2 \text{ mm}$;
- $D = 200 \pm 2 \text{ mm}$;
- $E \geq 1,5 \text{ mm}$
- Varão de compactação com;
 - $d = 16 \pm 1 \text{ mm}$;
 - $L = 600 \pm 5 \text{ mm}$
- Fita métrica graduada.

O ensaio de abaixamento foi realizado pelo seguinte procedimento:

1. O enchimento do cone de Abrams é realizado por três camadas, em que cada camada é realizada a uma altura de $H/3$;
2. Enchimento da primeira camada seguido de 25 pancadas com o varão de compactação;
3. Enchimento da segunda camada seguido de 25 pancadas com o varão de compactação;
4. Enchimento da terceira camada seguido de 25 pancadas com o varão de compactação;
5. Nivelamento da superfície da mistura no topo do cone de Abrams;
6. Retirar o cone durante 10 segundos, num movimento firme para cima sem transmitir movimentos laterais;
7. O abaixamento da mistura tem que ser simétrico, caso contrário, deve-se realizar novamente o ensaio.
8. Medição do abaixamento desde o topo do cone de Abrams até ao topo da mistura.

3.3.3. Moldagem, conservação, tipo e dimensões dos provetes

A moldagem, conservação, tipo e dimensões dos provetes baseou-se nas normas NP EN 12390-1 (2009) e NP EN 12390-2 (2009), nas quais se definem as dimensões nominais dos provetes cúbicos $(100 \times 100 \times 100) \text{ (mm}^3\text{)}$, $(150 \times 150 \times 150) \text{ (mm}^3\text{)}$ e provetes cilíndricos

(Ø100xH200) (mm³), (Figuras 20, 21 e 22) e os requisitos necessários para a preparação e enchimento dos moldes, compactação e cura dos provetes de betão.



Figura 20 – Molde de provetes cúbicos (100x100x100) (mm³)



Figura 21 - Molde de provetes cúbicos (150x150x150) (mm³)



Figura 22 – Molde provetes cilíndricos (Ø100xH200) (mm³)

A colocação das misturas nos moldes foi realizada pelo seguinte procedimento:

1. Enchimento de metade do molde;
2. Compactação do molde na mesa vibratória durante 15 segundos;
3. Enchimento do molde por inteiro;
4. Compactação do molde na mesa vibratória durante 15 segundos;
5. Nivelamento da superfície da mistura;
6. Após a moldagem, os provetes permaneceram 24 horas numa câmara húmida, a uma temperatura constante de $21\pm^{\circ}\text{C}$;
7. Desmoldagem dos moldes;
8. Colocação dos provetes numa câmara húmida, a uma temperatura constante até à data da realização dos ensaios.

3.3.4. Resistência à Compressão

A resistência à compressão é a característica mecânica mais importante do betão. Este tipo de ensaio é influenciado por vários fatores, tais como, a idade do betão, tipo de cura, forma dos provetes e velocidade de carregamento.

Neste trabalho experimental o ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NP EN 12390-3 (2009) a três provetes cúbicos de $(150\times150\times150)$ (mm³) para todas as composições com uma velocidade de aplicação de carga de 13,5kN/s na prensa (Figura 23).



Figura 23 – Prensa para resistência à compressão

O resultado do ensaio de resistência à compressão resulta da média de três provetes aos 7 e 28 dias de idade para todas as composições. A prensa dá-nos o valor de carga máxima de rotura em kN.

O valor de resistência à compressão é obtido pela seguinte formula:

$$\bullet \quad f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão, expressa em MPa (N/mm²);

F é a carga máxima de rotura, expressa em N;

A_c é a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, expressa em mm²

A determinação da classe de resistência à compressão foi feita com base em valores característicos mínimos obtidos em provetes cúbicos, $f_{ck,cube}$ (N/mm²) da norma NP EN 206-1 (2005).

3.3.5. Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão é um dos ensaios que está relacionado com a durabilidade do betão e consiste na diferença de massa do provete de betão endurecido imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco. Este ensaio foi realizado a três provetes cúbicos de (100x100x100) (mm³) aos 28 dias de idade de todas as composições.

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado segundo o seguinte procedimento, de acordo com a especificação do LNEC E 394 (1993):

1. Secagem dos provetes em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante, pesagem dos provetes em intervalos de 24 horas até verificar uma variação $\leq 0,1\%$;
2. Introdução do provete num recipiente com água de consumo publico a uma temperatura de $10 \pm 3^\circ\text{C}$, até massa constante. Esta operação foi efetuada por etapas, onde o provete foi imerso sucessivamente, em intervalos de 1h, a 1/3, 2/3 e 3/3 da sua altura. O nível final da água não ultrapassou 20mm da face superior do provete

- imerso, como recomendado na especificação do LNEC E 394 (1993). Considerou-se massa constante do provete saturado (m_1), quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas em 24 horas for $<0,1\%$;
3. Antes de cada pesagem, secou-se a superfície do provete com um pano absorvente, húmido, de modo a remover toda a água superficial;
 4. Pesou o provete dentro de água (m_2), onde m_2 é a sua massa hidrostática, após saturação;
 5. Secagem dos provetes em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante. Considerou-se massa constante do provete seco (m_3), quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas em 24 horas for $<0,1\%$;
 6. Os resultados da absorção de água é feita pela seguinte forma:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100, \quad (4)$$

Onde,

m_1 é a massa do provete saturado no ar, expressa em gramas;

m_2 é a massa hidrostática do provete saturado, expressa em gramas;

m_3 é a massa do provete seco, expressa em gramas;

A_i é o valor da absorção de água por imersão, expressa em percentagem.

3.3.6. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade também está relacionado com a durabilidade do betão e consiste na diferença entre a massa do provete de betão endurecido com uma das faces em contacto com água durante um determinado tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água.

Este ensaio foi realizado a três provetes cúbicos de $(100 \times 100 \times 100)$ (mm^3) aos 28 dias de idade a todas as composições.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo o seguinte procedimento, de acordo com a especificação do LNEC E 393 (1993):

1. Secagem dos provetes em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante (M_0), pesagem dos provetes em intervalos de 24 horas até verificar uma variação $\leq 0,1\%$;

2. Colocar no fundo do tabuleiro os suportes destinados a manter a face inferior do provete em contacto com a água;
3. Posicionar o provete no tabuleiro, após se encontrar à temperatura da sala $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$ (Figura 24);
4. Encher cuidadosamente o tabuleiro com água até que o nível atinja $5 \pm 1\text{mm}$ acima da face inferior do provete, evitando molhar as outras faces do provete;
5. Cobrir o tabuleiro e o provete com a campânula e manter o nível de água constante durante todo o ensaio;
6. Fazer as medições ao fim de tempo t_i iguais a 0, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 minutos a contar desde a colocação do provete em contacto com a água, no primeiro dia do decorrer do ensaio. Voltar a fazer a leitura 24h depois do início do ensaio e fazer medições de 90 em 90 minutos fazendo 5 leituras. Voltar a fazer a leitura às 48 horas depois do início do ensaio e fazer medições de 3 em 3 horas, fazendo 3 medições. Voltar a fazer a leitura às 72 horas depois do início do ensaio e fazer medições de 3 em 3 horas, fazendo 3 medições;
 - a. Para efetuar as medições, retirar o provete do tabuleiro, permitindo que a água escorra do provete e colocá-lo sobre uma base não absorvente durante um período de 60 ± 5 segundos.
 - b. Pesar o provete e voltar a colocá-lo no recipiente;
 - c. Registrar a massa (M_i) do provete no tempo (t_i);
7. O resultado da absorção de água é obtida pela seguinte fórmula:

$$A_C = \frac{M_i - M_o}{A} \times 1000, \quad (5)$$

Onde,

M_o é a massa do provete seco, expressa em gramas;

M_i é a massa do provete, no tempo t_i expressa em gramas;

t_i é o tempo decorrido desde o início do ensaio, expressa em minutos;

A é a área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água, expressa em mm^2 ;

A_C é o valor da absorção de água por capilaridade, kg/m^2 .

8. O resultado do coeficiente de absorção de água por capilaridade (C) é obtido pela determinação do declive da reta.

Onde,

C coeficiente de absorção, expressa em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{horas}})$.



Figura 24 - Provete no tabuleiro durante ensaio de absorção de água por capilaridade

3.3.7. Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário

O ensaio de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário permite a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos no betão. Este ensaio foi realizado a três provetes cilíndricos ($\text{Ø}100 \times \text{H}200$) (mm^3) aos 28 dias de idade para todas as composições, em que cada um dos provetes foi cortado em três partes com uma altura de 5 cm, como especificado na Figura 25.

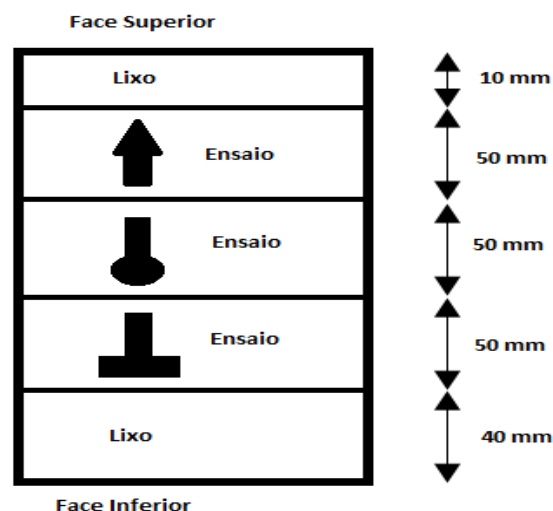


Figura 25 – Esquema do corte das rodela do provete cilíndrico ($\text{Ø}100 \times \text{H}200$) (mm^3)

O ensaio de penetração de cloretos foi realizado segundo o seguinte procedimento, de acordo com a especificação do LNEC E 463 (2004):

1. Obtenção de três provetes cilíndricos com um diâmetro de 100mm e uma altura de 50mm de um provete cilíndrico com um diâmetro de 100mm e altura de 200mm;
2. Escovagem e lavagem das rebarbas da superfície do provete e limpeza do excesso de água das suas superfícies;
3. Aplicação de silicone nos provetes, à exceção da superfície superior e inferior de cada provete;
4. Colocação dos provetes numa câmara de vácuo a uma pressão de 10 – 50 mbar durante 5 min;
5. Manter os provetes em vácuo durante 3 horas com a bomba de vácuo em funcionamento e enche-se o recipiente com solução saturada de Ca(OH)_2 , de forma a todos os provetes ficarem imersos;
6. Manter o vácuo por mais 1 hora;
7. Deixar entrar o ar no recipiente e manter os provetes na solução durante 18 ± 2 horas;
8. Encher o reservatório catódico com cerca de 12 L de solução 10%NaCl;
9. Colocar a manga de borracha no provete e apertá-la com duas braçadeiras de aço inox;
10. Colocar o provete no suporte plástico do reservatório catódico (Figura 26);
11. Encher a manga sobre o provete com 300ml da solução anódica (NaOH 0,3M);
12. Imergir o ânodo na solução anódica;
13. Ligar o cátodo ao pólo negativo da fonte de alimentação e o ânodo ao polo positivo;
14. Ligar a fonte de alimentação, com uma voltagem pré-estabelecida de 30V e registar a intensidade da corrente inicial que passa em cada provete;
15. Ajustar a voltagem, se for necessário, deixar decorrer o ensaio conforme a recomendação da especificação LNEC E 463 e registar a intensidade da corrente e a temperatura antes de terminar o ensaio;
16. Desmonta-se os provetes;
17. Lavar os provetes com água da torneira;
18. Limpar o excesso de água da superfície do provete;
19. Parte-se o provete por compressão diametral em 2 partes (Figura 27);

20. Escolher a parte do provete que tenha a secção de separação o mais perpendicular possível relativamente aos topos para efetuar a medição da profundidade de penetração;
21. Pulverizar a secção com uma solução de AgNO_3 0,1M;
22. Esperar que o precipitado branco do cloreto de prata fique claramente visível na superfície (passados ± 15 minutos);
23. Dividir o bordo do provete em 8 partes iguais de forma a facilitar as medições (Figura 27);
24. Medição da profundidade de penetração dos iões cloreto com a ajuda de um paquímetro digital, realizando 7 medições ao longo do bordo de cada provete, obtendo assim 7 profundidades (Figura 28);
25. Cálculo do coeficiente de difusão em regime não estacionário a partir da seguinte fórmula:

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$$

(7)

Onde,

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

(8)

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_o}\right)$$

(9)

D , o coeficiente de difusão em regime não estacionário, m^2/s ;

z , o valor absoluto da valência do ião, para os cloretos, $z = 1$;

F constante de Faraday: $F = 9.648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$;

U : valor absoluto da voltagem aplicada, V;

R : constante dos gases perfeitos; $R = 8,314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$

T : valor médio das temperaturas inicial e final no anólito (*graus Kelvin*);

L : espessura do provete, m

x_d : valor médio da profundidade de penetração, m ;

t : duração do ensaio, *segundos*;

erf^{-1} : inverso da função erro;

C_d : concentração de cloretos para a qual ocorre mudança de cor, $C_d \approx 0.07N$ para betão com cimento CEM I;

C_o : concentração de cloretos no católito, $C_o \approx 2N$

Visto que $erf^{-1}\left(1 - \frac{2 \times 0.07}{2}\right) = 1.28$, pode-se usar a seguinte equação simplificada (4):

$$D = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \text{ onde é:}$$

D , o coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} m^2/s$;

U , o valor absoluto da voltagem aplicada, V ;

T , valor médio das temperaturas inicial e final no anólito, $^{\circ}C$;

L , a espessura do provete, mm ;

x_d , o valor médio da profundidade de penetração, mm

t , a duração do ensaio, *horas*;



Figura 26 – Provete de betão no suporte plástico no reservatório catódico



Figura 27 – Metade de um provete cilíndrico ($\varnothing 100 \times H50$) (mm^3), com divisão marcada para a medição da profundidade



Figura 28 – Medição da profundidade da penetração de cloretos com paquímetro digital

3.3.8. Ataque químico

O ataque de ácido sulfúrico vai afetar o provete através da reação entre a solução ácida e os compostos cimentícios, conduzindo a uma degradação do betão que, consequentemente, vai provocar uma perda da massa. Assim, de forma a medir a resistência do betão contra este ataque químico, pesa-se o provete a seco no início e no fim do ensaio, obtendo assim

a sua perda de massa, sendo também possível verificar tal condição através do aspeto do provete.

Este ensaio incidiu em 3 provetes cúbicos de (100x100x100) (mm³) para todas as composições submetidos a uma solução de 10% de ácido sulfúrico. Este ensaio baseou-se na norma ASTM C-267 (2006) e a EN 13529 (2003) que sugere uma utilização de uma solução de 20% de ácido sulfúrico. A escolha de uma solução de 10% provém para que fosse possível uma degradação mais lenta e torna-se possível verificar com mais pormenor as diferenças das perdas de massa para cada composição.

O ácido sulfúrico usado tinha as seguintes propriedades (Quadro 14):

Quadro 14 – Propriedades do Ácido Sulfúrico

Propriedades Químicas	Unidade	Valor típico
Concentração	%	≥98,5%
Propriedades Físicas	Unidade	Valor típico
Densidade	g/cm ³	1,84

O ensaio de ataque com ácido sulfúrico foi realizado segundo o seguinte procedimento:

1. Preparação do recipiente com o ácido sulfúrico, água e os suportes dos provetes para posterior colocação no recipiente;
2. Registo da pesagem (C), breve descrição da cor e aparência da superfície dos provetes e a cor e clareza do meio do ensaio, antes de começar o ensaio. A pesagem feita numa balança com resultado de 0,001g;
3. Colocação dos provetes no recipiente com ácido sulfúrico e água. Os provetes devem estar completamente submersos e estar a 1 cm da face inferior da superfície,

e sem tocar nas faces laterais do recipiente e evitar o contacto entre provetes. Por fim tapar o recipiente;

4. Examinar os provetes após 1, 7, 14, 35 e 56 dias de imersão para determinar a taxa de ataque;
 - a. Retirar os provetes do recipiente;
 - b. Limpar os provetes por três lavagens rápidas em água corrida e limpá-los com uma toalha de papel entre cada lavagem;
 - c. Deixar os provetes a secar durante 30 minuto;
 - d. Antes registar a massa dos provetes,
 - e. Registo da pesagem (W), breve descrição da cor e aparência da superfície dos provetes e a cor e clareza do meio do ensaio, antes de começar o ensaio.

A pesagem feita numa balança com resultado de 0,001g.

5. O resultado da perda de massa é obtido pela seguinte fórmula e é realizado aos três provetes nos quais se faz uma média dos valores obtidos:

$$\text{Perda de massa, \%} = \frac{C - W}{C} \times 100$$

(10)

Onde;

C é a massa do provete antes do início do ensaio, expresso em gramas;

W é a massa do provete depois da imersão, expresso em gramas.



Figura 29 – Provetes dentro do recipiente emergidos numa solução de 10 % ácido sulfúrico

3.3.9. Ultra sons

O ensaio de ultra sons, é um ensaio não destrutivo que consiste na determinação da velocidade de propagação das ondas longitudinais ultrassónicas no betão endurecido. Um transdutor electroestático, em contacto com a superfície do provete de betão a ensaiar, vai produzir uma onda longitudinal, que vai percorrer uma distância conhecida e vai ser convertida num sinal elétrico por um segundo transdutor, sendo medido com um relógio eletrónico, o tempo de percurso do impulso vibratório. Este ensaio permite inferir a quantidade de poros internos no betão pois quando maior for a sua quantidade menor será a velocidade de propagação de ultra sons.

Este ensaio foi realizado em provetes cúbicos de $(100 \times 100 \times 100)$ (mm³) aos 7 e 28 dias de idade para todas as composições e foi baseado na NP EN 12504 - 4 (2007).

Realizou-se dois tipos de leitura, direita e semi-direta. Na transmissão direta os dois transdutores estão em faces opostas, na transmissão semi-direta, os transdutores estão em faces adjacentes (Figura 30 e 31).

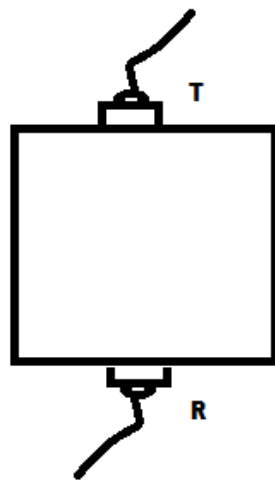


Figura 30 – Transmissão direta

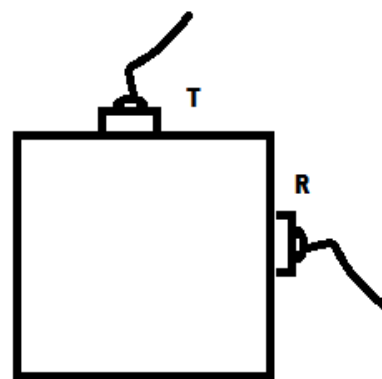


Figura 31 – Transmissão semi-direta

Legenda:

R é o transdutor – recetor

T é o transdutor – transmissor

O ensaio de ultra sons foi realizado segundo o seguinte procedimento:

1. Limpar bem o provete de forma a retirar todos os resíduos nas superfícies;
2. Calibrar o aparelho na barra de calibração com um desvio limite de $\pm$ uma exatidão de 2%;
3. Colocar um pouco de gel lubrificador na parte de contacto dos transdutores, de forma a cobrir toda a superfície de contacto dos transdutores;
4. Posicionar os transdutores conforme o tipo de transmissão desejada e pressioná-los contra o provete;
5. Registo do resultado da velocidade de propagação dos ultra-sons diretamente do aparelho. O resultado da velocidade de propagação dos ultra-sons da transmissão direta e transmissão semi-direta também pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$V = \frac{L}{T},$$

(11)

Onde,

V é a velocidade de propagação dos ultra-sons, expressa em m/s;

L é o comprimento do percurso, expresso em metros;

T é o tempo que o ultra-sons levam a atravessar o comprimento de percurso, expresso em μ s.

3.3.10. Resistividade elétrica

O ensaio de resistividade elétrica, é um ensaio não destrutivo que consiste na medição da resistividade elétrica de uma superfície de um elemento de betão, através do resistivímetro linear de quarto eléctrodos. Este ensaio permite obter informação acerca do risco de corrosão, uma vez que existe uma relação linear entre a intensidade de corrosão e a condutividade eletrolítica.

Este ensaio foi realizado em provetes cilíndricos de ($\varnothing 100 \times H 200$) (mm^3) aos 7 e 28 dias de idade para todas as composições e foi baseado no procedimento de ensaio PE – 002 (2005) do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho.

O ensaio de resistividade elétrica foi realizado segundo o seguinte procedimento:

1. Provete saturados, o grau de humidade deve ser igual em todo o provete de forma a permitir a continuidade elétrica no provete constante;
2. Limpar a sujidade na superfície do provete, removendo os resíduos existentes;
3. O ponto apostado ao do local da leitura não pode estar em contacto com nada (Figura 33);
4. Fazer leituras afastadas de 120° e registar o valor médio (Figura 32 e 33);
5. O resultado da resistividade elétrica resulta da média das três leituras por provete, expresso em $K.\Omega.cm$.

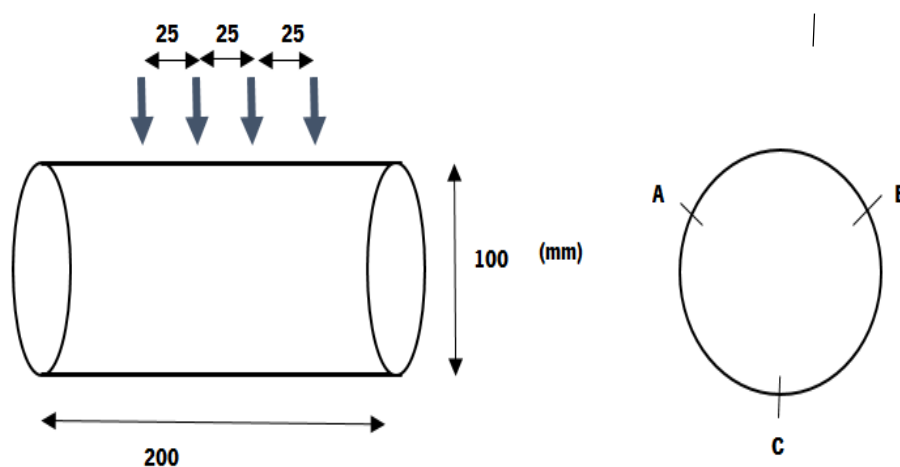


Figura 32 – Medição da resistividade elétrica num provete cilíndrico



Figura 33 – Colocação do provete para medição da resistividade elétrica num provete cilíndrico

4. Análise de resultados

Este capítulo incide na análise dos resultados obtidos para todos os ensaios realizados, onde se irá avaliar a influência da incorporação de nano-partículas de TiO_2 no betão de forma obter um betão de elevado desempenho.

4.1. Ensaio de abaixamento

Como referido no capítulo 3.2 houve a necessidade de ajustar a relação de água/ligante para as composições com cinzas volantes e sem cinzas volantes. Para as composições sem cinzas volantes a razão água/ligante foi de 0,35 e as composições com cinzas volantes a relação água/ligante foi de 0,325. A redução deste parâmetro deveu-se ao facto de que as cinzas volantes conferem mais trabalhabilidade ao betão. Este ajuste foi feito com a finalidade de tentar manter a mesma trabalhabilidade entre as composições, ajustou-se a razão água/ligante.

No Quadro 15 e Figura 34 são apresentados as quantidades dos constituintes e o valor de Abaixamento obtido para cada composição.

Quadro 15 – Quantidades dos constituintes e abaixamento obtido para cada composição

Composição	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Cinza Volante (kg/m ³)	TiO ₂ (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Superplastificante (l/m ³)	Água (l/m ³)	Abaixamento (mm)	Classe de abaixamento
BR	500,00	851,60	-	-	822,85	10,00	181,64	60	S2
B 1%TiO ₂	496,88	764,45	-	3,12	848,42	10,00	181,62	68	S2
B 2%TiO ₂	490,65	601,43	-	9,35	888,65	10,00	181,53	86	S2
B 3%TiO ₂	484,42	452,92	-	15,58	914,58	10,00	181,39	106	S3
B 30%CV	350,00	809,00	150,00	-	852,24	10,00	169,23	110	S3
B 30%CV + 1%TiO ₂	345,65	698,21	150,00	4,35	881,76	10,00	169,19	156	S3

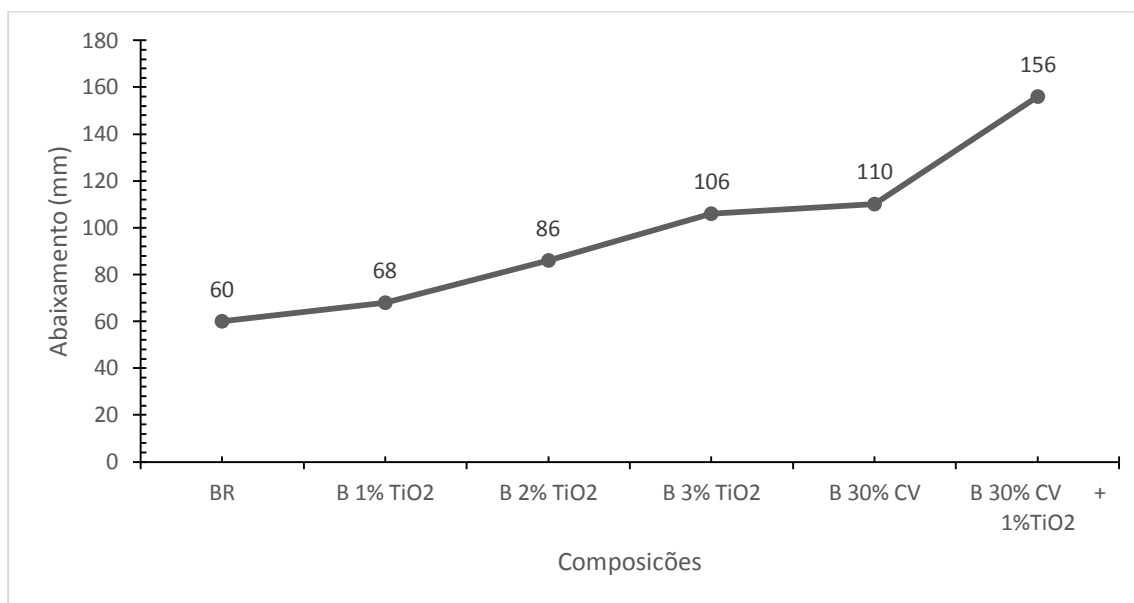


Figura 34 - Abaixamento obtido para cada composição

Com base na análise dos resultados apresentados no Quadro 15 e Figura 34, pode-se verificar que quanto maior for a percentagem de nano-partículas de TiO₂ maior será o nível de abaixamento podendo concluir que as nano-partículas de TiO₂ são aproximadamente esféricas e com pouca rugosidade. Também podemos verificar que as cinzas volantes são aproximadamente esféricas. Por este motivo obtém-se mais abaixamento com muito menos água. Salientar também que a composição B 30% CV + 1% TiO₂ é a que apresenta maior abaixamento, com maior trabalhabilidade entre as composições todas.

4.2. Resistência à Compressão

Neste capítulo, para melhor compreensão dos resultados da resistência à compressão, optou-se por uma apresentação conjunta dos resultados obtidos nas 6 composições estudadas. A análise da resistência à compressão será feita ao resultado médio de 3 provetes cúbicos de (150x150x150) (mm³) ensaiados aos 7 e aos 28 dias. No Anexo 1 encontram-se todos os dados e resultados intermédios e finais de cada provete ensaiado correspondente ao ensaio de resistência à compressão.

4.2.1. Betão de referência (BR)

No Quadro 16 são apresentados os valores de resistência à compressão bem como a sua classe de resistência obtidos para o betão de referência (BR).

Quadro 16 – Dados resistência à compressão do betão de referência

Composição	Tempo (dias)	Carga de rotura (kN)	Resistência à compressão (MPa)	Classe resistência à compressão
BR	7	1538	68	C55/67
	28	1752	78	

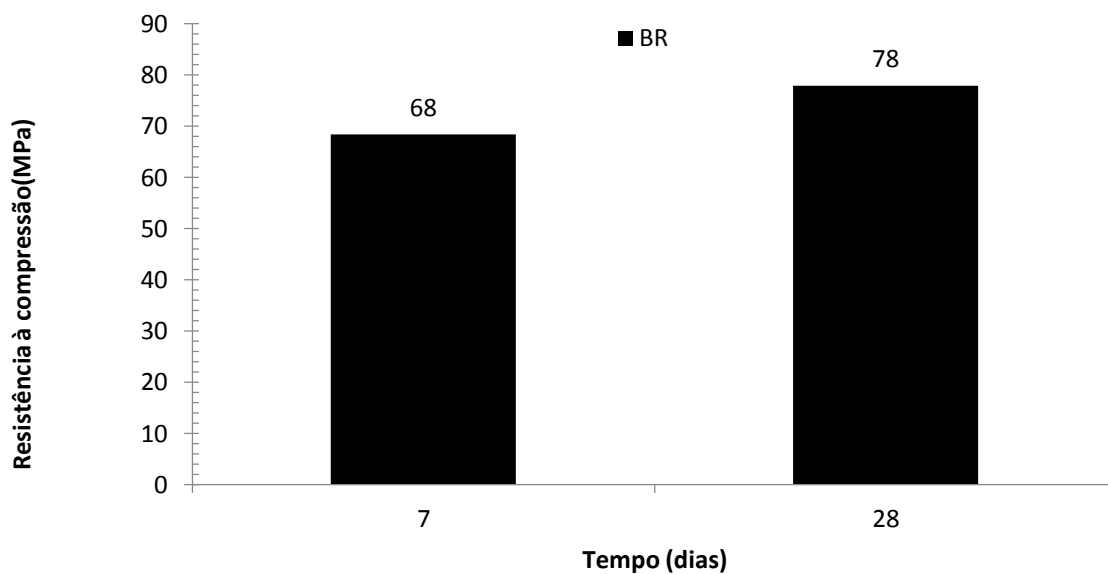


Figura 35 – Resistência à compressão do betão de referência

Na Figura 35 podemos ver a evolução da resistência à compressão da composição BR ao longo dos 28 dias. O betão de referência tem uma classe de resistência à compressão C55/67 que servirá como ponto de comparação com as restantes composições.

4.2.2. Composições com dióxido de titânio

Quadro 17 - Dados resistência à compressão do betão com dióxido de titânio

Composição	Tempo (dias)	Carga de rotura (KN)	Resistência à compressão (MPa)	Classe resistência à compressão
B 1% TiO ₂	7	1547	69	C60/75
	28	1770	79	
B 2% TiO ₂	7	1455	65	C55/67
	28	1733	77	
B 3% TiO ₂	7	1338	59	C55/67
	28	1621	72	

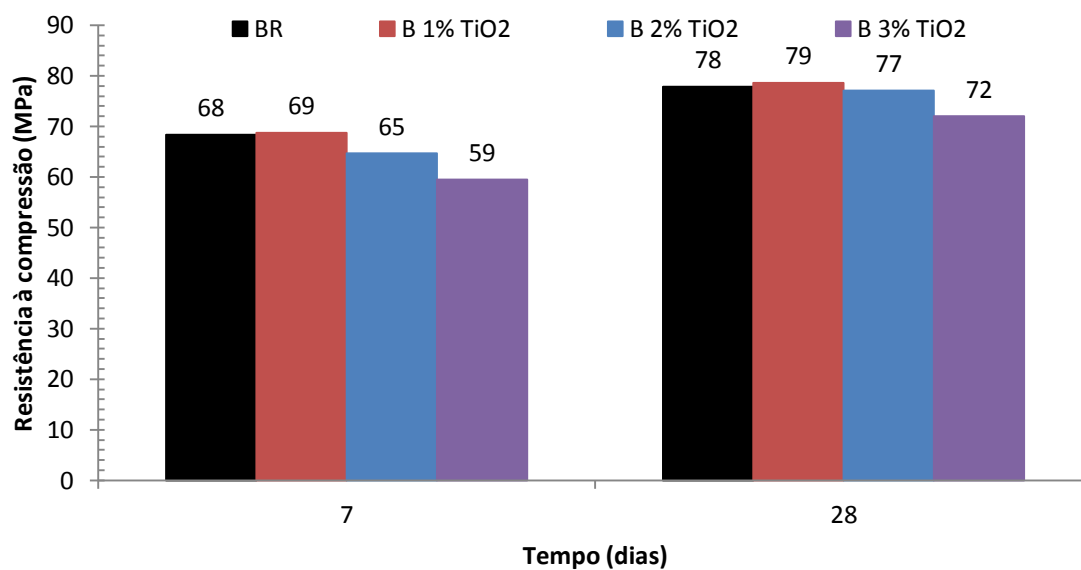


Figura 36- Resistência à compressão do betão com TiO₂

Com base na análise do Quadro 17 e da Figura 36, os resultados mostram que as composições com substituição parcial de cimento Portland por 1% de nano-partículas de TiO₂ apresentam uma resistência à compressão similar à resistência à compressão do betão de referência. Tanto para os 7 dias de cura como para os 28 dias de cura. Este fenómeno deverá estar relacionado com o efeito filler da referida substituição. Verifica-se também

que o aumento da percentagem de nano-partículas de TiO_2 é responsável por um decréscimo na resistência à compressão. Tanto para os 7 dias de cura como para os 28 dias de cura. Apesar disso o decréscimo da resistência à compressão é maior em idades iniciais. Tal poderá dever-se a uma dispersão ineficaz das nano-partículas de TiO_2 na matriz cimentícia. A utilização de uma percentagem de 1% de nano-partículas de TiO_2 parece corresponder a um valor ótimo. Quando comparado com o betão de referência a composição com 3% de nano-partículas de TiO_2 apresenta um decréscimo da resistência à compressão de 13% aos 7 dias de cura, o qual se reduz para 8% aos 28 dias de cura. O que significa que a hidratação da matriz cimentícia é potenciada pela presença das nano-partículas.

4.2.3. Composições com cinzas volantes

Quadro 18 - Dados resistência à compressão do betão com cinzas volantes

Composição	Tempo (dias)	Carga de rotura (KN)	Resistência à compressão (MPa)	Classe resistência à compressão
B 30%CV	7	1126	50	C50/60
	28	1523	68	

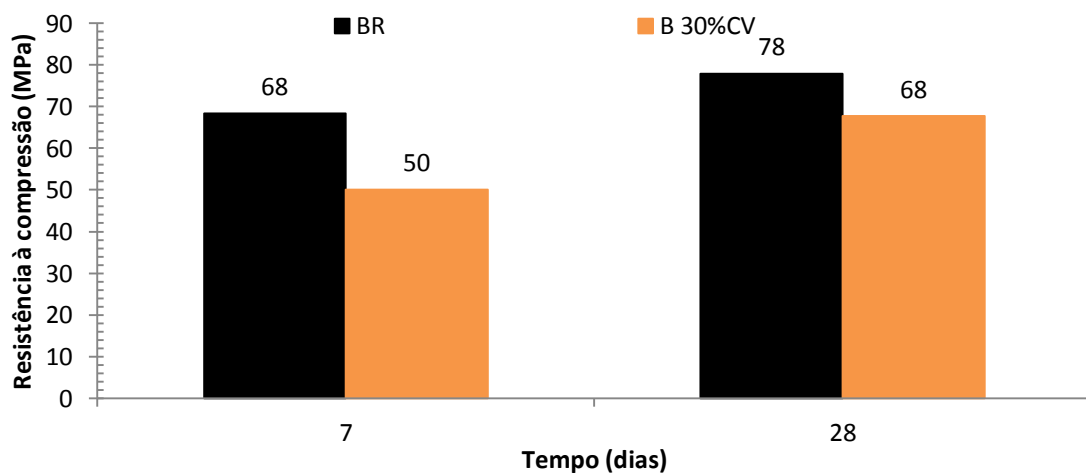


Figura 37 - Resistência à compressão do betão com cinza volante

Com base na análise do Quadro 18 e da Figura 37, podemos verificar que com a incorporação de 30% cinzas volantes como substituição do cimento, a resistência à compressão vai diminuir cerca de 26,47% aos 7 dias e 12,82% aos 28 dias. Podemos ver que com o aumento da idade do betão a diferença de resistência vai diminuir. Esta situação deve-se ao facto das cinzas volantes serem consideradas pozolânicas pouco reativas, tornando o betão pouco resistente na fase inicial e a longo prazo a reação vai ser maior, aumentando a sua resistência. No betão de referência, aos 28 dias, a sua resistência à compressão vai estagnar, enquanto que o betão com cinzas volantes demora cerca de 56 a 90 dias para que a resistência à compressão estagne.

4.2.3. Composições com cinzas volantes e dióxido de titânio

Quadro 19 - Dados resistência à compressão do betão com cinzas volantes e dióxido de titânio

Composição	Tempo (dias)	Carga de rotura (kN)	Resistência à compressão (MPa)	Classe resistência à compressão
B	7	1170	52	C55/67
30%CV+1%TiO ₂	28	1712	76	

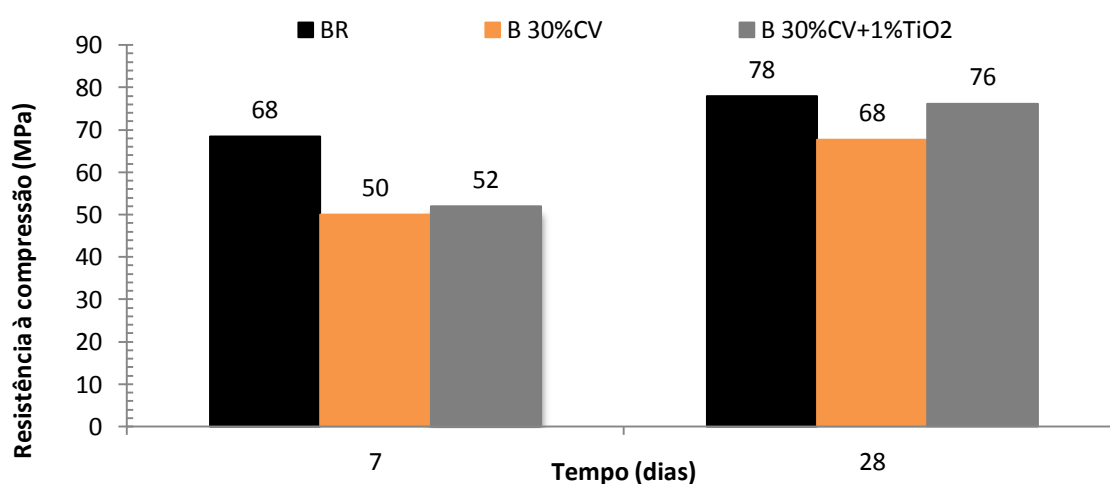


Figura 38 - Resistência à compressão do betão com 30% cinzas volante e 1% TiO₂

Com base na análise do Quadro 19 e da Figura 38, podemos verificar que a composição B 30% CV + 1% TiO₂, a resistência à compressão vai diminuir cerca de 23,53% aos 7 dias e 2,56% aos 28 dias comparativamente com o BR. Podemos ver que, com o aumento da idade do betão, a diferença de resistência vai diminuir consideravelmente, pelas razões explicadas anteriormente. Os resultados mostram ainda que a presença das nano-partículas de TiO₂ contribui para minimizar a perda de resistência provocada pelas cinzas volantes mas apenas para a idade de cura de 28 dias. Em idades iniciais a contribuição daquelas para a resistência à compressão da composição com cinzas volantes é praticamente nula.

Assim, podemos concluir que a resistência à compressão que a composição B 30% CV + 1% TiO₂ muito provavelmente vai ultrapassar a resistência à compressão do betão de referência. Tal comportamento torna esta composição muito boa em termos de resistência à compressão e em termos económicos e com uma trabalhabilidade muito melhor como verificado no capítulo 4.1.

Para melhor comparação entre todas as composições no Quadro 20 e Figura 39 estão representados todos os resultados de resistência à compressão.

Os resultados comprovam a ação do nano TiO₂ em termos de acelerar a reação pozolânica, verificando assim o aumento da resistência à compressão.

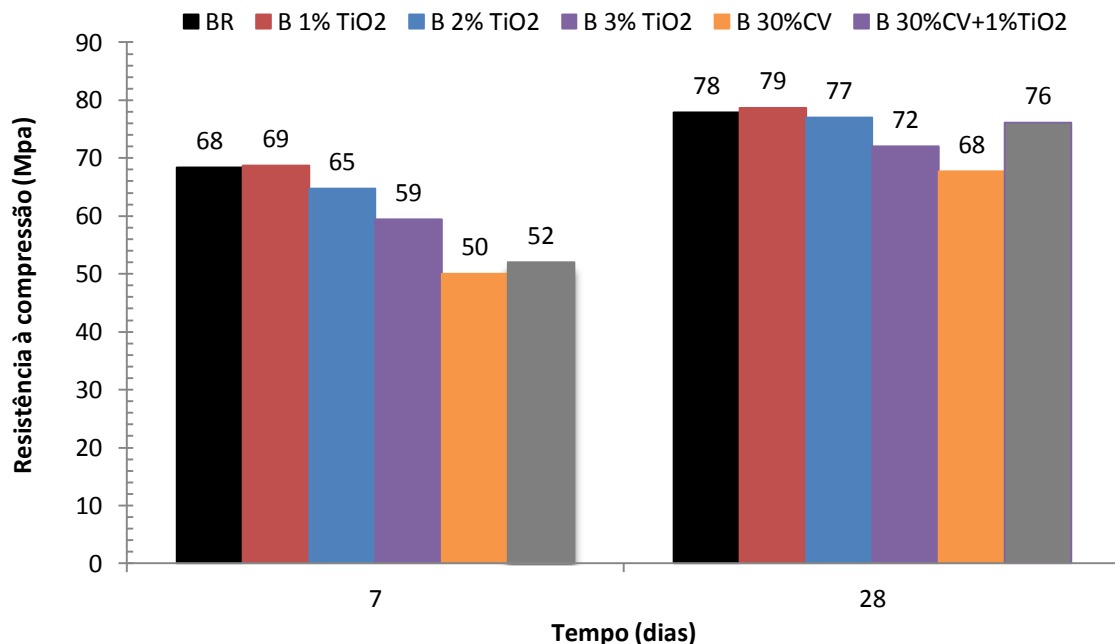


Figura 39 - Resistência à compressão de todas as composições

Quadro 20 - Dados resistência à compressão de todas as composições

Composição	Tempo (dias)	Carga de ruptura (KN)	Resistência à compressão (MPa)	Classe resistência à compressão
BR	7	1538	68	C55/67
	28	1752	78	
B 1% TiO ₂	7	1547	69	C60/75
	28	1770	79	
B 2% TiO ₂	7	1455	65	C55/67
	28	1733	77	
B 3% TiO ₂	7	1338	59	C55/67
	28	1621	72	
B 30%CV	7	1126	50	C50/60
	28	1523	68	
B 30%CV+1%TiO ₂	7	1170	52	C55/67
	28	1712	76	

4.3. Absorção de água por imersão

Neste capítulo, para melhor compreensão dos resultados da absorção de água por imersão, optou-se por uma apresentação conjunta dos resultados obtidos das 6 composições estudadas (Quadro 21 e Figura 40). A análise da absorção de água por imersão será feita ao resultado médio de 3 provetes cúbicos de (100x100x100) (mm³) ensaiados aos 28 dias.

A absorção de água por imersão pode ser influenciada pelo tipo de provete, dimensões, idade do betão, do tipo de cura do betão, por estas razões a especificação do LNEC E 394 (1993) recomenda a execução deste ensaio a um betão com idade mínima de 28 dias.

No Anexo 2 encontram-se todos dados, resultados intermédios e finais de cada provete ensaiado correspondente ao ensaio de absorção de água por imersão.

Quadro 21 – Resultados da absorção de água por imersão de todas as composições

Mistura	Secção (mm ³)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	Absorção (%)
BR	100x100x100	2276,4	1406,5	2399,3	12,4
B 1% TiO ₂	100x100x100	2289,8	1412,5	2413,9	12,4
B 2% TiO ₂	100x100x100	2255,5	1382,6	2382,0	12,7
B 3% TiO ₂	100x100x100	2254,0	1392,0	2392,9	13,9
B 30%CV	100x100x100	2305,0	1399,5	2405,3	10,0
B 30%CV+1%TiO ₂	100x100x100	2280,1	1374,1	2369,1	8,9

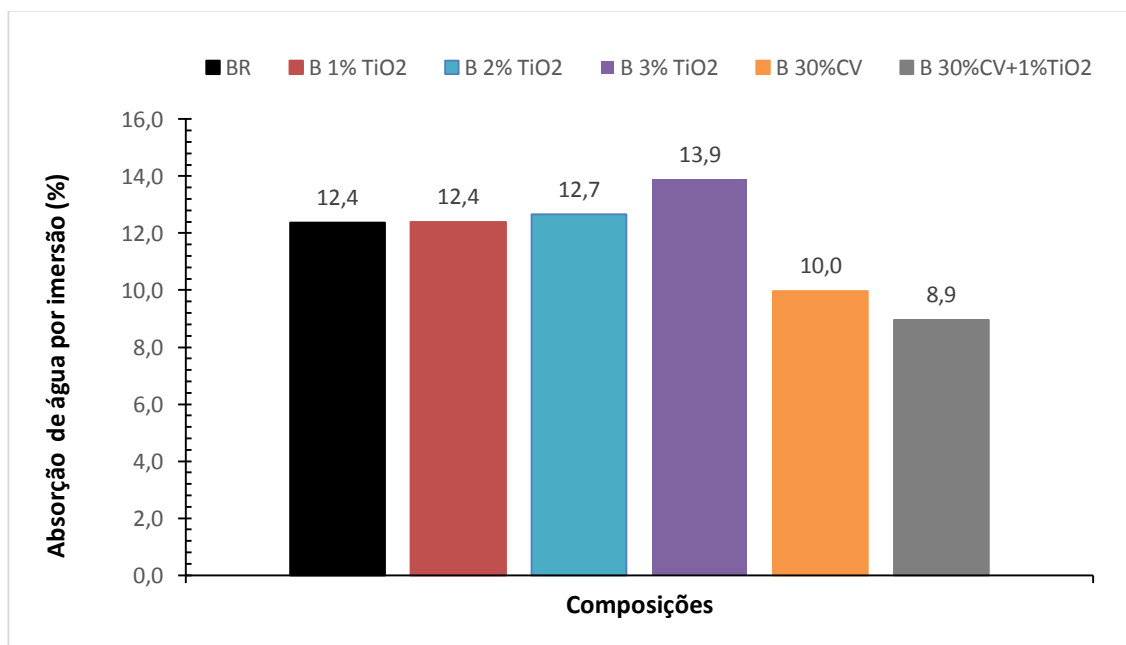


Figura 40 - Resultados da absorção de água por imersão de todas as composições

Com base na análise do Quadro 21 e da Figura 40, podemos verificar que quanto maior a percentagem de nano-partículas de TiO_2 incorporada no betão a variação de absorção de água entre o BR e a composição com nano-partículas de TiO_2 é praticamente nula, verificando apenas que na composição B 3% TiO_2 há um aumento da absorção de água por imersão de 12,10% relativamente ao betão de referência. Nas composições B 30%CV e B 30%CV + 1% TiO_2 a absorção de água por imersão já é menor relativamente ao betão de referência cerca de 19,35% e 28,23%. Podemos verificar que a composição B 30% CV + 1% TiO_2 é a composição que menor absorção de água por imersão. Podemos então concluir que a composição B 30% CV + 1% TiO_2 é menos porosa que os restantes betões, sendo assim mais resistente à entrada da água no seu interior que, consequentemente, vai diminuir a corrosão das armaduras existentes em estruturas com este tipo de betão. Isto deve-se também ao facto do nano TiO_2 ter acelerado a reação pozolânica e isso ter gerado mais compostos CSH que resultam numa diminuição da porosidade da matriz cimentícia.

4.4. Absorção de água por capilaridade

A análise dos resultados da absorção de água por capilaridade será feita através da representação de curvas, as quais traduzem a variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em contacto com a água em função da raiz quadrada do tempo. Por questões de facilidade, a análise dos resultados será feita para os intervalos de tempo, 0, 10, 20, 30, 60, 180, 1440 e 4320 minutos, embora tenha sido verificado a quantidade de água absorvida para mais tempos, como referido no capítulo 3.3.6.

A análise da absorção de água por capilaridade será feita ao resultado médio de 3 provetes cúbicos de (100x100x100) (mm^3) ensaiados aos 28 dias para todas as composições.

A absorção de água por capilaridade pode ser influenciada pelo tipo de provete, dimensões, idade do betão e do tipo de cura do betão.

No Anexo 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 encontram-se todos dados, resultados intermédios e finais de cada provete ensaiado correspondente ao ensaio de absorção de água por capilaridade.

No Quadro 22 são apresentados os resultados obtidos do ensaio da absorção de água por capilaridade para o betão de referência, no qual se pode ver a sua evolução ao longo do tempo (Figura 41), do qual se obteve o coeficiente de absorção de água por capilaridade (Figura 42), através da inclinação da curva de absorção de água por capilaridade.

Quadro 22 - Absorção de água por capilaridade de todas as composições

Composição	Absorção de água por capilaridade (kg/m ²)							
	Tempo (minutos)							
	0	10	30	60	120	180	1440	4320
BR	0,00	0,26	0,36	0,49	0,71	0,97	3,13	4,30
B 1% TiO ₂	0,00	0,25	0,37	0,53	0,85	1,14	4,35	6,59
B 2% TiO ₂	0,00	0,24	0,34	0,47	0,77	1,02	3,69	5,57
B 3% TiO ₂	0,00	0,38	0,56	0,81	1,21	1,53	4,77	6,97
B 30%CV	0,00	0,25	0,36	0,43	0,59	0,77	2,24	3,33
B 30%CV + 1%TiO ₂	0,00	0,18	0,25	0,29	0,39	0,49	1,58	2,68

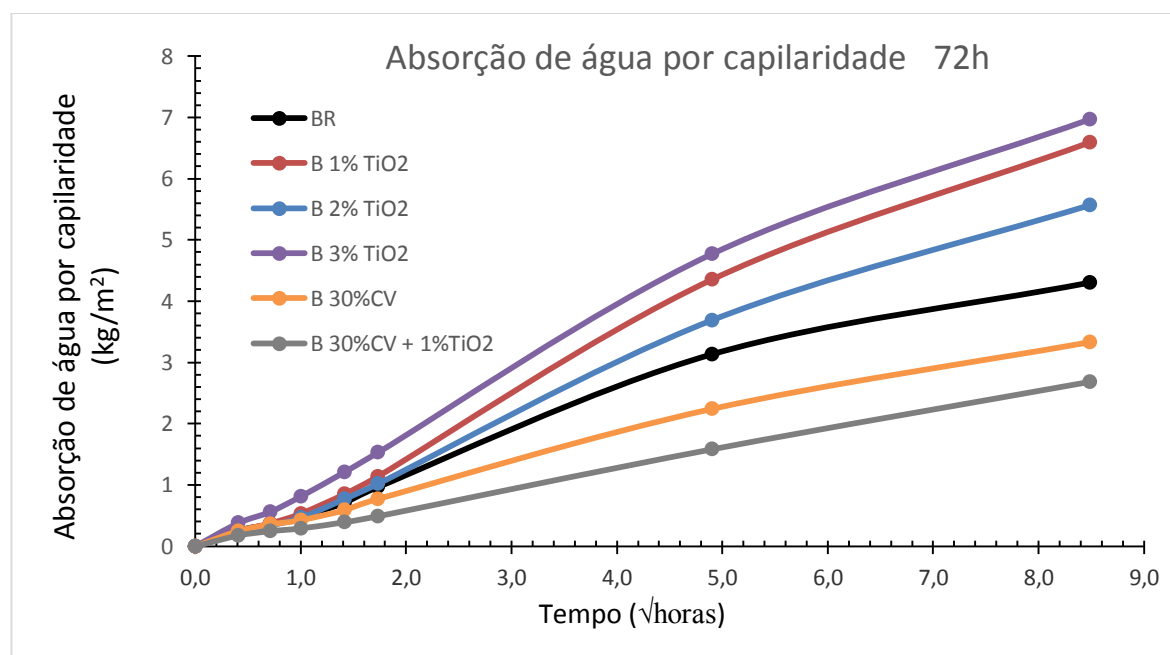


Figura 41 - Absorção de água por capilaridade de todas as composições

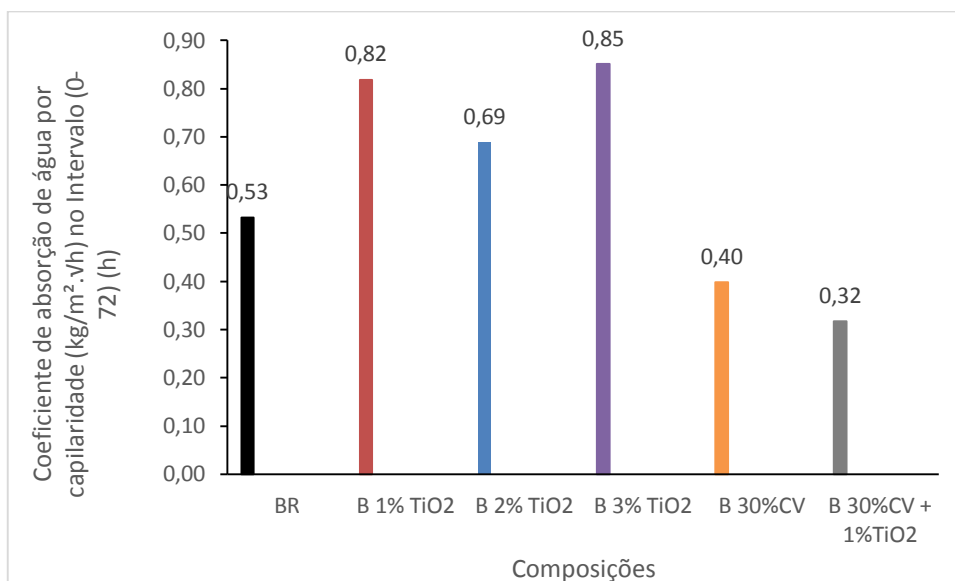


Figura 42 Coeficiente de absorção de água por capilaridade de todas as composições

Analisando o Quadro 22 e a Figura 41 e 42, podemos verificar que com a incorporação de TiO₂ no betão, estes vão absorver mais água. Esta ocorrência deve-se ao facto de o TiO₂ originar a presença de mais vazios no betão, provocando assim uma maior absorção de água, observando também um aumento do coeficiente de absorção de água por capilaridade com o aumento da incorporação de nano-partículas de TiO₂.

Também podemos verificar que com a incorporação de cinzas volantes, este vai absorver menos água, ao contrário da composição com nano-partículas de TiO₂. Esta ocorrência deve-se ao facto da cinza volante ter gerado mais compostos CSH que resultaram numa matriz cimentícia mais compacta e com menores poros capilares, provocando assim uma menor absorção de água, observando também uma diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade com a incorporação de cinzas volantes. Verifica-se que a composição B 30% CV + 1% TiO₂ é a composição com menor absorção de água por capilaridade e menor coeficiente de absorção de água por capilaridade. Podemos afirmar que este resultado deve-se ao facto do nano TiO₂ ter acelerado a reação pozolânica e ter gerado mais compostos CSH que resultaram numa matriz cimentícia mais compacta e com menores poros capilares.

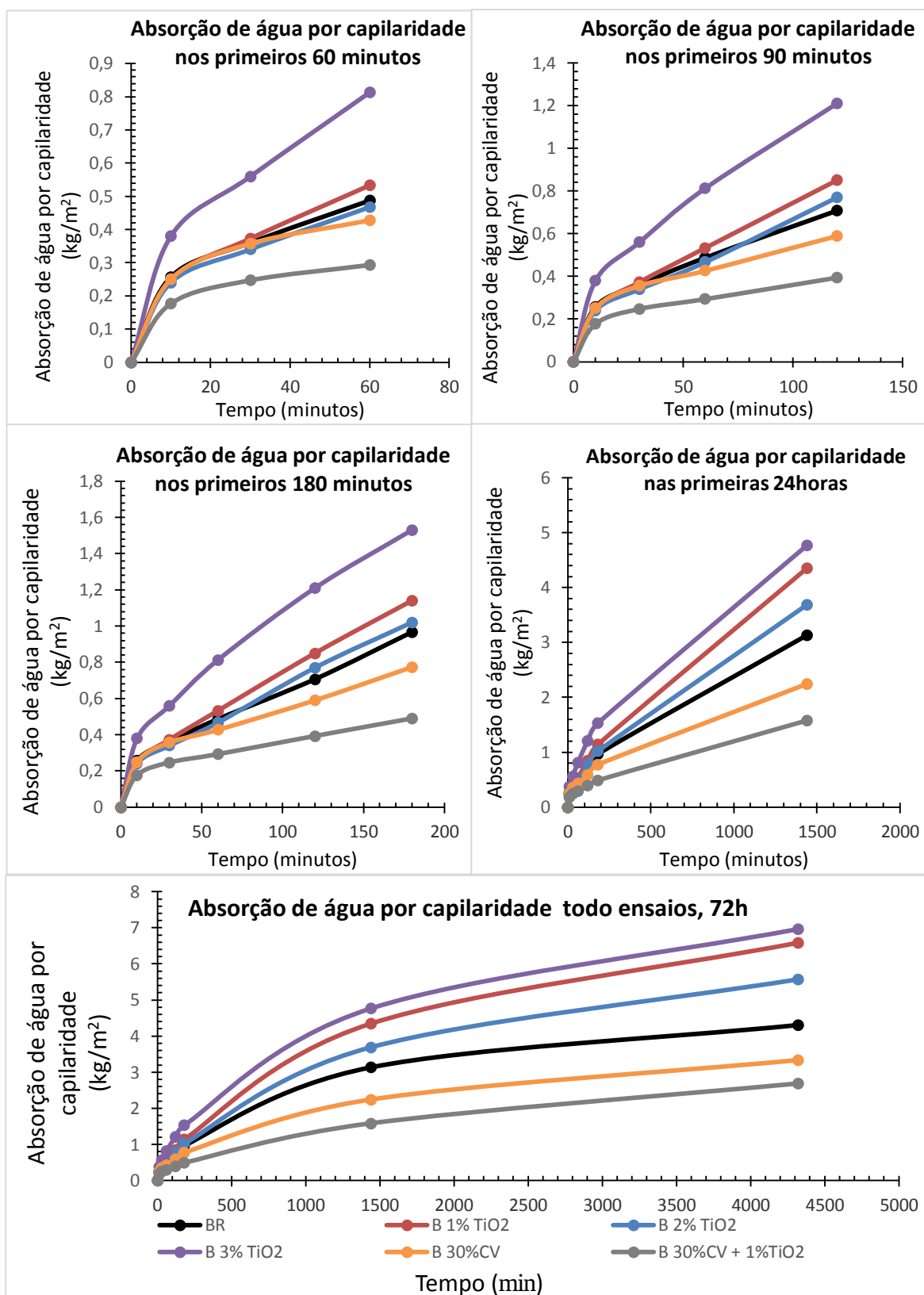


Figura 43 – Ensaio de absorção de água por capilaridade de todas as composições para os tempos, 60 minutos, 90 minutos, 180 minutos, 24 horas e 72 horas

Analisando a evolução da absorção de água por capilaridade (Figura 43) podemos verificar que existem três inclinações distintas da curva no decorrer do tempo. Na primeira fase da curva, com maior inclinação, dá-se o preenchimento dos capilares com maior diâmetro com uma duração de 10 minutos, na segunda inclinação, representando o processo mais lento, dá-se o preenchimento dos capilares mais finos dos 10 minutos até aos 180 minutos, na última inclinação, representa a estabilização da água absorvida.

Analisando a Figura 43, verifica-se que até aos 30 minutos a composição B 30%CV absorve mais água do que a composição B 2%TiO₂ devido à existência de capilares de maior diâmetro, a partir desse tempo a absorção de água vai ser menor do que a composição BR e B2%TiO₂. Também se verifica que a partir dos 80 minutos a composição B 2%TiO₂ começa a absorver mais água do que a composição BR devido à existência de maior quantidade de capilares mais finos. A partir dos 80 minutos, a evolução da absorção de água por capilaridade vai ser idêntica para todas as composições, não havendo grande variação entre as composições.

4.5. Difusão de cloretos por migração em regime não estacionário

Neste capítulo para melhor compreensão dos resultados da difusão de cloretos por migração em regime não estacionário, optou-se por uma apresentação conjunta dos resultados obtidos das 6 composições estudadas. A análise da difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário será feita relativamente ao resultado médio de três provetes cilíndricos (Ø100xH50) (mm³) aos 28 dias.

No Anexo 15 encontram-se todos dados, resultados intermédios e finais de cada provete ensaiado correspondente ao ensaio difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário.

Este ensaio consiste na transferência de massa por movimento das moléculas ou iões sob ação de um potencial químico de uma zona de elevada concentração para uma zona de baixa concentração, este movimento dos iões provocado por ação de um campo elétrico externo.

Na Figura 44 podemos verificar a profundidade de penetração de todas as composições.



Figura 44 – Amostras de todas as composições relativamente à penetração de cloretos do ensaio de difusão

Quadro 23 – Resultados difusão de cloretos de todas as composições

Composição	Profundidade de penetração dos iões cloreto (mm3)	D_{NSSM} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)
BR	17,67	8,03
B 1% TiO ₂	17,08	8,99
B 2% TiO ₂	16,34	8,82
B 3% TiO ₂	18,75	10,24
B 30%CV	16,78	5,12
B 30%CV+1%TiO ₂	13,45	3,89

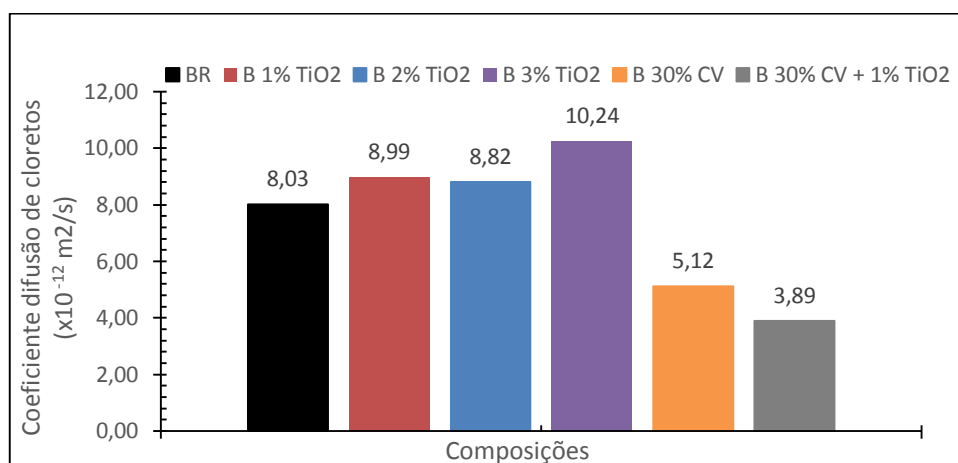


Figura 45 - Resultados difusão de cloretos de todas as composições

Analisando o Quadro 23 e Figura 45, podemos verificar que com o aumento da percentagem de incorporação de 1%, 2%, 3% de nano-partículas de TiO₂ há um aumento da profundidade e por conseguinte um aumento de 11,96%, 9,84% e 27,52 % do coeficiente de difusão de cloretos em comparação com a composição de referência.

A composição B 30%CV já se verifica um decréscimo de 36,24% no coeficiente de difusão de cloretos relativamente à BR. Já na composição B 30% CV + 1% de TiO₂ verifica-se um decréscimo ainda mais acentuado no coeficiente de difusão de cloretos, cerca de 51,56%. Esta diminuição deve-se ao facto do nano TiO₂ ter acelerado a reação pozolânica e logo ter gerado mais compostos CSH que resultaram numa matriz cimentícia mais compacta e com menores poros capilares, verificando assim que a tal como os ensaios da absorção de água por imersão e por capilaridade a difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário está relacionada com a porosidade da matriz do betão.

Podemos verificar que a composição B 30% CV e B 1% TiO₂, é a composição com maior resistência à penetração de cloretos por migração em regime não estacionário.

Segundo Gjörv [52] apud Camões et al [53] podemos classificar a resistência à penetração de cloretos baseada nos resultados do ensaio NT Built 492, apresentados no Quadro 28.

Quadro 24 - Resistência à penetração de cloretos baseada nos resultados do ensaio NT
Build 492

D_{NSM} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	Resistência do betão
>15	reduzida
10 -15	moderada
5 -10	elevada
2,5-5	muito elevada
<2,5	ultra elevada

Segundo o Quadro 24, podemos verificar que as composições BR, B 1%TiO₂, B 2%TiO₂ e B 30%CV têm uma resistência à penetração de cloretos elevada, a composição B 3%TiO₂ já apresenta uma resistência moderada, e a composição B 30% + 1% TiO₂ já apresenta uma resistência muito elevada, sendo a melhor composição em termos de resistência à penetração de cloretos.

4.6. Ataque químico

Neste capítulo, para melhor compreensão dos resultados do ataque químico, optou-se por uma apresentação dos resultados das 6 composições estudadas por composição comparando-a com a composição de referência. A análise do ataque químico será feita à perda de massa/degradação média de três provetes cúbicos de (100x100x100) (mm³) aos 28 dias, submetidos numa solução de 10% de ácido sulfúrico aos 0, 1, 7, 14, 35, 56 dias, sendo o resultado da perda de massa apresentado em forma de gráfico. No Anexo 16,17 e 18 encontram-se todos dados, resultados intermédios e finais de cada provete ensaiado correspondente ao ensaio de ataque químico.

4.6.1 Composição de referência

Quadro 25 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição de referência

Composição	Ataque químico					
	%					
	Tempo (Dias)					
	0	1	7	14	35	56
BR	0,00	1,63	9,36	17,62	40,95	58,67

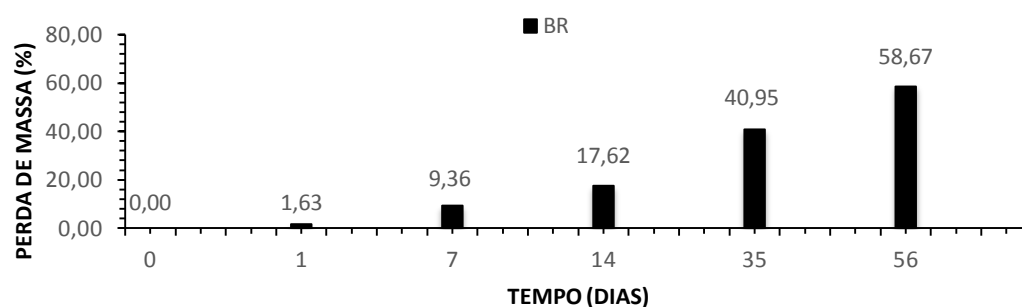


Figura 46 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição de referência

Analisando o Quadro 25 e Figura 46 podemos verificar que a degradação da composição BR é bem visível aos 56 dias, verificando uma perda de massa de 58,67%. No Quadro 26 é possível observar tal perda através do seu aspeto.

Quadro 26 – Amostras do ensaio de ataque químico da composição de referência

BR					
T=0	T=1	T=7	T=14	T=35	T=56
					

4.6.2 Composições com dióxido de titânio

Quadro 27 - Resultados do ensaio de ataque químico das composições com dióxido de titânio

Composição	Ataque químico					
	%					
	Tempo (Dias)					
	0	1	7	14	35	56
B 1%TiO ₂	0,00	1,94	9,16	16,89	40,14	57,34
B 2%TiO ₂	0,00	2,03	9,75	18,53	42,87	60,85
B 3%TiO ₂	0,00	1,65	10,79	19,98	45,43	63,68

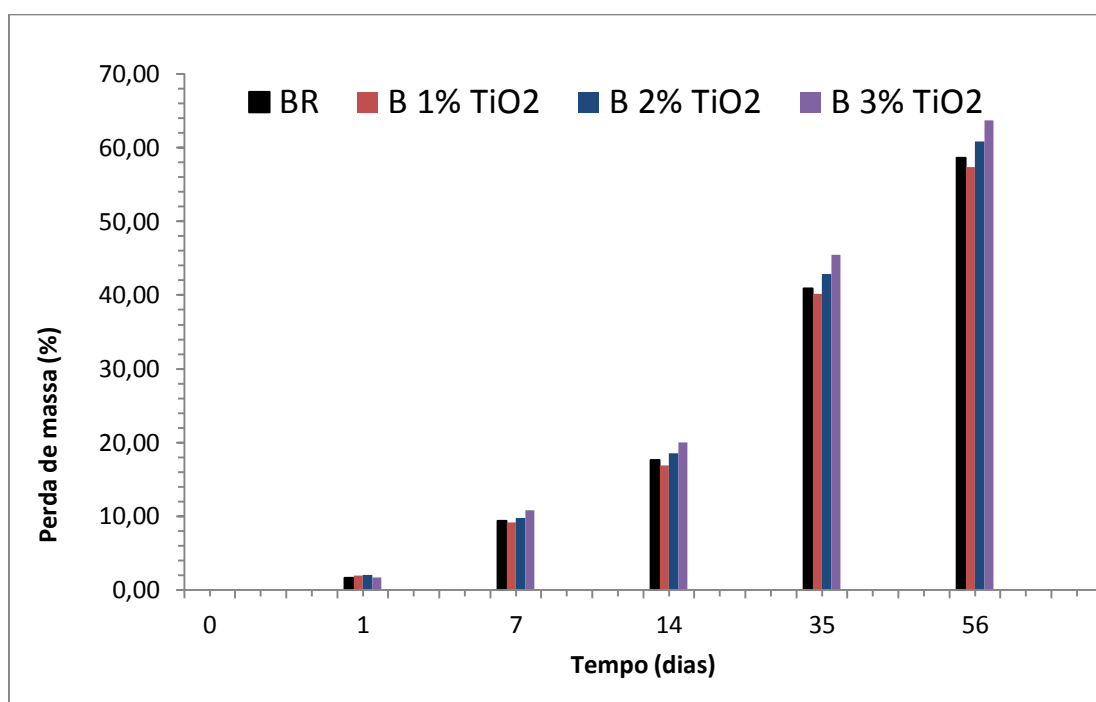
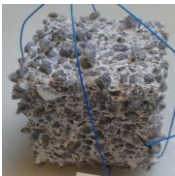


Figura 47 - Resultados do ensaio de ataque químico das composições com dióxido de titânio

Analisando o Quadro 27 e Figura 47 podemos verificar que com o aumento da incorporação da percentagem de nano-partículas de TiO₂ no betão a degradação do betão vai aumentar.

Comparativamente à composição de referência com o incremento de apenas 1% de TiO_2 , esta terá uma perda de massa menor, cerca de 2,27% menor que a composição de referência aos 56 dias. Contudo, para as composições B 2% TiO_2 e B 3% TiO_2 a perda de massa é maior comparativamente à BR, cerca de 3,72%, 8,54% respetivamente. No Quadro 28 é possível verificar tal perda através do seu aspeto.

Quadro 28 - Amostras do ensaio de ataque químico das composições com dióxido de titânio

B 1% TiO_2					
T=0	T=1	T=7	T=14	T=35	T=56
					
B 2% TiO_2					
T=0	T=1	T=7	T=14	T=35	T=56
					
B 3% TiO_2					
T=0	T=1	T=7	T=14	T=35	T=56
					

4.6.3 Composição com cinzas volantes

Quadro 29 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volantes

Composição	Ataque químico					
	%					
	Tempo (Dias)					
	0	1	7	14	35	56
B 30% CV	0,00	0,96	10,14	20,86	49,31	67,84

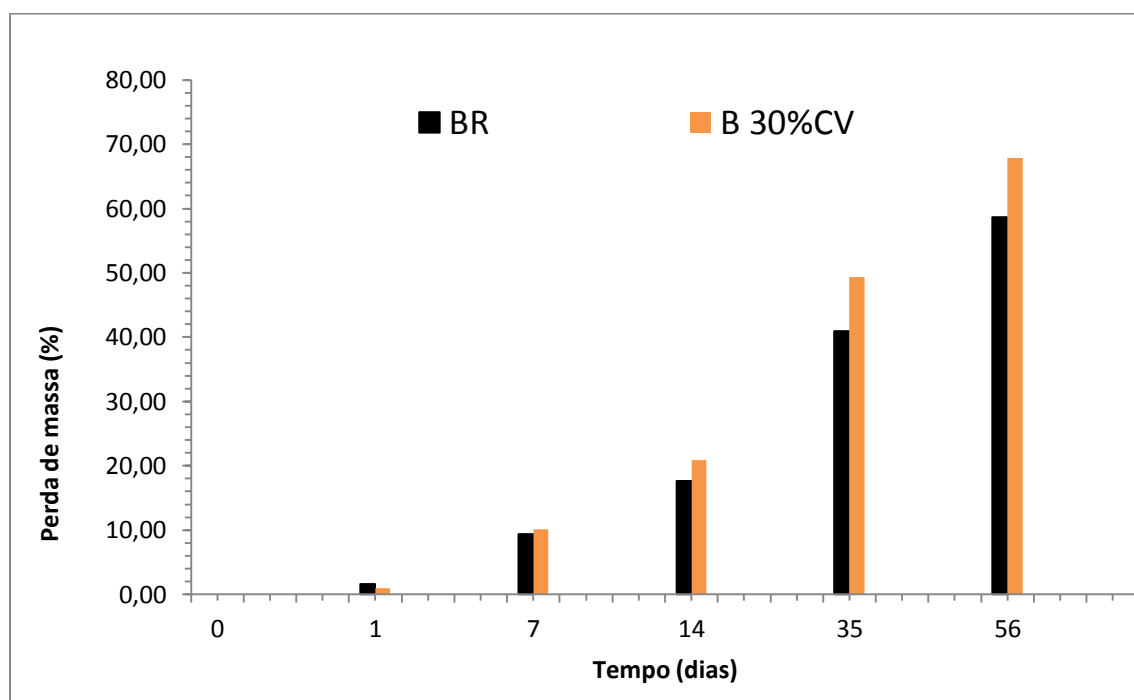


Figura 48 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volantes

Analisando o Quadro 29 e Figura 48 podemos verificar que a composição B 30% CV comparativamente com a BR a perda de massa é maior, cerca de 15,63% aos 56 dias. No Quadro 30 é possível verificar tal perda através do seu aspeto.

Quadro 30 - Amostras do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volantes

B 30%CV					
T=0	T=1	T=7	T=14	T=35	T=56
					

4.6.4 Composição com cinzas volantes e dióxido de titânio

Quadro 31 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volante e dióxido de titânio

Composição	Ataque químico					
	%					
	Tempo (Dias)					
	0	1	7	14	35	56
B 30% CV + 1% TiO ₂	0,00	2,06	10,70	22,32	51,42	70,10

Analisando o Quadro 31 e Figura 49 podemos verificar que a composição B 30% CV + 1% TiO₂ comparativamente com a BR a perda de massa é maior, cerca de 19,48% aos 56 dias. No Quadro 32 é possível verificar tal perda através do seu aspeto.

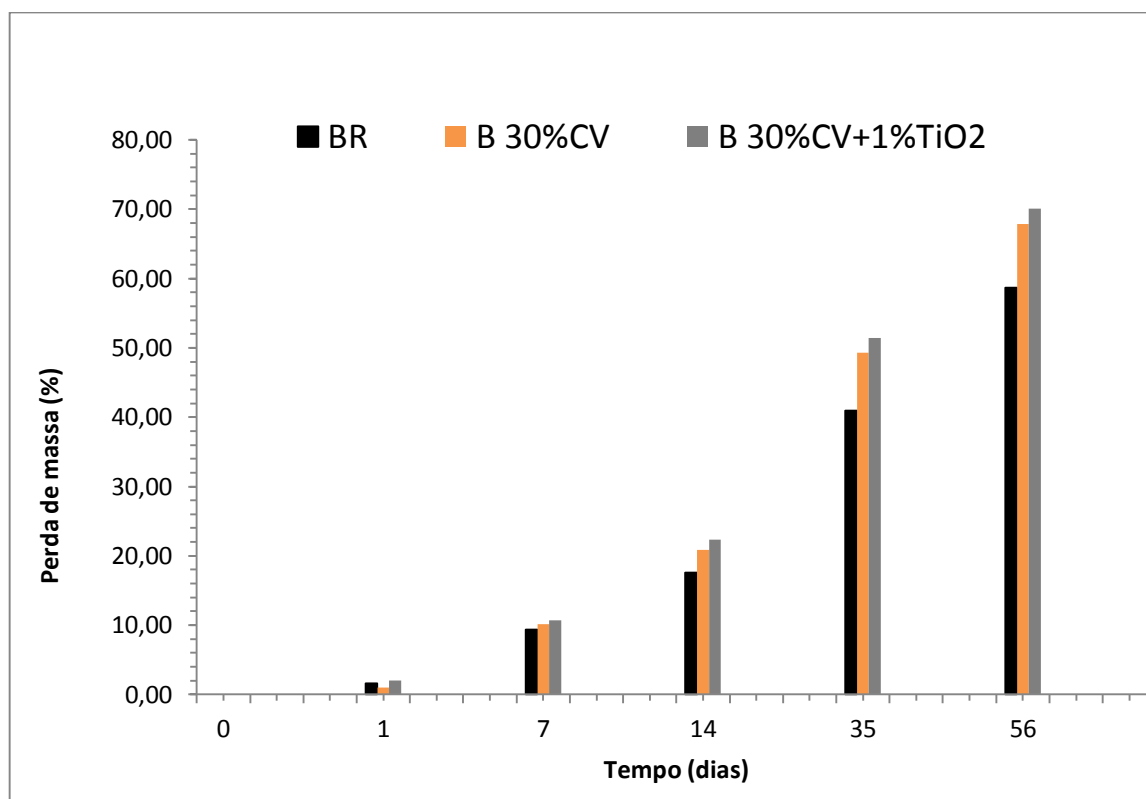
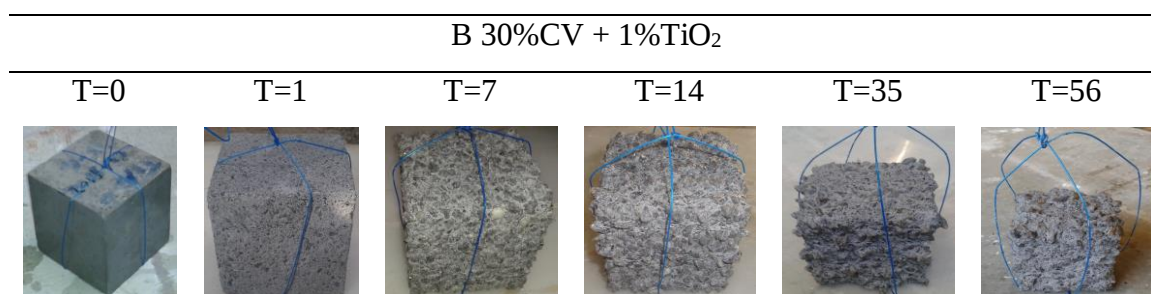


Figura 49 - Resultados do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volante e dióxido de titânio

Quadro 32 - Amostras do ensaio de ataque químico da composição com cinzas volantes e dióxido de titânio



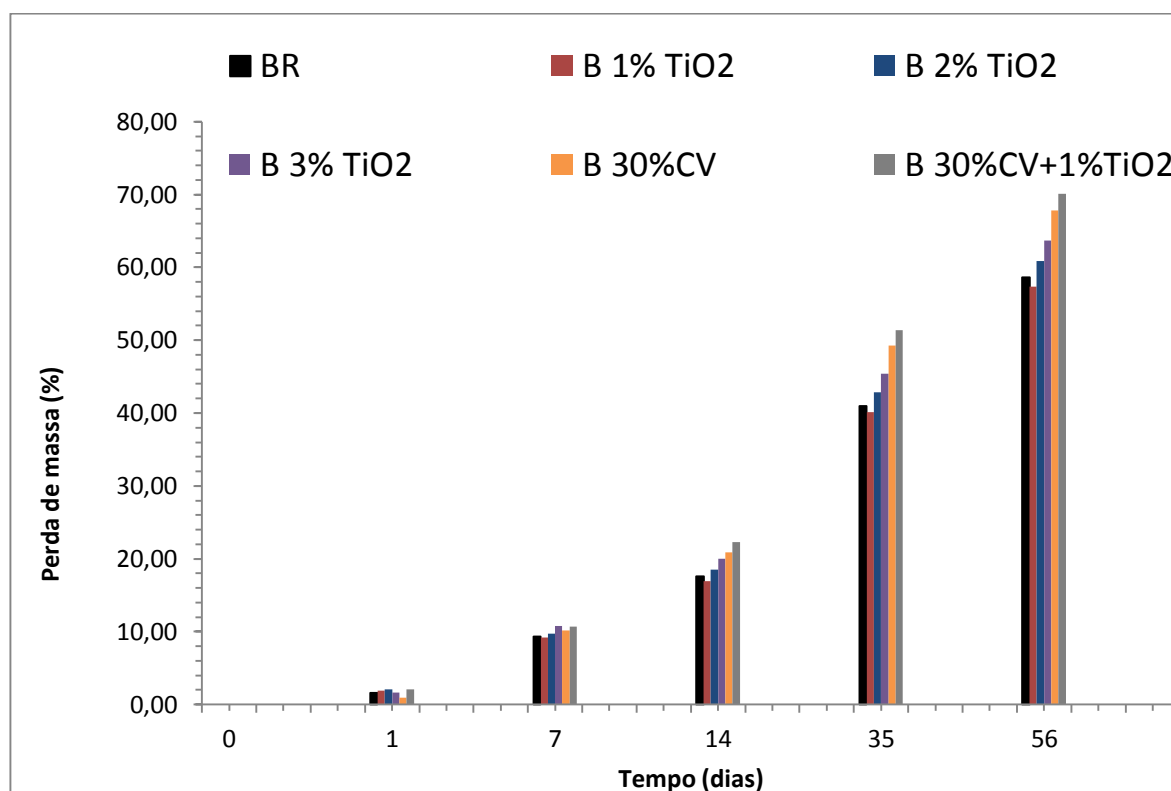


Figura 50 - Resultados do ensaio de ataque químico de todas as composições

Analisando a Figura 50 podemos verificar que a composição B 1% de TiO₂ é a que apresenta maior resistência ao ataque químico de ácido sulfúrico.

Analisando a Figura 50 verifica-se que ao longo do decorrer do ensaio, todas as composições demonstraram uma crescente degradação, onde os provetes vão perdendo as suas formas retilínea, ficando com um aspeto irregular e disforme.

Os resultados mostram que as nano-partículas de TiO₂ contribuiu para uma matriz cimentícia mais compacta e com compostos menos solúveis e logo mais resistente ao ataque ácido sulfúrico.

4.7. Ultra sons

Neste capítulo, para melhor compreensão dos resultados do ensaio de ultra sons, optou-se por uma apresentação conjunta dos resultados obtidos das 6 composições estudadas. A análise da velocidade de propagação será feita ao resultado de um provetes cúbicos de (100x100x100) (mm³) aos 7 e 28 dias. Será analisado dois tipos de transmissões, duas diretas e três semi-diretas, nas quais serão analisadas separadamente e ao resultado médio.

Este ensaio consiste na medição da velocidade de propagação de uma onda longitudinal percorrida num determinado comprimento.

No Anexo 19 encontram-se todos dados, resultados intermédios e finais de cada provete ensaiado correspondente ao ensaio ultra sons.

Quadro 33 – Resultados do ensaio ultra sons por transmissão direta de todas as composições

Composição	Transmissão	L (mm ³)	Tempo (Dias)	T (u.s)	V (m/s)
BR	Direto	100	7	21,85	4577
			28	21,15	4728
B 1% TiO ₂	Direto	100	7	22,15	4515
			28	20,95	4773
B 2% TiO ₂	Direto	100	7	22,20	4505
			28	21,40	4673
B 3% TiO ₂	Direto	100	7	22,65	4415
			28	21,60	4630
B 30%CV	Direto	100	7	21,30	4695
			28	20,40	4902
B 30%CV+1%TiO ₂	Direto	100	7	21,50	4651
			28	20,70	4831

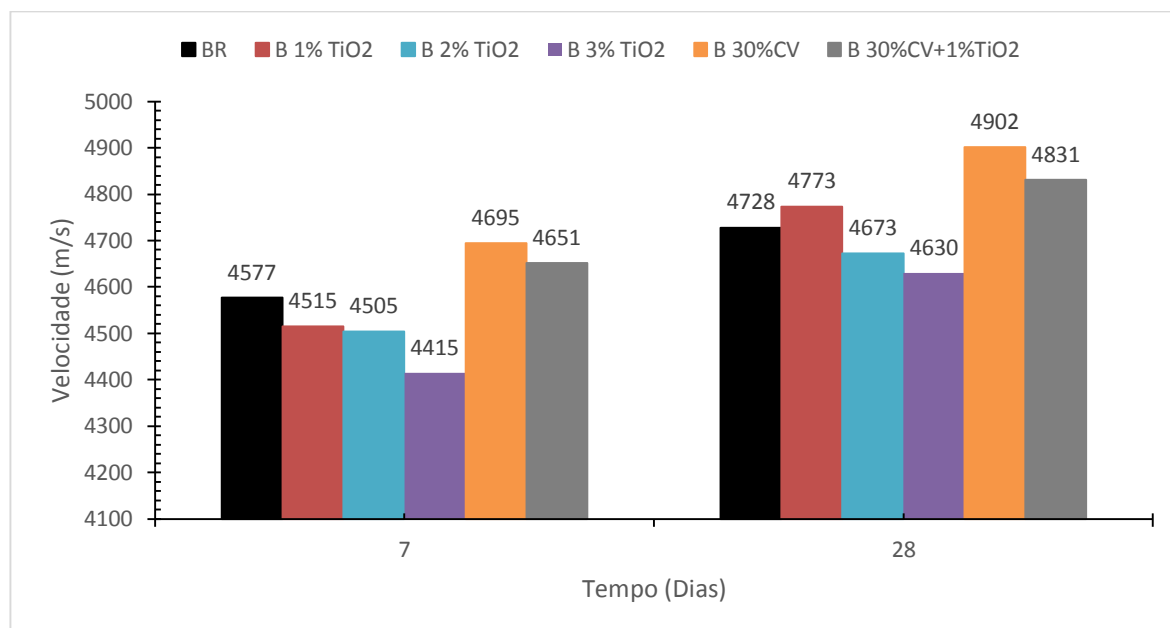


Figura 51 - Resultados do ensaio ultra sons por transmissão direta de todas as composições

Analisando o Quadro 33 e Figura 51 podemos verificar que com o aumento da incorporação da percentagem de nano-partículas de TiO₂ a velocidade da propagação das ondas por transmissão direta diminui, esta situação verifica-se tanto aos 7 dias e 28 dias da idade do betão. Verifica-se também que as composições com B 1% TiO₂, B 2% TiO₂ e B 1% TiO₂ comparativamente com a BR aos 28 dias da idade do betão há uma diferença na velocidade de propagação das ondas de + 0,95%, -1,16% e -2,07%, respetivamente. Este aumento na composição B 1% TiO₂ deve-se ao facto de que o nano TiO₂ contribuiu para uma matriz cimentícia mais compacta e logo com compostos menos solúveis o que se comprova pelas maiores velocidades de propagação de ultra sons.

Também se verifica que dos 7 dias a velocidade de propagação das ondas da composição com B 1% TiO₂ é inferior á BR, enquanto que aos 28 dias a situação já é a inversa.

As composições com cinzas volantes são as composições com maior velocidade de propagação das ondas. Esta ocorrência deve ao facto da nano TiO₂ contribuir para uma matriz cimentícia mais compacta e logo com compostos menos solúveis o que se comprova pelas maiores velocidades de propagação de ultra sons.

Comparativamente com o BR a B 30%CV e B 30%CV + 1% TiO₂ têm uma diferença na velocidade de propagação das ondas de 3,68% e 2,18%, respetivamente.

Segundo [51] podemos classificar todas as composições com uma qualidade do betão excelente (Velocidade de propagação da onda > 4500 m/s), sendo que quanto maior for melhor a qualidade do betão, betões homogéneos, com muito poucos vazios.

Quadro 34 - Resultados do ensaio ultra sons por transmissão semi-direta de todas as composições

Composição	Transmissão	L (mm3)	Tempo (Dias)	T (u.s)	V (m/s)
BR	Semi-Direta	50	7	11,17	4478
			28	11,37	4399
B 1% TiO ₂	Semi-Direta	50	7	11,47	4360
			28	10,70	4673
B 2% TiO ₂	Semi-Direta	50	7	11,77	4249
			28	11,00	4545
B 3% TiO ₂	Semi-Direta	50	7	12,27	4076
			28	11,23	4451
B 30%CV	Semi-Direta	50	7	11,20	4464
			28	10,57	4732
B 30%CV+1%TiO ₂	Semi-Direta	50	7	11,10	4505
			28	10,43	4792

Analisando o Quadro 34 e Figura 52 correspondentes à velocidade de propagação das ondas por transmissão semi-direta comparativamente com o Quadro 33 e Figura 51 correspondentes à velocidade de propagação das ondas por transmissão direta, verifica-se que existe uma ligeira diferença nos resultados. Esta diferença deve-se ao facto do ensaio por transmissão semi-direta não ser tão rigoroso.

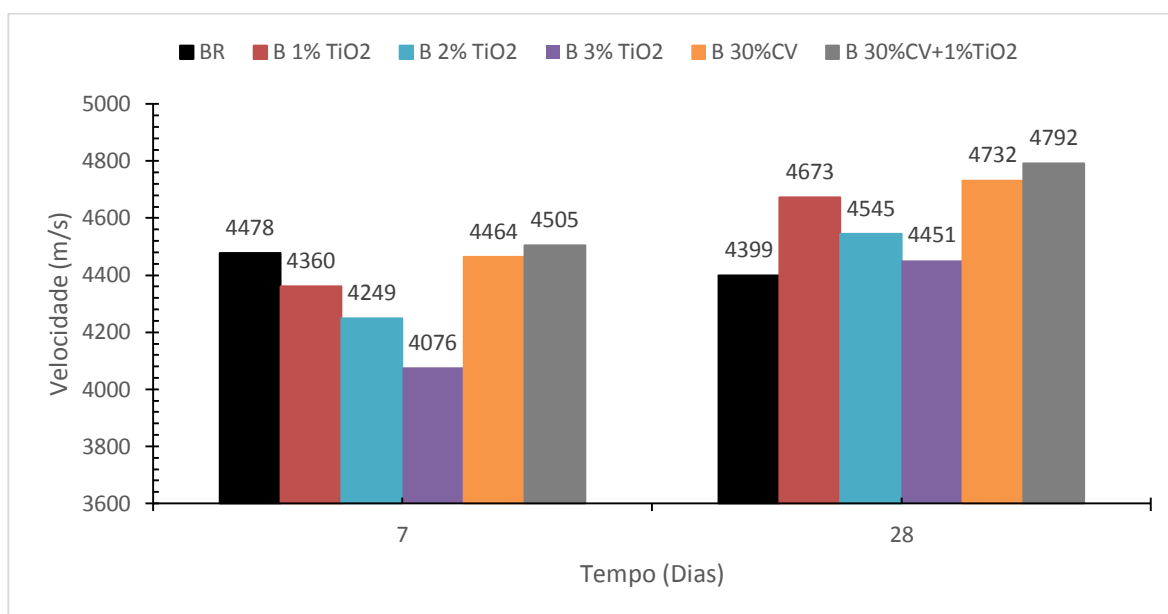


Figura 52 - Resultados do ensaio ultra sons por transmissão semi-direta de todas as composições

4.8. Resistividade elétrica

Neste capítulo, para melhor compreensão dos resultados do ensaio de resistividade elétrica, optou-se por uma apresentação conjunta dos resultados obtidos das 6 composições estudadas. A análise da velocidade de propagação será feita ao resultado de provetes cilíndricos de ($\varnothing 100 \times H 200$) (mm^3) aos 7 e 28 dias e a análise será feita ao resultado médio das três leituras no provete.

Este ensaio consiste em determinar o risco de corrosão do betão, embora não é possível determinar a taxa de corrosão.

No Anexo 20 encontram-se todos dados, resultados intermédios e finais de cada provete ensaiado correspondente ao ensaio de resistividade elétrica.

Quadro 35 – Resultados da resistividade elétrica de todas as composições

Composição	Tempo (dias)	Resistividade elétrica ($\Omega.m$)
BR	7	106,00
	28	155,33
B 1% TiO ₂	7	94,33
	28	135,33
B 2% TiO ₂	7	92,33
	28	132,00
B 3% TiO ₂	7	74,67
	28	104,00
B 30%CV	7	65,00
	28	170,33
B 30%CV+1%TiO ₂	7	72,00
	28	305,00

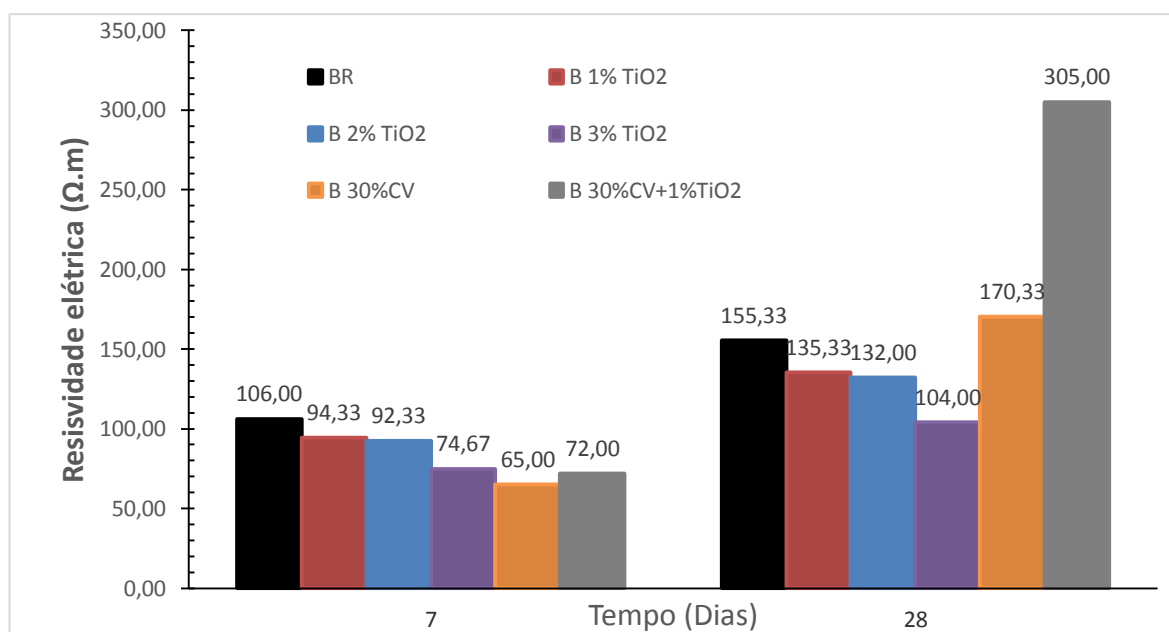


Figura 53 - Resultados da resistividade elétrica de todas as composições

O risco de corrosão foi avaliado através da recomendação do Comité Europeu de betão (CEB, 192), que está representado no Quadro 36.

Quadro 36 - Risco de corrosão de acordo com a resistividade do betão

Resistividade do Betão ($\Omega.m$)	Risco Corrosão
<50	Muito alto
50-100	Alto
100-200	Baixo
>200	Muito baixo

Analisando o Quadro 35 e Figura 53 podemos verificar que com o aumento da incorporação da percentagem de nano-partículas de TiO_2 a resistividade elétrica diminui, esta situação verifica-se tanto aos 7 dias e 28 dias da idade do betão. Verifica-se também que as composições com B 1% TiO_2 , B 2% TiO_2 e B 3% TiO_2 comparativamente com a BR aos 28 dias da idade do betão há uma diminuição da resistividade elétrica de 12,88%, 15% e 33,03%, respetivamente.

Também se verifica que dos 7 dias a resistividade elétrica nas composições com cinzas volantes é menor que o BR. Já aos 28 dias a composição B 30%CV e a B 30%CV +1% TiO_2 comparativamente com o BR, a resistividade elétrica é maior, cerca de 9,66% e 96,39%, respetivamente. Como a resistividade elétrica é influenciada pela porosidade este aumento deve-se ao facto do nano TiO_2 contribuir para uma matriz cimentícia mais compacta.

Segundo o Quadro 36, podemos verificar que aos 7 dias a composição BR apresenta um risco de corrosão baixa e as restantes composições um risco de corrosão alto, mas aos 28 dias já se verifica um aumento da resistência do betão, em que a composição B 30%CV +1% TiO_2 tem um risco de corrosão muito baixo e as restantes um risco de corrosão baixo.

Verificamos assim, que a composição B 30%CV +1% TiO_2 é a composição que apresenta o menor risco de corrosão.

5. Conclusão

Fazendo uma análise sintetizada de todo trabalho elaborado ao longo desta dissertação, podemos concluir o que se apresenta a seguir.

Relativamente à trabalhabilidade verificou-se que com o aumento da incorporação da percentagem de TiO_2 e CV no betão, há um crescimento do abaixamento. Verificou-se que a composição B 30% CV + 1% TiO_2 é a que apresenta maior abaixamento (156 mm) com uma classificação de abaixamento S3, com maior trabalhabilidade entre as composições todas.

No ensaio de resistência à compressão verificou-se que, com o aumento da incorporação de TiO_2 no betão a resistência à compressão diminui pouco, à exceção da incorporação de 1% de TiO_2 , podendo concluir que o efeito da adição de nano TiO_2 não é perceptível aos 7 dias mas aos 28 dias começa a notar-se a sua ação. Na composição B 30%CV verifica-se que com a incorporação de 30% cinzas volantes como substituição do cimento, a resistência à compressão vai diminuir cerca de 26,47% aos 7 dias e 12,82% aos 28 dias. Podemos ver que com o aumento da idade do betão a diferença de resistência vai diminuir. Esta situação deve-se ao facto das cinzas volantes serem consideradas pozolânicas pouco reativas, tornando o betão pouco resistente na fase inicial e a longo prazo a reação vai ser maior, aumento da sua resistência. O betão de referencia aos 28 dias a sua resistência à compressão vai estagnar, enquanto que o betão com cinzas volantes demora cerca de 56 a 90 dias para que a resistência à compressão estagne.

Também se verificou que a composição B 30% CV + 1% TiO_2 , a resistência à compressão vai diminuir cerca de 23,53% aos 7 dias e 2,56% aos 28 dias comparativamente com o BR. Podemos ver que com o aumento da idade do betão a diferença de resistência vai diminuir consideravelmente, pelas razões explicadas anteriormente. Assim podemos concluir que a resistência à compressão que a composição B 30% CV + 1% TiO_2 muito provavelmente vai ultrapassar a resistência à compressão do betão de referência. Tal comportamento torna esta composição muito boa em termos resistência à compressão e em termos económicos e com uma trabalhabilidade muito melhor.

Relativamente à durabilidade, no ensaio de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário verificou-se a mesma coerência nos resultados em todas as composições, em que com o aumento da incorporação da percentagem de TiO_2 no betão, há um crescimento nos seus resultados, mas já nas composições com cinzas volantes já se verifica uma diminuição dos resultados, ou seja, apresentam piores e melhores desempenho comparativamente à composição BR. Esta diminuição deve-se à menor porosidade, verificando assim que os ensaios da absorção de água por imersão, por capilaridade e a difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário estão condicionados pela porosidade da matriz do betão. Sendo que a composição B 30% CV + 1% TiO_2 é a composição com melhor desempenho nestes ensaios, com menor permeabilidade e maior resistência à penetração de cloretos por migração em regime estacionário. Isto deve-se, também, ao facto do nano TiO_2 ter acelerado a reação pozolânica e isso ter gerado mais compostos CSH que resultam numa diminuição da porosidade da matriz cimentícia e mais compacta.

Ao ensaio de ataque químico de ácido sulfúrico, a composição B 1% de TiO_2 é a que apresenta maior resistência e a composição B 30%CV + 1% TiO_2 é a que apresenta menor resistência comparativamente à composição BR. Os resultados mostram que o nano TiO_2 contribuiu para uma matriz cimentícia mais compacta e com compostos menos solúveis e logo mais resistente ao ataque ácido sulfúrico.

No ensaio de ultra sons a composição B 3% TiO_2 é a que apresenta pior resultado, menor que a composição BR, já as composições B 30%CV e B30%CV + 1% TiO_2 são as que apresentam melhores resultados, superiores à composição BR, sendo que a composição B 30%CV é a que apresenta melhor desempenho, contudo a composição B30%CV + 1% TiO_2 apresenta valores muito próximos à B 30%CV. Esta diminuição deve-se ao facto de que o nano TiO_2 contribuiu para uma matriz cimentícia mais compacta e logo com compostos menos solúveis o que se comprova pelas maiores velocidades de propagação de ultra sons.

No ensaio de resistividade elétrica a composição B 30%CV e a B 30%CV + 1% TiO_2 comparativamente com o BR, são os que apresentam maior resistividade elétrica e a composição B 3% TiO_2 é a que apresenta pior resistividade elétrica. Verificamos assim, que

a composição B 30%CV +1% TiO_2 é a composição que apresenta o menor risco de corrosão.

Fazendo uma análise geral, a composição B30%CV + 1% TiO_2 é a que apresenta melhor desempenho à resistência compressão, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário, resistividade elétrica, relativamente ao ensaio de ultra sons é dos melhores, com valor muito próximo à B 30%CV, contudo foi a composição com pior desempenho ao ataque de ácido sulfúrico.

Como tal, com base nestes resultados, podemos considerar que com a composição B 30%CV + 1% TiO_2 obtemos o melhor betão de elevado desempenho entres as composições estudadas ao longo desta dissertação.

5.1. Trabalhos futuros

Uma vez que a temática abordada nesta dissertação não se esgotou e certamente poderá ser alvo de futuros desenvolvimentos, apresentam-se alguns tópicos que poderão ser alvo de estudo e que podem responder, total ou parcialmente, a algumas dúvidas e outras sem resposta, relativamente às características e propriedades de betões de elevado desempenho com a incorporação de TiO_2 associados a cinzas volantes. Destacam-se as seguintes:

Estudar a incorporação de diferentes percentagens de TiO_2 com maiores gamas de percentagens de cinzas volantes.

Efetuar mais ensaios, como complemento aos já efetuados, tais como, ensaio de carbonatação, ensaio gelo-degelo, resistência à flexão, estudo das propriedades foto catalíticas, análise ao microscópico, porosidade ao mercúrio.

Como é referenciado neste estudo, relativamente ao TiO_2 , este é um material com boas características de boa condução, o que pode significar que a condução de eletrões é facilitada no betão, na qual poderá levar ou não facilmente à sua corrosão, daí ser necessário um estudo mais exaustivo na parte na incorporação deste tipo de aditivo. Esta análise deverá incidir na corrosão do aço e avaliar a forma como se propaga a corrosão no betão até ao aço.

Bibliografia

- [1] Gartner E, Macphee D. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. *Cem Concr Res* 2011;41:736–49.
- [2] Shi C, Fernández Jiménez A, Palomo A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cem Concr Res* 2011;41: 750–63.
- [3] Pacheco-Torgal, F.; Labrincha, J.A.; Jalali, S.; John, V.M. (2013) Eco-efficient concrete. Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK. 592 pág.
- [4] ERMCO. Statistics of the year 2010. Boulevard du Souverain 68, B-1170 Brussels, Belgium; 2011.
- [5] Camões, A. (n.d.). Betões eco-eficientes para uma construção sustentável.
- [6] Camões, A. (2006). Betões de elevado desempenho
- [7] Tennis, P.D., Portland cement characteristics – 1998, *Concret technology today*, Portland cement association, 20 (2), 1-3 (1998)
- [8] Camões, Aires; Ferreira, Rui Miguel, ed. lit. – “Inovação em betões: nova normalização e produção de betões especiais: comunicações do Seminário, Braga, Portugal, 2006”. Braga: Universidade do Minho, cop. 2006. ISBN 972-99179-2-9.
- [9] J. Guerra. Materiais de Construção: Betões de Elevado Desempenho, série Materiais, 1º edição, Universidade Fernando Pessoa, 2003.
- [10] F. De Larrard. *Hight-performance concret: from the laboratory to pratical utilisation*. Concret tecnology: new tends, industrial applications, F & FN, Spon, London, 1994; pp.177-196.

- [11] P.-C. Aïtcin e A. Neville. *High-performance concret demystified*. Concrete International, January, 1993; pp. 21-26.
- [12] M. Fedez Cánovas e P.G. Alaejos. (1992). *Composición y dosificación de los hotmigones de Alta Resistencia*. Cemento y hormigón, N709, pp.971-990.
- [13] S. Mindess. (1994). *Materials selection, proportioning and quality control, high performance concrete and applications*. Edited by S. P Shah, P. Sundera and S. H Ahmad, pp-1-25.
- [14] ACI Committe 363. *State of the Art Reporto on High Strength Concrete*. ACI Journal 81(4), 1984
- [15] K. G. Badu. *Hight Performance concrete*. International Symposium on Innovative Worid of concret, 1993, pp. 169-180.
- [16] Maior, R. Cimentos / Concretos : materiais construtivos em contínua evolução Sem idéias e inovação não existe futuro MC-PowerFlow 2008.
- [17] Pacheco-Torgal, F. (2012) Utilização de nano-partículas no desenvolvimento de betões de elevado desempenho. Revista Maquinaria – Angola, N° 225, p.56-62
- [18] Pacheco-Torgal, F.; Miraldo, S.; Ding, Y.; Labrincha, J. (2013) Targeting HPC with the help of nanoparticles. An overview. Construction and Building Materials Vol.38, 356-370.
- [19] F Sanchez, K Sobolev - Construction and Building Materials, 2010 – Elsevier.
- [20] Wiliam Jeremias dos Santos - Nanoscience and Nanotechnology: Manipulating matter atom by atom.
- [21] Zhu W, Bartos P, Porro A. Application of nanotechnology in construction Summary of a state-of-the-art report. RILEM TC 197-NCM. Master Struct 2004;37: 649–658.
- [22] Sanchez, F.; Sobolev, K. Nanotechnology in concrete – A review. Construction and Building Materials 24, 2060–2071, 2010

- [23] Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y., & Wang, M. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters*, 60(3), 356–359. doi:10.1016/j.matlet.2005.08.061, 2006.
- [24] Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & Ou, J. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185–189. doi:10.1016/S1359-8368(03)00052-0, 2004.
- [25] Sobolev K, Flores I, Torres-Martinez LM, Valdez PL, Zarazua E, Cuellar EL. Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials. In: Bittnar Z, Bartos PJM, Nemecek J, Smilauer V, Zeman J, editors. Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction). Prague, Czech Republic; 2009. p. 139–48.
- [26] B.-W. Jo, C.-H. Kim, G.-h. Tae, J.-B. Park. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Construct Build Mater*, 21 (6) 2007; pp. 1351-1355.
- [27] Ji, T. (2005). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 35 (10), 1943–1947. doi:10.1016/j.cemconres.2005.07.004.
- [28] Gaitero, J. J., Campillo, I., & Guerrero, a. (2008). Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cement and Concrete Research*, 38 (8-9), 1112–1118. doi:10.1016/j.cemconres.2008.03.021.
- [29] Li, H., Zhang, M., & Ou, J. (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260(11-12), 1262–1266. doi:10.1016/j.wear.2005.08.006.
- [30] Li, H., Zhang, M., & Ou, J. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29(7), 1292–1301. doi:10.1016/j.ijfatigue.2006.10.004.

- [31] Khoshakhlagh et al. (2012) Effects of Fe₂O₃ nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete. *Journal of Materials Science & Technology* 28 (2012) 73-82.
- [32] Vallee F, Ruot B, Bonafous L, Guillot L, Pimpinelli N, Cassar L, et al. Cementitious materials for self-cleaning and depolluting facade surfaces. In: RILEM proceedings (2005), PRO 41 RILEM international symposium on environment-conscious materials and systems for sustainable development; 2004. p. 337–46.
- [33] Y. Murata, T. Obara, K. Takeuchi Air purifying pavement: development of photocatalytic concrete blocks *J Adv Oxidat Technol*, 4 (2) (1999), pp. 227–230.
- [34] Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. (2011) *A sustentabilidade dos materiais de construção*. ISBN 978-972-8600-22-8, Edição TecMinho, 460 pág., Guimarães, 2ª edição
- [35] Scrivener KL, Kirkpatrick RJ. Innovation in use and research on cementitious material. *Cem Concr Res* 2008;38(2):128-36
- [36] Ozyildirim, C.; Zegetosky, C. (2010) Laboratory investigation of nanomaterials to improve the permeability and strength of concrete. Virginia Transportation Research Council, Final Report VTRC 10-R18, 2010.
- [37] Nasibulin A.; Shandakov S.; Nasibulina L.; Cwirzen A.; Mudimela P.; Habermehl-Cwirzen K.; Grishin, D.; Gavrilov, Y.; Malm, J.; Tapper, U.; Tian, Y.; Penttala, V.; Karppinen, M.; Kauppinen, E. (2009) *A novel cement-based hybrid material*. *New J Physics*, Vol.11, nº023013.
- [38] Li, H.; Xiao, H.; Ou, J. (2004a) *A study on mechanical and pressure –sensitive properties of cement mortar with nanophase materials*. *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.435-438.
- [39] Lin, D.; Lin, K.; Chang, W.; Luo, H.; Cai, M. (2008) *Improvements of nano-SiO₂ on Sludge/fly ash mortar*. *Waste Management*, Vol.28, pp.1081-1087.

- [40] Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. (2011) *A sustentabilidade dos materiais de construção*. ISBN 978-972-8600-22-8, Edição TecMinho, 460 pág., Guimarães, 2ª edição
- [41] Shekari, A.; Razzaghi, M. (2011) Influence of nanoparticles on durability and mechanical properties of high performance concrete. *Procedia Engineering* 14, 3036-3041.
- [42] Nazari, A.; Riahi, S. (2011) Al₂O₃ nanoparticles in concrete and different curing media. *Energy and Buildings* 43, 1480–1488.
- [43] Carde C, Francois R, Torrenti J. Leaching of both calcium hydroxide and C–S–H from cement paste: modeling the mechanical behaviour. *Cem Concr Res* 1996;26:1257–68.
- [44] Gaitero J, Dolado J, Neuen C, Heber F, Koenders E. Computational 3D simulation of calcium leaching in cement matrices. INS Preprint No. 1203. Institut fur numerische simulation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universitat Bonn; 2012.
- [45] Gaitero J, Campillo L, Guerrero A. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cem Concr Res* 2008;38:1112–8.
- [46] Veras-Agullo J, Chozas-Ligero V, Portillo-Rico D, Garcia-Casas M, Gutierrez-Martinez A, Mieres-Royo J, et al. Mortar and concrete reinforced with nanomaterials. *Nanotechnology in construction*, vol. 3. Berlin Heidelberg: Springer; 2009.
- [47] Givi A, Rashid S, Aziz F, Salleh M. Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites: Part B* 2010;41:673–7.
- [48] Zhang M-H, Li H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement. *Constr Build Mater* 2011;25:608–16.
- [49] Camões, A. (2005). Betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes, *d*, pp. 55–64.

- [50] Camões, A. (2005). Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do betão fresco Aires Camões 1, pp. 29–44.
- [51] Atomic, I., & Agency, E. (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, (17).
- [52] GjØrv, O.E. – “Performance and serviceability of concrete structures in the marine environment”, Proceedings, Odd E. GjØrv Symposium on Concrete for Marine Structures, Ed. por P.K. Mehta, CANMET/ACI, 1996, p. 259-279.
- [53] Camões, A. (2004). AUMENTO DA DURABILIDADE DO BETÃO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE METACAUPLINO E LÁTEX – UM CASO DE, 1–8.
- [54] Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S. F., & Khademno, A. (2010). Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO_2 nanoparticles, 6(4), 43–46.

Anexos

Anexo 1 Resistência a compressão

Composição	Tempo (dias)	Provete	Dimensões (mm)	Peso do provete (g)	Carga (KN)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à compressão média (Mpa)	Dif (Average- specimen)	Desvio Padrão (N)	Coefficiente variação (%)
BR	7	1	150x150x150	8065,3	1484	65,96	68,36	2,40	2,10	3,07%
		2		8099,4	1558	69,24		-0,89		
		3		7971,6	1572	69,87		-1,51		
	28	1	150x150x150	8078,4	1772	78,76	77,88	-0,87	0,76	0,98%
		2		8078	1741	77,38		0,50		
		3		8088,8	1744	77,51		0,37		
	7	1	150x150x150	8075	1502	66,76	68,76	2,00	1,75	2,54%
		2		8025,6	1575	70,00		-1,24		
		3		7980,7	1564	69,51		-0,76		
B 1% TiO2	28	1	150x150x150	8065,1	1797	79,87	78,67	-1,20	1,38	1,76%
		2		8039,1	1777	78,98		-0,31		
		3		8125,3	1736	77,16		1,51		
	7	1	150x150x150	8020,7	1451	64,49	64,68	0,19	1,19	1,84%
		2		8043,2	1431	63,60		1,08		
		3		7901	1484	65,96		-1,27		
B 2% TiO2	28	1	150x150x150	8027,8	1711	76,04	77,04	0,99	1,19	1,54%
		2		8023,1	1726	76,71		0,33		
		3		8077,9	1763	78,36		-1,32		
	7	1	150x150x150	7927,3	1337	59,42	59,47	0,04	0,38	0,64%
		2		7866,3	1347	59,87		-0,40		
		3		7959,8	1330	59,11		0,36		
B 3% TiO2	28	1	150x150x150	7888,3	1611	71,60	72,03	0,43	1,19	1,66%
		2		7934,4	1600	71,11		0,92		
		3		8052,2	1651	73,38		-1,35		
	7	1	150x150x150	8041,7	1086	48,27	50,04	1,78	2,07	4,13%
		2		8034,1	1177	52,31		-2,27		
		3		8084,8	1115	49,56		0,49		
B 30%CV	28	1	150x150x150	8088,2	1571	69,82	67,67	-2,15	1,90	2,81%
		2		8111,3	1507	66,98		0,70		
		3		8086,4	1490	66,22		1,45		
	7	1	150x150x150	7982,6	1164	51,73	51,99	0,25	0,68	1,31%
		2		7938,5	1158	51,47		0,52		
		3		7967	1187	52,76		-0,77		
B 30%CV+1%TiO2	28	1	150x150x150	7950,5	1702	75,64	76,10	0,46	0,68	0,90%
		2		7949,2	1730	76,89		-0,79		
		3		8039,6	1705	75,78		0,33		

Anexo 2 Absorção de água por imersão

Absorção de Água por Imersão								
Composição	Provete	Secção (mm)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	Absorção (%)	Absorção Média (%)	Desv. Pad. (%)
BR	A	100x100x100	2259	1396,6	2383,9	12,65066	12,37353	0,2440961
	B		2291	1416,1	2413,7	12,27947		
	C		2279	1406,8	2400,2	12,19046		
B 1% TiO ₂	A	100x100x100	2264	1396,2	2388	12,50252	12,386893	0,1009858
	B		2291	1414,9	2413,6	12,31601		
	C		2315	1426,4	2440	12,34215		
B 2% TiO ₂	A	100x100x100	2253	1381,1	2379,1	12,67535	12,655012	0,1079425
	B		2235	1371,7	2361,4	12,75134		
	C		2279	1395	2405,5	12,53835		
B 3% TiO ₂	A	100x100x100	2264	1399,3	2402,8	13,88142	13,878644	0,103099
	B		2239	1382,2	2378,6	13,98033		
	C		2259	1394,6	2397,2	13,77419		
B 30%CV	A	100x100x100	2303	1398,1	2401,8	9,843579	9,9715832	0,1313356
	B		2304	1399,3	2403,8	9,965157		
	C		2308	1401,1	2410,4	10,10601		
B 30%CV+1%TiO ₂	A	100x100x100	2277	1372,3	2367,9	9,160305	8,9473515	0,1902387
	B		2288	1379,4	2376,3	8,887551		
	C		2276	1370,5	2363,2	8,794198		

Anexo 3 Absorção de água por capilaridade composição BR

BR												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Percentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Percentagem Média	Desv,Pad , (%)	Massa Constante	g/mm²	Média (g/mm2)
30/7/13 11:10	0,00	0,00	A	2309,40	0,00	-	0,00%	0,00%	0,000%	Não	0,00E+00	0,00E+00
			B	2293,10	0,00		0,00%				0,00E+00	
			C	2296,10	0,00		0,00%				0,00E+00	
30/7/13 11:15	0,00	5,00	A	2311,60	2,20	2,20	0,10%	0,10%	0,009%	OK	2,20E-04	2,20E-04
			B	2295,50	2,40		0,10%				2,40E-04	
			C	2298,10	2,00		0,09%				2,00E-04	
30/7/13 11:20	0,01	10,00	A	2312,00	2,60	2,57	0,11%	0,11%	0,015%	OK	2,60E-04	2,57E-04
			B	2296,00	2,90		0,13%				2,90E-04	
			C	2298,30	2,20		0,10%				2,20E-04	
30/7/13 11:30	0,01	20,00	A	2312,60	3,20	3,13	0,14%	0,14%	0,022%	OK	3,20E-04	3,13E-04
			B	2296,70	3,60		0,16%				3,60E-04	
			C	2298,70	2,60		0,11%				2,60E-04	
30/7/13 11:40	0,02	30,00	A	2313,10	3,70	3,60	0,16%	0,16%	0,029%	OK	3,70E-04	3,60E-04
			B	2297,30	4,20		0,18%				4,20E-04	
			C	2299,00	2,90		0,13%				2,90E-04	
30/7/13 12:10	0,04	60,00	A	2314,50	5,10	4,87	0,22%	0,21%	0,042%	OK	5,10E-04	4,87E-04
			B	2298,80	5,70		0,25%				5,70E-04	
			C	2299,90	3,80		0,17%				3,80E-04	
30/7/13 12:40	0,06	90,00	A	2315,80	6,40	6,07	0,28%	0,26%	0,062%	OK	6,40E-04	6,07E-04
			B	2300,40	7,30		0,32%				7,30E-04	
			C	2300,60	4,50		0,20%				4,50E-04	
30/7/13 13:10	0,08	120,00	A	2317,00	7,60	7,07	0,33%	0,31%	0,076%	OK	7,60E-04	7,07E-04
			B	2301,60	8,50		0,37%				8,50E-04	
			C	2301,20	5,10		0,22%				5,10E-04	
30/7/13 14:19	0,13	189,00	A	2320,10	10,70	9,67	0,46%	0,42%	0,104%	OK	1,07E-03	9,67E-04
			B	2304,50	11,40		0,49%				1,14E-03	
			C	2303,00	6,90		0,30%				6,90E-04	
30/7/13 15:10	0,17	240,00	A	2321,40	12,00	10,80	0,52%	0,47%	0,121%	OK	1,20E-03	1,08E-03
			B	2305,90	12,80		0,56%				1,28E-03	
			C	2303,70	7,60		0,33%				7,60E-04	
30/7/13 16:10	0,21	300,00	A	2323,10	13,70	12,50	0,59%	0,54%	0,132%	OK	1,37E-03	1,25E-03
			B	2307,90	14,80		0,64%				1,48E-03	
			C	2305,10	9,00		0,39%				9,00E-04	

Anexo 4 Absorção de água por capilaridade composição BR, continuação

BR												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Percentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Percentagem Média	Desv, Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
30/7/13 17:10	0,25	360,00	A	2325,00	15,60	14,13	0,67%	0,61%	0,148%	OK	1,56E-03	1,41E-03
			B	2309,70	16,60		0,72%				1,66E-03	
			C	2306,30	10,20		0,44%				1,02E-03	
30/7/13 18:10	0,29	420,00	A	2326,30	16,90	15,43	0,73%	0,67%	0,156%	OK	1,69E-03	1,54E-03
			B	2311,20	18,10		0,78%				1,81E-03	
			C	2307,40	11,30		0,49%				1,13E-03	
30/7/13 19:10	0,33	480,00	A	2327,80	18,40	16,83	0,79%	0,73%	0,167%	OK	1,84E-03	1,68E-03
			B	2312,80	19,70		0,85%				1,97E-03	
			C	2308,50	12,40		0,54%				1,24E-03	
31/7/13 11:10	1,00	1440,00	A	2343,30	33,90	31,27	1,45%	1,34%	0,238%	OK	3,39E-03	3,13E-03
			B	2328,20	35,10		1,51%				3,51E-03	
			C	2320,90	24,80		1,07%				2,48E-03	
31/7/13 12:40	1,06	1530,00	A	2343,90	34,50	31,73	1,47%	1,36%	0,240%	OK	3,45E-03	3,17E-03
			B	2328,60	35,50		1,52%				3,55E-03	
			C	2321,30	25,20		1,09%				2,52E-03	
31/7/13 14:15	1,13	1625,00	A	2345,40	36,00	33,23	1,53%	1,42%	0,243%	OK	3,60E-03	3,32E-03
			B	2330,20	37,10		1,59%				3,71E-03	
			C	2322,70	26,60		1,15%				2,66E-03	
31/7/13 15:40	1,19	1710,00	A	2345,90	36,50	33,70	1,56%	1,44%	0,242%	OK	3,65E-03	3,37E-03
			B	2330,60	37,50		1,61%				3,75E-03	
			C	2323,20	27,10		1,17%				2,71E-03	
31/7/13 17:10	1,25	1800,00	A	2346,70	37,30	34,43	1,59%	1,47%	0,246%	OK	3,73E-03	3,44E-03
			B	2331,40	38,30		1,64%				3,83E-03	
			C	2323,80	27,70		1,19%				2,77E-03	
1/8/13 11:10	2,00	2880,00	A	2352,40	43,00	40,00	1,83%	1,71%	0,255%	OK	4,30E-03	4,00E-03
			B	2337,10	44,00		1,88%				4,40E-03	
			C	2329,10	33,00		1,42%				3,30E-03	
1/8/13 14:20	2,13	3070,00	A	2352,80	43,40	40,57	1,84%	1,73%	0,254%	OK	4,34E-03	4,06E-03
			B	2337,80	44,70		1,91%				4,47E-03	
			C	2329,70	33,60		1,44%				3,36E-03	
1/8/13 17:10	2,25	3240,00	A	2353,20	43,80	40,83	1,86%	1,74%	0,248%	OK	4,38E-03	4,08E-03
			B	2337,80	44,70		1,91%				4,47E-03	
			C	2330,10	34,00		1,46%				3,40E-03	
2/8/13 11:11	3,00	4321,00	A	2355,40	46,00	43,03	1,95%	1,84%	0,251%	OK	4,60E-03	4,30E-03
			B	2340,10	47,00		2,01%				4,70E-03	
			C	2332,20	36,10		1,55%				3,61E-03	
2/8/13 14:10	3,13	4500,00	A	2355,60	46,20	43,33	1,96%	1,85%	0,248%	OK	4,62E-03	4,33E-03
			B	2340,40	47,30		2,02%				4,73E-03	
			C	2332,60	36,50		1,56%				3,65E-03	
2/8/13 17:10	3,25	4680,00	A	2355,60	46,20	43,33	1,96%	1,85%	0,248%	OK	4,62E-03	4,33E-03
			B	2340,40	47,30		2,02%				4,73E-03	
			C	2332,60	36,50		1,56%				3,65E-03	

Anexo 5 Absorção de água por capilaridade composição B 30%CV

B 30%CV												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Porcentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Porcentagem Média	Desv,Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
30/7/13 11:10	0,00	0,00	A	2289,90	0,00	-	0,00%	0,00%	0,000%	Não	0,00E+00	0,00E+00
			B	2289,50	0,00		0,00%				0,00E+00	
			C	2271,80	0,00		0,00%				0,00E+00	
30/7/13 11:15	0,00	5,00	A	2292,00	2,10	2,27	0,09%	0,10%	0,013%	OK	2,10E-04	2,27E-04
			B	2291,60	2,10		0,09%				2,10E-04	
			C	2274,40	2,60		0,11%				2,60E-04	
30/7/13 11:20	0,01	10,00	A	2292,10	2,20	2,50	0,10%	0,11%	0,023%	OK	2,20E-04	2,50E-04
			B	2291,70	2,20		0,10%				2,20E-04	
			C	2274,90	3,10		0,14%				3,10E-04	
30/7/13 11:30	0,01	20,00	A	2292,70	2,80	3,03	0,12%	0,13%	0,018%	OK	2,80E-04	3,03E-04
			B	2292,30	2,80		0,12%				2,80E-04	
			C	2275,30	3,50		0,15%				3,50E-04	
30/7/13 11:40	0,02	30,00	A	2293,30	3,40	3,57	0,15%	0,16%	0,021%	OK	3,40E-04	3,57E-04
			B	2292,70	3,20		0,14%				3,20E-04	
			C	2275,90	4,10		0,18%				4,10E-04	
30/7/13 12:10	0,04	60,00	A	2294,20	4,30	4,27	0,19%	0,19%	0,029%	OK	4,30E-04	4,27E-04
			B	2293,10	3,60		0,16%				3,60E-04	
			C	2276,70	4,90		0,22%				4,90E-04	
30/7/13 12:40	0,06	90,00	A	2295,10	5,20	5,23	0,23%	0,23%	0,034%	OK	5,20E-04	5,23E-04
			B	2294,00	4,50		0,20%				4,50E-04	
			C	2277,80	6,00		0,26%				6,00E-04	
30/7/13 13:10	0,08	120,00	A	2295,90	6,00	5,90	0,26%	0,26%	0,043%	OK	6,00E-04	5,90E-04
			B	2294,40	4,90		0,21%				4,90E-04	
			C	2278,60	6,80		0,30%				6,80E-04	
30/7/13 14:19	0,13	189,00	A	2297,80	7,90	7,73	0,34%	0,34%	0,056%	OK	7,90E-04	7,73E-04
			B	2295,90	6,40		0,28%				6,40E-04	
			C	2280,70	8,90		0,39%				8,90E-04	
30/7/13 15:10	0,17	240,00	A	2298,30	8,40	8,37	0,37%	0,37%	0,065%	OK	8,40E-04	8,37E-04
			B	2296,40	6,90		0,30%				6,90E-04	
			C	2281,60	9,80		0,43%				9,80E-04	
30/7/13 16:10	0,21	300,00	A	2299,60	9,70	9,60	0,42%	0,42%	0,073%	OK	9,70E-04	9,60E-04
			B	2297,40	7,90		0,34%				7,90E-04	
			C	2283,00	11,20		0,49%				1,12E-03	

Anexo 6 Absorção de água por capilaridade composição B 30%CV, continuação

B 30%CV												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absovida Por Provete (g)	Média da Massa Absovida (g)	Percentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Percentagem Média	Desv,Pad, (%)	Massa Constante	g/mm²	Média (g/mm2)
30/7/13 17:10	0,25	360,00	A	2300,80	10,90		0,47%				1,09E-03	
			B	2298,50	9,00	10,73	0,39%	0,47%	0,074%	OK	9,00E-04	1,07E-03
			C	2284,10	12,30		0,54%				1,23E-03	
30/7/13 18:10	0,29	420,00	A	2301,70	11,80		0,51%				1,18E-03	
			B	2299,30	9,80	11,70	0,43%	0,51%	0,082%	OK	9,80E-04	1,17E-03
			C	2285,30	13,50		0,59%				1,35E-03	
30/7/13 19:10	0,33	480,00	A	2302,50	12,60		0,55%				1,26E-03	
			B	2300,10	10,60	12,57	0,46%	0,55%	0,087%	OK	1,06E-03	1,26E-03
			C	2286,30	14,50		0,63%				1,45E-03	
31/7/13 11:10	1,00	1440,00	A	2312,40	22,50		0,97%				2,25E-03	
			B	2309,10	19,60	22,43	0,85%	0,97%	0,124%	OK	1,96E-03	2,24E-03
			C	2297,00	25,20		1,10%				2,52E-03	
31/7/13 12:40	1,06	1530,00	A	2312,60	22,70		0,98%				2,27E-03	
			B	2309,40	19,90	22,70	0,86%	0,98%	0,124%	OK	1,99E-03	2,27E-03
			C	2297,30	25,50		1,11%				2,55E-03	
31/7/13 14:15	1,13	1625,00	A	2313,50	23,60		1,02%				2,36E-03	
			B	2310,30	20,80	23,70	0,90%	1,03%	0,131%	OK	2,08E-03	2,37E-03
			C	2298,50	26,70		1,16%				2,67E-03	
31/7/13 15:40	1,19	1710,00	A	2313,80	23,90		1,03%				2,39E-03	
			B	2310,80	21,30	24,10	0,92%	1,04%	0,129%	OK	2,13E-03	2,41E-03
			C	2298,90	27,10		1,18%				2,71E-03	
31/7/13 17:10	1,25	1800,00	A	2314,20	24,30		1,05%				2,43E-03	
			B	2311,20	21,70	24,60	0,94%	1,07%	0,136%	OK	2,17E-03	2,46E-03
			C	2299,60	27,80		1,21%				2,78E-03	
1/8/13 11:10	2,00	2880,00	A	2318,70	28,80		1,24%				2,88E-03	
			B	2316,10	26,60	29,63	1,15%	1,28%	0,156%	OK	2,66E-03	2,96E-03
			C	2305,30	33,50		1,45%				3,35E-03	
1/8/13 14:20	2,13	3070,00	A	2319,10	29,20		1,26%				2,92E-03	
			B	2316,80	27,30	30,27	1,18%	1,31%	0,160%	OK	2,73E-03	3,03E-03
			C	2306,10	34,30		1,49%				3,43E-03	
1/8/13 17:10	2,25	3240,00	A	2319,60	29,70		1,28%				2,97E-03	
			B	2316,90	27,40	30,67	1,18%	1,33%	0,170%	OK	2,74E-03	3,07E-03
			C	2306,70	34,90		1,51%				3,49E-03	
2/8/13 11:11	3,00	4321,00	A	2321,60	31,70		1,37%				3,17E-03	
			B	2319,50	30,00	33,33	1,29%	1,44%	0,193%	OK	3,00E-03	3,33E-03
			C	2310,10	38,30		1,66%				3,83E-03	
2/8/13 14:10	3,13	4500,00	A	2322,00	32,10		1,38%				3,21E-03	
			B	2319,80	30,30	33,70	1,31%	1,45%	0,195%	OK	3,03E-03	3,37E-03
			C	2310,50	38,70		1,67%				3,87E-03	
2/8/13 17:10	3,25	4680,00	A	2322,00	32,10		1,38%				3,21E-03	
			B	2319,90	30,40	33,73	1,31%	1,46%	0,193%	OK	3,04E-03	3,37E-03
			C	2310,50	38,70		1,67%				3,87E-03	

Anexo 7 Absorção de água por capilaridade composição B 30%CV+1%TiO₂

B 30%CV+1%TiO ₂												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Porcentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Porcentagem Média	Desv, Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
30/7/13 11:10	0,00	0,00	A	2241,80	0,00	-	0,00%	0,00%	0,000%	Não	0,00E+00	0,00E+00
			B	2233,60	0,00		0,00%				0,00E+00	
			C	2239,50	0,00		0,00%				0,00E+00	
30/7/13 11:15	0,00	5,00	A	2243,30	1,50	1,60	0,07%	0,07%	0,008%	OK	1,50E-04	1,60E-04
			B	2235,10	1,50		0,07%				1,50E-04	
			C	2241,30	1,80		0,08%				1,80E-04	
30/7/13 11:20	0,01	10,00	A	2243,50	1,70	1,77	0,08%	0,08%	0,009%	OK	1,70E-04	1,77E-04
			B	2235,20	1,60		0,07%				1,60E-04	
			C	2241,50	2,00		0,09%				2,00E-04	
30/7/13 11:30	0,01	20,00	A	2243,40	1,60	1,93	0,07%	0,09%	0,016%	OK	1,60E-04	1,93E-04
			B	2235,50	1,90		0,08%				1,90E-04	
			C	2241,80	2,30		0,10%				2,30E-04	
30/7/13 11:40	0,02	30,00	A	2244,10	2,30	2,47	0,10%	0,11%	0,013%	OK	2,30E-04	2,47E-04
			B	2235,90	2,30		0,10%				2,30E-04	
			C	2242,30	2,80		0,12%				2,80E-04	
30/7/13 12:10	0,04	60,00	A	2244,50	2,70	2,93	0,12%	0,13%	0,011%	OK	2,70E-04	2,93E-04
			B	2236,50	2,90		0,13%				2,90E-04	
			C	2242,70	3,20		0,14%				3,20E-04	
30/7/13 12:40	0,06	90,00	A	2245,20	3,40	3,50	0,15%	0,16%	0,005%	OK	3,40E-04	3,50E-04
			B	2237,10	3,50		0,16%				3,50E-04	
			C	2243,10	3,60		0,16%				3,60E-04	
30/7/13 13:10	0,08	120,00	A	2245,80	4,00	3,93	0,18%	0,18%	0,005%	OK	4,00E-04	3,93E-04
			B	2237,40	3,80		0,17%				3,80E-04	
			C	2243,50	4,00		0,18%				4,00E-04	
30/7/13 14:19	0,13	189,00	A	2246,60	4,80	4,90	0,21%	0,22%	0,005%	OK	4,80E-04	4,90E-04
			B	2238,60	5,00		0,22%				5,00E-04	
			C	2244,40	4,90		0,22%				4,90E-04	
30/7/13 15:10	0,17	240,00	A	2247,00	5,20	5,40	0,23%	0,24%	0,015%	OK	5,20E-04	5,40E-04
			B	2238,80	5,20		0,23%				5,20E-04	
			C	2245,30	5,80		0,26%				5,80E-04	
30/7/13 16:10	0,21	300,00	A	2247,60	5,80	5,87	0,26%	0,26%	0,013%	OK	5,80E-04	5,87E-04
			B	2239,20	5,60		0,25%				5,60E-04	
			C	2245,70	6,20		0,28%				6,20E-04	

Anexo 8 Absorção de água por capilaridade composição B 30%CV+1%TiO₂, continuação

B 30%CV+1%TiO ₂												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Percentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Percentagem Média	Desv, Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
30/7/13 17:10	0,25	360,00	A	2248,50	6,70	6,60	0,30%	0,29%	0,029%	OK	6,70E-04	6,60E-04
			B	2239,50	5,90		0,26%				5,90E-04	
			C	2246,70	7,20		0,32%				7,20E-04	
30/7/13 18:10	0,29	420,00	A	2249,10	7,30	7,30	0,32%	0,33%	0,022%	OK	7,30E-04	7,30E-04
			B	2240,40	6,80		0,30%				6,80E-04	
			C	2247,30	7,80		0,35%				7,80E-04	
30/7/13 19:10	0,33	480,00	A	2249,70	7,90	7,90	0,35%	0,35%	0,031%	OK	7,90E-04	7,90E-04
			B	2240,80	7,20		0,32%				7,20E-04	
			C	2248,10	8,60		0,38%				8,60E-04	
31/7/13 11:10	1,00	1440,00	A	2257,50	15,70	15,80	0,70%	0,70%	0,063%	OK	1,57E-03	1,58E-03
			B	2248,00	14,40		0,64%				1,44E-03	
			C	2256,80	17,30		0,77%				1,73E-03	
31/7/13 12:40	1,06	1530,00	A	2257,70	15,90	16,17	0,70%	0,72%	0,062%	OK	1,59E-03	1,62E-03
			B	2248,50	14,90		0,66%				1,49E-03	
			C	2257,20	17,70		0,78%				1,77E-03	
31/7/13 14:15	1,13	1625,00	A	2258,80	17,00	17,20	0,75%	0,76%	0,061%	OK	1,70E-03	1,72E-03
			B	2249,50	15,90		0,71%				1,59E-03	
			C	2258,20	18,70		0,83%				1,87E-03	
31/7/13 15:40	1,19	1710,00	A	2258,90	17,10	17,33	0,76%	0,77%	0,059%	OK	1,71E-03	1,73E-03
			B	2249,70	16,10		0,72%				1,61E-03	
			C	2258,30	18,80		0,83%				1,88E-03	
31/7/13 17:10	1,25	1800,00	A	2259,40	17,60	17,87	0,78%	0,79%	0,070%	OK	1,76E-03	1,79E-03
			B	2250,00	16,40		0,73%				1,64E-03	
			C	2259,10	19,60		0,87%				1,96E-03	
1/8/13 11:10	2,00	2880,00	A	2263,80	22,00	22,93	0,97%	1,01%	0,094%	OK	2,20E-03	2,29E-03
			B	2255,00	21,40		0,95%				2,14E-03	
			C	2264,90	25,40		1,12%				2,54E-03	
1/8/13 14:20	2,13	3070,00	A	2264,10	22,30	23,43	0,98%	1,04%	0,097%	OK	2,23E-03	2,34E-03
			B	2255,60	22,00		0,98%				2,20E-03	
			C	2265,50	26,00		1,15%				2,60E-03	
1/8/13 17:10	2,25	3240,00	A	2264,70	22,90	23,93	1,01%	1,06%	0,097%	OK	2,29E-03	2,39E-03
			B	2256,00	22,40		0,99%				2,24E-03	
			C	2266,00	26,50		1,17%				2,65E-03	
2/8/13 11:11	3,00	4321,00	A	2266,60	24,80	26,77	1,09%	1,18%	0,123%	OK	2,48E-03	2,68E-03
			B	2259,10	25,50		1,13%				2,55E-03	
			C	2269,50	30,00		1,32%				3,00E-03	
2/8/13 14:10	3,13	4500,00	A	2266,80	25,00	27,10	1,10%	1,20%	0,129%	OK	2,50E-03	2,71E-03
			B	2259,40	25,80		1,14%				2,58E-03	
			C	2270,00	30,50		1,34%				3,05E-03	
2/8/13 17:10	3,25	4680,00	A	2266,80	25,00	27,20	1,10%	1,20%	0,127%	OK	2,50E-03	2,72E-03
			B	2259,70	26,10		1,16%				2,61E-03	
			C	2270,00	30,50		1,34%				3,05E-03	

Anexo 9 Absorção de água por capilaridade composição B 1%TiO₂

B 1%TiO ₂												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Porcentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Porcentagem Média	Desv,Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
5/8/13 9:19	0,00	0,00	A	2269,20	0,00	-	0,00%	0,00%	0,000%	Não	0,00E+00	0,00E+00
			B	2288,40	0,00		0,00%				0,00E+00	
			C	2270,50	0,00		0,00%				0,00E+00	
5/8/13 9:24	0,00	5,00	A	2271,10	1,90	2,20	0,08%	0,10%	0,013%	OK	1,90E-04	2,20E-04
			B	2290,90	2,50		0,11%				2,50E-04	
			C	2272,70	2,20		0,10%				2,20E-04	
5/8/13 9:29	0,01	10,00	A	2271,20	2,00	2,50	0,09%	0,11%	0,019%	OK	2,00E-04	2,50E-04
			B	2291,20	2,80		0,12%				2,80E-04	
			C	2273,20	2,70		0,12%				2,70E-04	
5/8/13 9:39	0,01	20,00	A	2271,90	2,70	3,17	0,12%	0,14%	0,018%	OK	2,70E-04	3,17E-04
			B	2291,90	3,50		0,15%				3,50E-04	
			C	2273,80	3,30		0,15%				3,30E-04	
5/8/13 9:49	0,02	30,00	A	2272,20	3,00	3,73	0,13%	0,16%	0,030%	OK	3,00E-04	3,73E-04
			B	2292,80	4,40		0,19%				4,40E-04	
			C	2274,30	3,80		0,17%				3,80E-04	
5/8/13 10:19	0,04	60,00	A	2273,60	4,40	5,33	0,19%	0,23%	0,036%	OK	4,40E-04	5,33E-04
			B	2294,40	6,00		0,26%				6,00E-04	
			C	2276,10	5,60		0,25%				5,60E-04	
5/8/13 10:49	0,06	90,00	A	2275,00	5,80	7,07	0,25%	0,31%	0,048%	OK	5,80E-04	7,07E-04
			B	2296,30	7,90		0,34%				7,90E-04	
			C	2278,00	7,50		0,33%				7,50E-04	
5/8/13 11:19	0,08	120,00	A	2276,20	7,00	8,50	0,31%	0,37%	0,057%	OK	7,00E-04	8,50E-04
			B	2298,00	9,60		0,42%				9,60E-04	
			C	2279,40	8,90		0,39%				8,90E-04	
5/8/13 12:19	0,13	180,00	A	2278,60	9,40	11,40	0,41%	0,50%	0,077%	OK	9,40E-04	1,14E-03
			B	2301,30	12,90		0,56%				1,29E-03	
			C	2282,40	11,90		0,52%				1,19E-03	
5/8/13 13:43	0,18	264,00	A	2282,20	13,00	15,37	0,57%	0,67%	0,089%	OK	1,30E-03	1,54E-03
			B	2305,40	17,00		0,74%				1,70E-03	
			C	2286,60	16,10		0,70%				1,61E-03	
5/8/13 14:19	0,21	300,00	A	2283,00	13,80	16,33	0,60%	0,71%	0,096%	OK	1,38E-03	1,63E-03
			B	2306,60	18,20		0,79%				1,82E-03	
			C	2287,50	17,00		0,74%				1,70E-03	

Anexo 10 Absorção de água por capilaridade composição B 1%TiO₂, continuação

B 1%TiO ₂												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Percentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Percentagem Média	Desv,Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
5/8/13 15:19	0,25	360,00	A	2284,90	15,70		0,69%				1,57E-03	
			B	2308,90	20,50	18,57	0,89%	0,81%	0,107%	OK	2,05E-03	1,86E-03
			C	2290,00	19,50		0,85%				1,95E-03	
5/8/13 16:19	0,29	420,00	A	2286,90	17,70		0,77%				1,77E-03	
			B	2311,00	22,60	20,60	0,98%	0,90%	0,108%	OK	2,26E-03	2,06E-03
			C	2292,00	21,50		0,94%				2,15E-03	
5/8/13 17:19	0,33	480,00	A	2288,50	19,30		0,84%				1,93E-03	
			B	2312,90	24,50	22,40	1,06%	0,97%	0,115%	OK	2,45E-03	2,24E-03
			C	2293,90	23,40		1,02%				2,34E-03	
6/8/13 10:19	1,04	1500,00	A	2308,30	39,10		1,69%				3,91E-03	
			B	2334,50	46,10	43,50	1,97%	1,87%	0,157%	OK	4,61E-03	4,35E-03
			C	2315,80	45,30		1,96%				4,53E-03	
6/8/13 11:49	1,10	1590,00	A	2309,30	40,10		1,74%				4,01E-03	
			B	2335,70	47,30	44,70	2,03%	1,93%	0,164%	OK	4,73E-03	4,47E-03
			C	2317,20	46,70		2,02%				4,67E-03	
6/8/13 13:19	1,17	1680,00	A	2310,60	41,40		1,79%				4,14E-03	
			B	2337,10	48,70	46,00	2,08%	1,98%	0,164%	OK	4,87E-03	4,60E-03
			C	2318,40	47,90		2,07%				4,79E-03	
6/8/13 14:49	1,23	1770,00	A	2311,20	42,00		1,82%				4,20E-03	
			B	2337,90	49,50	46,83	2,12%	2,02%	0,172%	OK	4,95E-03	4,68E-03
			C	2319,50	49,00		2,11%				4,90E-03	
6/8/13 16:19	1,29	1860,00	A	2312,10	42,90		1,86%				4,29E-03	
			B	2338,80	50,40	47,80	2,15%	2,06%	0,174%	OK	5,04E-03	4,78E-03
			C	2320,60	50,10		2,16%				5,01E-03	
7/8/13 9:19	2,00	2880,00	A	2321,00	51,80		2,23%				5,18E-03	
			B	2348,80	60,40	57,73	2,57%	2,47%	0,210%	OK	6,04E-03	5,77E-03
			C	2331,50	61,00		2,62%				6,10E-03	
7/8/13 12:19	2,13	3060,00	A	2322,00	52,80		2,27%				5,28E-03	
			B	2349,90	61,50	58,87	2,62%	2,52%	0,215%	OK	6,15E-03	5,89E-03
			C	2332,80	62,30		2,67%				6,23E-03	
7/8/13 15:19	2,25	3240,00	A	2322,80	53,60		2,31%				5,36E-03	
			B	2350,90	62,50	59,87	2,66%	2,56%	0,223%	OK	6,25E-03	5,99E-03
			C	2334,00	63,50		2,72%				6,35E-03	
8/8/13 9:19	3,00	4320,00	A	2327,90	58,70		2,52%				5,87E-03	
			B	2357,00	68,60	65,87	2,91%	2,81%	0,256%	OK	6,86E-03	6,59E-03
			C	2340,80	70,30		3,00%				7,03E-03	
8/8/13 12:19	3,13	4500,00	A	2328,70	59,50		2,56%				5,95E-03	
			B	2357,90	69,50	66,73	2,95%	2,85%	0,258%	OK	6,95E-03	6,67E-03
			C	2341,70	71,20		3,04%				7,12E-03	
8/8/13 15:19	3,25	4680,00	A	2329,10	59,90		2,57%				5,99E-03	
			B	2358,10	69,70	66,97	2,96%	2,86%	0,251%	OK	6,97E-03	6,70E-03
			C	2341,80	71,30		3,04%				7,13E-03	

Anexo 11 Absorção de água por capilaridade composição B 2%TiO₂

B 2%TiO ₂												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Porcentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Porcentagem Média	Desv, Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
5/8/13 9:19	0,00	0,00	A	2232,50	0,00	-	0,00%	0,00%	0,000%	Não	0,00E+00	0,00E+00
			B	2289,20	0,00		0,00%				0,00E+00	
			C	2212,00	0,00		0,00%				0,00E+00	
5/8/13 9:24	0,00	5,00	A	2234,60	2,10	2,17	0,09%	0,10%	0,015%	OK	2,10E-04	2,17E-04
			B	2291,10	1,90		0,08%				1,90E-04	
			C	2214,50	2,50		0,11%				2,50E-04	
5/8/13 9:29	0,01	10,00	A	2234,80	2,30	2,40	0,10%	0,11%	0,018%	OK	2,30E-04	2,40E-04
			B	2291,30	2,10		0,09%				2,10E-04	
			C	2214,80	2,80		0,13%				2,80E-04	
5/8/13 9:39	0,01	20,00	A	2235,70	3,20	3,07	0,14%	0,14%	0,021%	OK	3,20E-04	3,07E-04
			B	2291,80	2,60		0,11%				2,60E-04	
			C	2215,40	3,40		0,15%				3,40E-04	
5/8/13 9:49	0,02	30,00	A	2235,80	3,30	3,40	0,15%	0,15%	0,023%	OK	3,30E-04	3,40E-04
			B	2292,20	3,00		0,13%				3,00E-04	
			C	2215,90	3,90		0,18%				3,90E-04	
5/8/13 10:19	0,04	60,00	A	2237,00	4,50	4,67	0,20%	0,21%	0,042%	OK	4,50E-04	4,67E-04
			B	2293,10	3,90		0,17%				3,90E-04	
			C	2217,60	5,60		0,25%				5,60E-04	
5/8/13 10:49	0,06	90,00	A	2238,20	5,70	6,23	0,25%	0,28%	0,033%	OK	5,70E-04	6,23E-04
			B	2295,20	6,00		0,26%				6,00E-04	
			C	2219,00	7,00		0,32%				7,00E-04	
5/8/13 11:19	0,08	120,00	A	2239,20	6,70	7,70	0,30%	0,34%	0,053%	OK	6,70E-04	7,70E-04
			B	2296,70	7,50		0,33%				7,50E-04	
			C	2220,90	8,90		0,40%				8,90E-04	
5/8/13 12:19	0,13	180,00	A	2240,90	8,40	10,17	0,37%	0,45%	0,076%	OK	8,40E-04	1,02E-03
			B	2299,60	10,40		0,45%				1,04E-03	
			C	2223,70	11,70		0,53%				1,17E-03	
5/8/13 13:43	0,18	264,00	A	2243,30	10,80	13,57	0,48%	0,60%	0,112%	OK	1,08E-03	1,36E-03
			B	2303,40	14,20		0,62%				1,42E-03	
			C	2227,70	15,70		0,70%				1,57E-03	
5/8/13 14:19	0,21	300,00	A	2243,80	11,30	14,43	0,50%	0,64%	0,130%	OK	1,13E-03	1,44E-03
			B	2304,20	15,00		0,65%				1,50E-03	
			C	2229,00	17,00		0,76%				1,70E-03	

Anexo 12 Absorção de água por capilaridade composição B 2%TiO₂, continuação

B 2%TiO ₂												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Percentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Percentagem Média	Desv, Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
5/8/13 15:19	0,25	360,00	A	2245,00	12,50	16,27	0,56%	0,72%	0,151%	OK	1,25E-03	1,63E-03
			B	2306,40	17,20		0,75%				1,72E-03	
			C	2231,10	19,10		0,86%				1,91E-03	
5/8/13 16:19	0,29	420,00	A	2246,30	13,80	17,97	0,61%	0,79%	0,166%	OK	1,38E-03	1,80E-03
			B	2308,30	19,10		0,83%				1,91E-03	
			C	2233,00	21,00		0,94%				2,10E-03	
5/8/13 17:19	0,33	480,00	A	2247,20	14,70	19,50	0,65%	0,86%	0,191%	OK	1,47E-03	1,95E-03
			B	2310,00	20,80		0,90%				2,08E-03	
			C	2235,00	23,00		1,03%				2,30E-03	
6/8/13 10:19	1,04	1500,00	A	2258,70	26,20	36,90	1,16%	1,62%	0,407%	OK	2,62E-03	3,69E-03
			B	2329,90	40,70		1,75%				4,07E-03	
			C	2255,80	43,80		1,94%				4,38E-03	
6/8/13 11:49	1,10	1590,00	A	2259,20	26,70	37,80	1,18%	1,65%	0,422%	OK	2,67E-03	3,78E-03
			B	2330,90	41,70		1,79%				4,17E-03	
			C	2257,00	45,00		1,99%				4,50E-03	
6/8/13 13:19	1,17	1680,00	A	2260,10	27,60	39,03	1,22%	1,71%	0,433%	OK	2,76E-03	3,90E-03
			B	2332,40	43,20		1,85%				4,32E-03	
			C	2258,30	46,30		2,05%				4,63E-03	
6/8/13 14:49	1,23	1770,00	A	2260,40	27,90	39,67	1,23%	1,74%	0,445%	OK	2,79E-03	3,97E-03
			B	2333,20	44,00		1,89%				4,40E-03	
			C	2259,10	47,10		2,08%				4,71E-03	
6/8/13 16:19	1,29	1860,00	A	2261,00	28,50	40,53	1,26%	1,77%	0,455%	OK	2,85E-03	4,05E-03
			B	2334,10	44,90		1,92%				4,49E-03	
			C	2260,20	48,20		2,13%				4,82E-03	
7/8/13 9:19	2,00	2880,00	A	2266,80	34,30	48,73	1,51%	2,12%	0,541%	OK	3,43E-03	4,87E-03
			B	2343,30	54,10		2,31%				5,41E-03	
			C	2269,80	57,80		2,55%				5,78E-03	
7/8/13 12:19	2,13	3060,00	A	2267,30	34,80	49,53	1,53%	2,16%	0,552%	OK	3,48E-03	4,95E-03
			B	2344,20	55,00		2,35%				5,50E-03	
			C	2270,80	58,80		2,59%				5,88E-03	
7/8/13 15:19	2,25	3240,00	A	2267,80	35,30	50,53	1,56%	2,20%	0,571%	OK	3,53E-03	5,05E-03
			B	2345,30	56,10		2,39%				5,61E-03	
			C	2272,20	60,20		2,65%				6,02E-03	
8/8/13 9:19	3,00	4320,00	A	2271,70	39,20	55,70	1,73%	2,42%	0,615%	OK	3,92E-03	5,57E-03
			B	2351,00	61,80		2,63%				6,18E-03	
			C	2278,10	66,10		2,90%				6,61E-03	
8/8/13 12:19	3,13	4500,00	A	2272,00	39,50	56,30	1,74%	2,44%	0,627%	OK	3,95E-03	5,63E-03
			B	2351,60	62,40		2,65%				6,24E-03	
			C	2279,00	67,00		2,94%				6,70E-03	
8/8/13 15:19	3,25	4680,00	A	2272,10	39,60	56,33	1,74%	2,45%	0,625%	OK	3,96E-03	5,63E-03
			B	2351,60	62,40		2,65%				6,24E-03	
			C	2279,00	67,00		2,94%				6,70E-03	

Anexo 13 Absorção de água por capilaridade composição B 3%TiO₂

B 3%TiO ₂											
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Porcentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Porcentagem Média	Desv,Pad, (%)	Massa Constante	Média (g/mm ²)
5/8/13 9:19	0,00	0,00	A	2256,80	0,00	-	0,00%	0,00%	0,000%	Não	0,00E+00
			B	2236,60	0,00		0,00%				0,00E+00
			C	2221,50	0,00		0,00%				0,00E+00
5/8/13 9:24	0,00	5,00	A	2259,70	2,90	3,27	0,13%	0,15%	0,017%	OK	2,90E-04
			B	2239,90	3,30		0,15%				3,30E-04
			C	2225,10	3,60		0,16%				3,60E-04
5/8/13 9:29	0,01	10,00	A	2260,40	3,60	3,80	0,16%	0,17%	0,010%	OK	3,60E-04
			B	2240,40	3,80		0,17%				3,80E-04
			C	2225,50	4,00		0,18%				4,00E-04
5/8/13 9:39	0,01	20,00	A	2261,60	4,80	4,83	0,21%	0,22%	0,008%	OK	4,80E-04
			B	2241,30	4,70		0,21%				4,70E-04
			C	2226,50	5,00		0,22%				5,00E-04
5/8/13 9:49	0,02	30,00	A	2262,00	5,20	5,60	0,23%	0,25%	0,018%	OK	5,20E-04
			B	2242,30	5,70		0,25%				5,70E-04
			C	2227,40	5,90		0,26%				5,90E-04
5/8/13 10:19	0,04	60,00	A	2264,20	7,40	8,13	0,33%	0,36%	0,032%	OK	7,40E-04
			B	2244,90	8,30		0,37%				8,30E-04
			C	2230,20	8,70		0,39%				8,70E-04
5/8/13 10:49	0,06	90,00	A	2265,80	9,00	10,20	0,40%	0,45%	0,049%	OK	9,00E-04
			B	2247,30	10,70		0,48%				1,07E-03
			C	2232,40	10,90		0,49%				1,09E-03
5/8/13 11:19	0,08	120,00	A	2267,20	10,40	12,10	0,46%	0,54%	0,069%	OK	1,04E-03
			B	2249,40	12,80		0,57%				1,28E-03
			C	2234,60	13,10		0,59%				1,31E-03
5/8/13 12:19	0,13	180,00	A	2269,70	12,90	15,27	0,57%	0,68%	0,095%	OK	1,29E-03
			B	2253,00	16,40		0,73%				1,64E-03
			C	2238,00	16,50		0,74%				1,65E-03
5/8/13 13:43	0,18	264,00	A	2272,60	15,80	19,23	0,70%	0,85%	0,136%	OK	1,58E-03
			B	2257,50	20,90		0,93%				2,09E-03
			C	2242,50	21,00		0,94%				2,10E-03
5/8/13 14:19	0,21	300,00	A	2273,30	16,50	20,40	0,73%	0,90%	0,154%	OK	1,65E-03
			B	2258,80	22,20		0,98%				2,22E-03
			C	2244,00	22,50		1,00%				2,25E-03

Anexo 14 Absorção de água por capilaridade composição B 3%TiO₂, continuação

B 3%TiO ₂												
Data/Hora	Dias	min	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	Percentagem de Massa Absorvida Por Provete (%)	Percentagem Média	Desv, Pad, (%)	Massa Constante	g/mm ²	Média (g/mm ²)
5/8/13 15:19	0,25	360,00	A	2275,10	18,30	22,77	0,80%	1,01%	0,177%	OK	1,83E-03	2,28E-03
			B	2261,30	24,70		1,09%				2,47E-03	
			C	2246,80	25,30		1,13%				2,53E-03	
5/8/13 16:19	0,29	420,00	A	2276,70	19,90	24,97	0,87%	1,10%	0,199%	OK	1,99E-03	2,50E-03
			B	2263,90	27,30		1,21%				2,73E-03	
			C	2249,20	27,70		1,23%				2,77E-03	
5/8/13 17:19	0,33	480,00	A	2277,70	20,90	26,63	0,92%	1,18%	0,225%	OK	2,09E-03	2,66E-03
			B	2265,80	29,20		1,29%				2,92E-03	
			C	2251,30	29,80		1,32%				2,98E-03	
6/8/13 10:19	1,04	1500,00	A	2290,40	33,60	47,67	1,47%	2,09%	0,538%	OK	3,36E-03	4,77E-03
			B	2290,30	53,70		2,34%				5,37E-03	
			C	2277,20	55,70		2,45%				5,57E-03	
6/8/13 11:49	1,10	1590,00	A	2291,40	34,60	48,93	1,51%	2,14%	0,548%	OK	3,46E-03	4,89E-03
			B	2291,60	55,00		2,40%				5,50E-03	
			C	2278,70	57,20		2,51%				5,72E-03	
6/8/13 13:19	1,17	1680,00	A	2291,90	35,10	50,27	1,53%	2,20%	0,580%	OK	3,51E-03	5,03E-03
			B	2293,20	56,60		2,47%				5,66E-03	
			C	2280,60	59,10		2,59%				5,91E-03	
6/8/13 14:49	1,23	1770,00	A	2292,20	35,40	51,07	1,54%	2,23%	0,598%	OK	3,54E-03	5,11E-03
			B	2294,30	57,70		2,51%				5,77E-03	
			C	2281,60	60,10		2,63%				6,01E-03	
6/8/13 16:19	1,29	1860,00	A	2293,00	36,20	52,23	1,58%	2,28%	0,611%	OK	3,62E-03	5,22E-03
			B	2295,60	59,00		2,57%				5,90E-03	
			C	2283,00	61,50		2,69%				6,15E-03	
7/8/13 9:19	2,00	2880,00	A	2297,40	40,60	61,83	1,77%	2,69%	0,803%	OK	4,06E-03	6,18E-03
			B	2307,00	70,40		3,05%				7,04E-03	
			C	2296,00	74,50		3,24%				7,45E-03	
7/8/13 12:19	2,13	3060,00	A	2297,90	41,10	63,03	1,79%	2,74%	0,830%	OK	4,11E-03	6,30E-03
			B	2308,30	71,70		3,11%				7,17E-03	
			C	2297,80	76,30		3,32%				7,63E-03	
7/8/13 15:19	2,25	3240,00	A	2298,40	41,60	64,23	1,81%	2,79%	0,855%	OK	4,16E-03	6,42E-03
			B	2309,70	73,10		3,16%				7,31E-03	
			C	2299,50	78,00		3,39%				7,80E-03	
8/8/13 9:19	3,00	4320,00	A	2301,00	44,20	69,67	1,92%	3,02%	0,964%	OK	4,42E-03	6,97E-03
			B	2315,30	78,70		3,40%				7,87E-03	
			C	2307,60	86,10		3,73%				8,61E-03	
8/8/13 12:19	3,13	4500,00	A	2301,50	44,70	70,43	1,94%	3,05%	0,974%	OK	4,47E-03	7,04E-03
			B	2316,10	79,50		3,43%				7,95E-03	
			C	2308,60	87,10		3,77%				8,71E-03	
8/8/13 15:19	3,25	4680,00	A	2301,50	44,70	70,47	1,94%	3,05%	0,974%	OK	4,47E-03	7,05E-03
			B	2316,20	79,60		3,44%				7,96E-03	
			C	2308,60	87,10		3,77%				8,71E-03	

Anexo 15 Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário

Composição	Amostra	Ø (mm)	L (mm)	U (V)	T _m (°C)	t (h)	Profundidade penetração de cloretos (mm)								D _{NSSM} (x10 ⁻¹² m ² /s)	D _{médio} (x10 ⁻¹² m ² /s)
							1	2	3	4	5	6	7	x _{DM}		
BR	A	99,7	49,5	30,0	27,5	24,0	17,0	15,8	17,0	18,4	18,1	16,8	18,5	17,38	7,99	8,03
	B	99,8	48,5	30,0	27,5	24,0	18,6	17,6	16,9	18,2	17,7	16,2	15,9	17,27	7,79	
	C	99,7	48,4	30,0	27,5	24,0	19,2	16,6	19,6	20,3	18,1	17,1	17,9	18,36	8,30	
B 30% CV	A	99,8	49,1	45,0	27,0	24,0	17,9	13,9	14,0	11,5	14,6	14,7	19,6	15,16	4,59	5,12
	B	100,0	49,4	45,0	27,0	24,0	18,0	13,0	11,9	11,9	16,6	17,0	19,5	15,42	4,69	
	C	99,8	49,2	45,0	27,0	24,0	23,6	22,6	19,2	15,9	16,1	17,4	23,6	19,76	6,08	
B 30% CV + 1% TiO2	A	100,5	46,1	45,0	27,0	24,0	14,4	13,6	13,6	15,0	11,3	15,1	15,8	14,14	4,01	3,89
	B	99,8	48,1	45,0	27,0	24,0	12,7	14,5	12,6	12,2	12,6	13,5	14,6	13,24	3,90	
	C	100,0	47,5	45,0	27,0	24,0	17,6	13,9	12,7	10,2	11,5	10,2	14,8	12,98	3,76	
B 1% TiO2	A	99,8	46,9	25,0	25,0	24,0	16,7	17,0	14,9	19,3	21,6	17,1	20,3	18,12	9,45	8,99
	B	99,2	47,4	25,0	25,0	24,0	18,5	17,6	12,3	17,9	17,5	19,2	20,,98	17,15	8,99	
	C	99,5	48,6	25,0	25,0	24,0	20,1	13,8	13,8	17,0	17,6	15,9	13,6	15,96	8,52	
B 2% TiO2	A	99,7	48,7	25,0	25,0	24,0	15,4	14,4	14,2	14,5	15,8	17,4	20,0	15,95	8,52	8,82
	B	99,7	50,9	25,0	25,0	24,0	15,5	15,6	14,2	14,7	15,8	16,4	20,5	16,09	8,96	
	C	99,6	47,8	25,0	25,0	24,0	15,9	17,8	16,4	18,9	15,7	16,8	17,4	16,99	8,97	
B 3% TiO2	A	99,7	49,9	25,0	25,0	24,0	16,5	18,4	18,4	16,8	17,9	17,5	17,5	17,57	9,68	10,24
	B	99,5	48,6	25,0	25,0	24,0	18,0	18,0	17,4	19,0	17,4	17,6	16,7	17,71	9,53	
	C	99,7	48,9	25,0	25,0	24,0	22,0	18,8	17,0	18,4	23,5	22,0	24,9	20,97	11,50	

Anexo 16 Ataque químico

Ataque Químico (Ácido sulfúrico)					
Molde 100x100x100 (mm ³)					
Composição	Tempo (dias)	Provete	Massa (g)	Massa Média (g)	Massa Perdida (%)
BR	0	1	2387,5	2387,63	0,00
		2	2401,8		
		3	2373,6		
	1	1	2350,7	2348,73	1,63
		2	2363,0		
		3	2332,5		
	7	1	2163,7	2164,20	9,36
		2	2178,9		
		3	2150,0		
	14	1	1963,6	1966,97	17,62
		2	1987,5		
		3	1949,8		
	35	1	1413,0	1409,97	40,95
		2	1423,5		
		3	1393,4		
	56	1	981,2	986,80	58,67
		2	996,5		
		3	982,7		
B 1% TiO ₂	0	1	2378,6	2409,63	0,00
		2	2411,0		
		3	2439,3		
	1	1	2332,0	2362,93	1,94
		2	2366,3		
		3	2390,5		
	7	1	2150,5	2188,80	9,16
		2	2195,1		
		3	2220,8		
	14	1	1962,7	2002,67	16,89
		2	2003,2		
		3	2042,1		
	35	1	1399,8	1442,50	40,14
		2	1440,2		
		3	1487,5		
	56	1	987,8	1028,07	57,34
		2	1030,6		
		3	1065,8		

Anexo 17 Ataque químico, continuação

Ataque Químico (Ácido sulfúrico)					
Molde 100x100x100 (mm ³)					
B 2% TiO2	0	1	2385,5	2363,67	0,00
		2	2352,8		
		3	2352,7		
	1	1	2336,6	2315,57	2,03
		2	2303,4		
		3	2306,7		
	7	1	2158,3	2133,27	9,75
		2	2123,2		
		3	2118,3		
	14	1	1945,1	1925,77	18,53
		2	1922,2		
		3	1910,0		
	35	1	1377,7	1350,40	42,87
		2	1351,4		
		3	1322,1		
	56	1	935,7	925,47	60,85
		2	934,3		
		3	906,4		
B 3% TiO2	0	1	2321,9	2356,80	0,00
		2	2388,6		
		3	2359,9		
	1	1	2286,4	2317,87	1,65
		2	2348,2		
		3	2319,0		
	7	1	2056,7	2102,60	10,79
		2	2143,4		
		3	2107,7		
	14	1	1828,6	1885,90	19,98
		2	1935,3		
		3	1893,8		
	35	1	1199,1	1286,13	45,43
		2	1354,6		
		3	1304,7		
	56	1	771,0	856,07	63,68
		2	918,4		
		3	878,8		

Anexo 18 Ataque químico, continuação

Ataque Químico (Ácido sulfúrico)					
Molde 100x100x100 (mm ³)					
Composição	Tempo (dias)	Provete	Massa (g)	Massa Média (g)	Massa Perdida (%)
B 30%CV	0	1	2359,1	2354,33	0,00
		2	2336,5		
		3	2367,4		
	1	1	2319,8	2331,70	0,96
		2	2358,1		
		3	2317,2		
	7	1	2093,6	2115,50	10,14
		2	2146,8		
		3	2106,1		
	14	1	1846,2	1863,17	20,86
		2	1903,2		
		3	1840,1		
	35	1	1193,1	1193,47	49,31
		2	1226,4		
		3	1160,9		
	56	1	755,9	757,20	67,84
		2	787,0		
		3	728,7		
B 30%CV+1%TiO ₂	0	1	2368,6	2357,50	0,00
		2	2336,5		
		3	2367,4		
	1	1	2320,5	2309,03	2,06
		2	2287,4		
		3	2319,2		
	7	1	2117,8	2105,20	10,70
		2	2087,2		
		3	2110,6		
	14	1	1842,9	1831,23	22,32
		2	1810,5		
		3	1840,3		
	35	1	1160,5	1145,37	51,42
		2	1127,6		
		3	1148,0		
	56	1	719,6	704,80	70,10
		2	690,0		
		3	704,8		

Anexo 19 Ultra Sons

Ultra sons								
Molde 100x100x100(mm)								
Composição	Tempo de cura (dias)	Transmissão	Leitura	T (u.s)	L (mm)	v(m/s)	Tmédio (u.s)	Vmédia (m/s)
BR	7	Direto	A-A'	21,9	100,0	4566	21,85	4577
			B-B'	21,8	100,0	4587		
		Semi-Direto	A-B	11,1	50,0	4505	11,17	4478
			A-B'	11,1	50,0	4505		
			A-C	11,3	50,0	4425		
		28	Direto	A-A'	20,9	100,0	4785	21,15
	B-B'			21,4	100,0	4673		
	Semi-Direto		A-B	11,2	50,0	4464	11,37	4399
			A-B'	11,3	50,0	4425		
	B 1% TiO2	7	Direto	A-A'	22,3	100,0	4484	22,15
B-B'	22,0			100,0	4545			
Semi-Direto	A-B		11,5	50,0	4348	11,47	4360	
	A-B'		11,2	50,0	4464			
	A-C		11,7	50,0	4274			
28	Direto		A-A'	21,0	100,0	4762	20,95	4773
			B-B'	20,9	100,0	4785		
	Semi-Direto		A-B	10,7	50,0	4673	10,70	4673
			A-B'	10,8	50,0	4630		
			A-C	10,6	50,0	4717		
B 2% TiO2	7	Direto	A-A'	22,1	100,0	4525	22,20	4505
			B-B'	22,3	100,0	4484		
		Semi-Direto	A-B	12,0	50,0	4167	11,77	4249
			A-B'	11,5	50,0	4348		
			A-C	11,8	50,0	4237		
		28	Direto	A-A'	21,4	100,0	4673	21,40
	B-B'			21,4	100,0	4673		
	Semi-Direto		A-B	11,0	50,0	4545	11,00	4545
			A-B'	11,1	50,0	4505		
	B 3% TiO2	7	Direto	A-A'	22,4	100,0	4464	22,65
B-B'	22,9			100,0	4367			
Semi-Direto	A-B		12,1	50,0	4132	12,27	4076	
	A-B'		12,0	50,0	4167			
	A-C		12,7	50,0	3937			
28	Direto		A-A'	21,8	100,0	4587	21,60	4630
			B-B'	21,4	100,0	4673		
	Semi-Direto		A-B	11,0	50,0	4545	11,23	4451
			A-B'	10,7	50,0	4673		
			A-C	12,0	50,0	4167		
B 30%CV	7	Direto	A-A'	21,3	100,0	4695	21,30	4695
			B-B'	21,3	100,0	4695		
		Semi-Direto	A-B	11,5	50,0	4348	11,20	4464
			A-B'	11,5	50,0	4348		
			A-C	10,6	50,0	4717		
		28	Direto	A-A'	20,4	100,0	4902	20,40
	B-B'			20,4	100,0	4902		
	Semi-Direto		A-B	10,6	50,0	4717	10,57	4732
			A-B'	10,5	50,0	4762		
	B 30%CV+1%TiO2	7	Direto	A-A'	21,6	100,0	4630	21,50
B-B'	21,4			100,0	4673			
Semi-Direto	A-B		10,8	50,0	4630	11,10	4505	
	A-B'		10,7	50,0	4673			
	A-C		11,8	50,0	4237			
28	Direto		A-A'	20,5	100,0	4878	20,70	4831
			B-B'	20,9	100,0	4785		
	Semi-Direto		A-B	10,9	50,0	4587	10,43	4792
			A-B'	10,2	50,0	4902		
			A-C	10,2	50,0	4902		

Anexo 20 Resistividade elétrica

Resistividade Elétrica				
Molde Ø100xH200 (mm)				
Composição	Tempo (dias)	Resistividade elétrica (Ω.m)	Resistividade elétrica (Ω.m)	Resistividade elétrica média (Ω.m)
BR	7	A	106,0	106,00
		B	109,0	
		C	103,0	
	28	A	158,0	155,33
		B	151,0	
		C	157,0	
B 1% TiO ₂	7	A	94,0	94,33
		B	94,0	
		C	95,0	
	28	A	135,0	135,33
		B	136,0	
		C	135,0	
B 2% TiO ₂	7	A	92,0	92,33
		B	92,0	
		C	93,0	
	28	A	132,0	132,00
		B	133,0	
		C	131,0	
B 3% TiO ₂	7	A	75,0	74,67
		B	74,0	
		C	75,0	
	28	A	106,0	104,00
		B	106,0	
		C	100,0	
B 30%CV	7	A	65,0	65,00
		B	66,0	
		C	64,0	
	28	A	199,0	170,33
		B	211,0	
		C	101,0	
B 30%CV+1%TiO ₂	7	A	72,0	72,00
		B	71,0	
		C	73,0	
	28	A	303,0	305,00
		B	305,0	
		C	307,0	