

DM

Caracterização Experimental de Betões Pré-misturados a Seco

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Carolina Pereira de Freitas

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

janeiro | 2018

Caracterização Experimental de Betões Pré-misturados a Seco

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Carolina Pereira de Freitas

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR

Paulo Renato Camacho da Silva Lobo



Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Mestrado em Engenharia Civil

Carolina Pereira de Freitas

Licenciada em Engenharia Civil

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE BETÕES PRÉ-MISTURADOS A SECO

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Paulo Silva Lobo

Funchal, janeiro de 2018

Resumo

Devido à situação atual do setor da construção civil, existe a preocupação e necessidade de procurar soluções competitivas e eficientes para satisfazer exigências e problemas encontrados no dia-a-dia da construção. Portanto, o Laboratório Cimentos Madeira desenvolveu um novo produto, denominado por Betomix, com o objetivo de responder a exigências que se colocam pontualmente.

No trabalho aqui apresentado, pretendeu-se estudar as características mecânicas e o comportamento reológico do betão pré-misturado a seco Betomix. Esse material é especialmente adequado para facilitar a utilização de betão em obras de difícil acesso e em obras que têm como objetivo a execução ou a reparação de pequenos elementos de betão. Para além disso, este é um material de fácil preparação, dado que apenas necessita da adição em obra de uma determinada quantidade de água. Assim, para preparação deste tipo de betão, não é necessário conhecer a composição do mesmo, dado que as quantidades dos agregados, cimento, adjuvantes e eventuais adições são controladas em central, garantindo uma maior homogeneidade do produto aplicado.

Para avaliar as principais características do Betomix, neste trabalho, determinaram-se algumas das suas propriedades, tais como resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade e retração. De referir ainda que os correspondentes ensaios foram também realizados com um betão pronto convencional, da mesma classe de resistência do betão pré-misturado a seco, que serviu de referência, com o objetivo de comparar esses dois tipos de betão. De notar ainda que a composição dos dois tipos de betão estudados foi totalmente estabelecida pelo Laboratório Cimentos Madeira.

Nesta dissertação são apresentadas as características, as vantagens e desvantagens do betão pré-misturado a seco. Para além disso, são também explicados todos os ensaios realizados assim como os procedimentos e normas adotados. Os ensaios foram realizados no Laboratório Cimentos Madeira e no Laboratório Regional de Engenharia Civil da Região Autónoma da Madeira.

Os resultados obtidos mostram que o aumento do tempo entre a pré-mistura e a execução da amassadura de betão afeta significativamente várias propriedades do betão Betomix, entre elas a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Por outro lado, a retração do Betomix parece não ter sido influenciada de forma relevante pelo tempo após a pré-mistura. Verificou-se ainda que as equações preconizadas na NP EN 1992-1-1 (2010) para estimar a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade, como função da resistência à compressão, não se aplicam ao Betomix.

Abstract

Due to the current situation of the construction industry, there is a concern and need to seek competitive and efficient solutions to meet the demands and problems encountered in the construction day-to-day. Therefore, Cimentos Madeira Laboratory has developed a new product, called Betomix, in order to respond to requirements that arise on time.

In the work presented here, it was intended to study the mechanical characteristics and the rheological behavior of Betomix pre-mixed dry concrete. This material is especially suitable for facilitating the use of concrete in difficult-to-access works and in works whose purpose is the execution or repair of small concrete elements. In addition, this is an easy-to-prepare material, since it only requires the addition of a certain amount of water on the job site. Thus, for the preparation of this type of concrete, it is not necessary to know the composition of the concrete, since the quantities of aggregates, cement, additives and eventual additions are controlled in the plant, guaranteeing a greater homogeneity of the applied product.

In order to evaluate the main characteristics of Betomix, some properties were determined in this work, such as tensile strength, compressive strength, modulus of elasticity and retraction. It should also be noted that the corresponding tests were also carried out with a conventional ready-mix concrete, of the same strength class as the pre-mixed dry concrete, which served as a reference, in order to compare these two types of concrete. It should also be noted that the composition of the two types of concrete studied was fully established by Cimentos Madeira Laboratory.

In this dissertation the characteristics, advantages and disadvantages of pre-mixed concrete are presented. In addition, all tests performed as well as the procedures and standards adopted are also explained. The tests were carried out in the Cimentos Madeira Laboratory and in the Regional Laboratory of Civil Engineering of the Autonomous Region of Madeira.

The results show that the increase in the time between the premix and the execution of concrete mixing significantly affects several properties of Betomix concrete, including compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity. On the other hand, the Betomix retraction does not appear to have been significantly influenced by the time after premixing. It was also verified that the equations recommended in NP EN 1992-1-1 (2010) to estimate the compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity as a function of the compressive strength do not apply to Betomix.

Agradecimentos

Expresso o meu sincero agradecimento e reconhecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, de alguma forma colaboraram com a realização deste trabalho.

Manifesto um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Doutor Paulo Silva Lobo, pela dedicação, incentivo, e apoio dado na elaboração deste trabalho e em todo o meu percurso académico, assim como a sua permanente disponibilidade.

Um agradecimento ao Laboratório Cimentos Madeira, na pessoa do Sr. Miguel Guimarães, pela colaboração e disponibilização do material e equipamento necessário para elaboração dos ensaios, sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho.

Ao técnico do Laboratório Cimentos Madeira, Sr. Nélio Vieira, por todo o acompanhamento na preparação e execução dos ensaios experimentais, por todo o tempo despendido e por toda o apoio dado, expresso o meu mais sincero agradecimento.

Ao técnico do Laboratório Cimentos Madeira, Sr. Miguel Dinis, por toda a ajuda fornecida durante os ensaios experimentais, expresso a minha gratidão.

Ao Laboratório Regional de Engenharia Civil e aos técnicos que lá trabalham, na pessoa do Eng. Miguel Correia, pela disponibilidade e colaboração na realização de parte dos ensaios experimentais, manifesto o meu agradecimento.

Ao meu namorado, Emanuel Pinto, que com carinho sempre me apoiou emocionalmente e intelectualmente ao longo de todo o percurso académico, permitindo alcançar os meus objetivos. Obrigada pela compressão e incentivo constante.

Agradeço aos meus pais e irmã, por todo o incentivo, carinho e compreensão prestado ao longo de todo o curso e particularmente na elaboração deste trabalho.

Por fim, a todos os meus amigos, colegas, que ao longo de todo o percurso académico sempre me apoiaram. Obrigada.

ÍNDICE

Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	vii
Índice de Quadros	ix
Lista de Símbolos	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estrutura da dissertação	1
2. Revisão da literatura	3
2.1. Considerações iniciais.....	3
2.2. Betão pronto – conceito	3
2.3. Betão pré-misturado a seco – conceito.....	4
2.3.1. Preparação	5
2.3.2. Resistência	7
2.3.3. Vantagens.....	7
2.3.4. Desvantagens.....	8
2.4. Revisão da bibliografia sobre produtos semelhantes ao Betomix	8
2.5. Enquadramento legislativo e normativo do betão	9
2.6. Componentes do betão	14
2.7. Características do betão	25
2.7.1. Resistência à compressão	26
2.7.2. Resistência à tração	31
2.7.3. Trabalhabilidade	33
2.7.4. Módulo de elasticidade	38
2.7.5. Retração	43
2.8. Classificação do betão (NP EN 206-1, 2007)	50
2.8.1. Classes de resistência.....	50
2.8.2. Classes de consistência	51

3.	Descrição da campanha laboratorial	53
3.1.	Esquemática das atividades	53
3.2.	Materiais	56
3.3.	Pré-mistura do betão Betomix	58
3.4.	Amassadura do betão Betomix	60
3.5.	Amassadura do betão pronto C30/37	64
3.6.	Ensaio do betão no estado endurecido	65
3.6.1.	Moldagem, desmoldagem e cura dos provetes	67
3.6.2.	Resistência à compressão	70
3.6.3.	Módulo de elasticidade	74
3.6.4.	Resistência à tração	79
3.6.5.	Retração	82
4.	Apresentação e análise dos resultados obtidos	85
4.1.	Resistência à compressão	85
4.2.	Quantidade de água adicionada	88
4.3.	Resistência à tração	90
4.4.	Módulo de elasticidade	93
4.5.	Retração	97
5.	Conclusões finais	101
5.1.	Conclusões gerais	101
5.2.	Desenvolvimentos futuros	104
	Referências bibliográficas	105
	ANEXOS	111
A.	Folheto informativo referente ao produto betão Betomix	113
B.	Ficha técnica do Cimento Portland de Calcário CEM II/ A-L 42,5 R	115
C.	Resultados obtidos no ensaio de retração	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Camião betoneira.....	4
Figura 2 - Esquema do processo da produção do betão pré-misturado a seco (adaptado de Bento, 2016)	5
Figura 3 - Betoneira de eixo inclinado.....	6
Figura 4 - Relações entre as normas referentes à regulação do betão (adaptado de NP EN 206-1, 2007; Cachim, n.d.).....	10
Figura 5 - Relação entre os intervenientes e respetivas tarefas, definidas pela NP EN 206-1 (2007) (adaptado de TRF Planege, n.d.)	11
Figura 6 - Constituintes do betão (adaptado de Barbosa, 2013)	15
Figura 7 - Constituintes de um cimento CEM (adaptado de Faustino, 2011)	16
Figura 8 - Relação entre betões com diferentes tipos de cimento (adaptado de ACI 225R-99, 1999).....	18
Figura 9 - Ilustração dos períodos: a presa e o endurecimento (adaptado de Popovics, 1992)	19
Figura 10 - Curva tensão-extensão do betão em compressão e estados de fissuração (adaptado de Ozyildirim e Carino, 2006).....	27
Figura 11 - Variedade de relações da resistência do betão com a relação água-cimento (adaptado de Kosmatka et al., 2003).	28
Figura 12 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (McCormac e Brown, 2014).....	32
Figura 13 - Avaliação do valor de abaixamento (NP EN 12350-2, 2009)	35
Figura 14 - Relação entre o abaixamento e a temperatura do betão (adaptado de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1988)	38
Figura 15 - Curva tensão-extensão e módulo de elasticidade do betão.....	40
Figura 16 - Relação Água-Cimento vs módulo de elasticidade da pasta de cimento (adaptado de Yang et al., 1997)	41
Figura 17 - Comportamento típico da tensão-extensão do betão e dos seus constituintes (adaptado de Neville, 2011)	42
Figura 18 - Retração do betão nas primeiras vinte e quatro horas (adaptado de Coutinho e Gonçalves, 1994).....	44
Figura 19 - Retração do betão em função das dosagens de cimento e de água (Coutinho e Gonçalves, 1994).....	47

Figura 20 - Relação entre a dosagem de água e a retração por secagem (adaptado de Kosmatka et al., 2003)	47
Figura 21 - Influência da humidade relativa na retração do betão. Dosagem de cimento 350 kg/m ³ Relação água/cimento = 0.48. Prismas com 7x7x28 cm ³ (Coutinho e Gonçalves, 1994).	48
Figura 22 - Variação da retração com o tempo (adaptado de Gilbert e Ranzi, 2011)	48
Figura 23 - Fase da planificação.	55
Figura 24 - Fase da produção de betão e fase da realização dos moldes.	55
Figura 25 - Fase da realização dos ensaios.	56
Figura 26 - Agregados utilizados: a) Brita 4/10, b) Areia 0/4, c) Areia 0/2	57
Figura 27 - Cinzas Volantes	57
Figura 28 - Betoneira de eixo inclinado utilizada na produção do betão.....	58
Figura 29 - Materiais que constituem a pré-mistura do betão pré-misturado devidamente separados	58
Figura 30 - Pesagem dos materiais para produzir a pré-mistura do Betomix: a) Agregados, b) Adjuvante	59
Figura 31 - Introdução da pré-mistura num recipiente apropriado	59
Figura 32 - Três pré-misturas do betão Betomix devidamente identificadas e separadas	59
Figura 33 - Descarga do betão fresco	62
Figura 34 - Execução do ensaio de abaixamento	63
Figura 35 - Resultado do ensaio de abaixamento do betão Betomix (0.0 h)	63
Figura 36 - Processo esquemático desde o início da amassadura (1.5 h, 3.0 h e 4.5 h) de betão Betomix até à execução do ensaio de abaixamento	63
Figura 37 - Materiais devidamente pesados para produzir o betão pronto C30/37	64
Figura 38 - Aplicação do óleo descofrante nos moldes cúbicos.	67
Figura 39 - Moldes cúbicos devidamente identificados.....	67
Figura 40 - Enchimento dos moldes prismáticos, cilíndricos e cúbicos com o auxílio de colher	68
Figura 41 - Vibração do betão no molde cúbico	68
Figura 42 - Máquina para compactação dos moldes prismáticos.	68
Figura 43 - Rasamento das superfícies dos moldes cúbicos e prismáticos.....	68

Figura 44 - Provete de betão nos moldes cúbicos e cilíndricos expostos ao ar livre 16 horas após a sua betonagem.	69
Figura 45 - Colocação da placa de vidro no topo do molde prismático.	69
Figura 46 - Desmoldagem dos provetes cúbicos, prismáticos e cilíndricos.....	69
Figura 47 - Identificação dos provetes prismáticos com um marcador.....	70
Figura 48 - Colocação dos provetes cúbicos e cilíndricos submersos na água.	70
Figura 49 - Transporte dos provetes cúbicos para a sala onde se realizará o ensaio de resistência à compressão.....	71
Figura 50 - Pesagem do provete cúbico.	71
Figura 51 - Máquina de compressão uniaxial utilizada no ensaio de resistência à compressão.	71
Figura 52 - Provete ligeiramente danificado, a) dano no primeiro provete - vista frontal, b) dano no primeiro provete - vista lateral, c) dano no segundo provete	75
Figura 53 - Moldagem dos provetes para aplicação do produto, a) provete moldado com película adesiva, b) provete moldado com cartolina	75
Figura 54 - Cola estrutural - Sikadur 32 N, a) embalagem do produto, b) aparência dos dois componentes constituintes do produto.....	76
Figura 55 - Preparação para retificação dos provetes, a) ferramenta mecânica rotativa misturando os dois componentes do produto Sikadur 32 N, b) aplicação do produto nos dois provetes, c) remoção do excesso de produto	76
Figura 56 - Máquina utilizada para executar o ensaio do módulo de elasticidade	77
Figura 57 - a) Fixação externa do extensómetro ao provete cilíndrico, b) instrumento de medida – extensómetro elétrico	77
Figura 58 - Marcação do provete cilíndrico para execução do ensaio do módulo de elasticidade	77
Figura 59 - Máquina utilizada na leitura das deformações	78
Figura 60 - Centralização do provete na máquina de ensaio	78
Figura 61 - Máquina utilizada no ensaio de resistência à tração por compressão de provetes. a) vista frontal, b) vista lateral.....	80
Figura 62 - Pesagem do provete cilíndrico.....	80
Figura 63 - Posicionamento do provete cilíndrico na máquina de ensaio.....	80
Figura 64 - Rotura do provete cilíndrico após a realização do ensaio de resistência à tração por compressão.....	81

Figura 65 - Perno utilizado no molde prismático	82
Figura 66 - Execução do ensaio de retração, a) retractómetro analógico com suporte de aço, b) introdução da barra vertical comparadora no retractómetro, c) introdução do provete no retractómetro para leitura.....	83
Figura 67 - Aparelho que mede a temperatura e humidade relativa	84
Figura 68 - Período de secagem dos provetes prismáticos num recipiente fechado.....	84
Figura 69 - Período de secagem dos provetes numa das salas, a) vista lateral, b) vista frontal	84
Figura 70 - Variação da resistência à compressão do Betomix com o tempo decorrido desde a execução da pré-mistura, para as diferentes datas de ensaio (7, 28 e 56 dias)	85
Figura 71 - Evolução da resistência média à compressão dos diversos betões, Betomix, com idades 7 e 56 dias, obtida de dois modos distintos: Eurocódigo 2, e ensaios realizados	87
Figura 72 - Quantidade total de água adicionada em cada amassadura dos Betomix em estudo	89
Figura 73 - Variação da resistência à tração por compressão diametral do Betomix com o tempo após a pré-mistura, aos 28 dias de idade	91
Figura 74 - Evolução da resistência média à tração aos 28 dias dos diversos betões, Betomix, com a resistência média à compressão, obtida de dois modos distintos: Eurocódigo 2, e ensaios realizados.	92
Figura 75 - Módulo de elasticidade dos betões Betomix aos 28 dias	94
Figura 76 - Evolução do módulo de elasticidade dos diversos betões, Betomix, com idade aos 28 dias, obtida de dois modos distintos: NP EN 1992-1-1 (2010) e ensaios realizados.....	95
Figura 77 - Variação do módulo de elasticidade médio, com a resistência média à compressão dos betões Betomix e do betão C30/37 aos 28 dias	96
Figura 78 - Resultados da determinação do valor médio da retração para os provetes do Betomix e do C30/37	97
Figura 79 - Registo da humidade relativa (%) no local de armazenamento dos provetes prismáticos durante o período do ensaio de retração	99
Figura 80 - Registo de temperatura (°C) no local de armazenamento dos provetes prismáticos durante o período do ensaio de retração.....	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características do Betomix Simples R20, Betomix Plus R30 e Betomix Ultra R37 (adaptado de Bento, 2016).....	7
Tabela 2 - Classes de resistência à compressão para betões de massa volúmica normal (NP EN 206-1, 2007).	50
Tabela 3 - Principais características dos agregados.....	57
Tabela 4 - Composição do betão Betomix	57
Tabela 5 - Datas da execução das amassaduras e provetes para os diversos betões.....	60
Tabela 6 - Quantidade de água prevista, suplementar adicionada e total adicionada no Betomix e relação água/ligante	62
Tabela 7 - Valores de abaixamento obtidos após a conclusão de cada amassadura.....	64
Tabela 8 - Composição do betão C30/37.....	65
Tabela 9 - Datas da realização do ensaio de resistência à compressão para os diversos tipos de betão e o número de provetes ensaiados	66
Tabela 10 - Datas da realização do ensaio de resistência à tração e ensaio do módulo de elasticidade para os diversos tipos de betão e o número de provetes ensaiados.....	66
Tabela 11 - Registo do peso e da força dos provetes, de todos os tipos de betão, ensaiados à resistência à compressão nas diversas idades.....	72
Tabela 12 - Verificação dos critérios de conformidade para a resistência à compressão para a produção inicial.....	74
Tabela 13 - Módulos de elasticidade obtidos em cada um dos provetes, tensão mínima e máxima aplicada em cada provete.....	79
Tabela 14 - Valores obtidos da força máxima no ensaio de resistência à tração e os respetivos valores de tensão obtidos para cada provete ensaiado.....	81

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Principais tipos de cimento.	16
Quadro 2 - Requisitos mecânicos expressos como valores característicos especificados (adaptado de NP EN 197-1, 2001)	17
Quadro 3 - Classes de abaixamento	52
Quadro 4 - Classes Vêbê	52
Quadro 5 - Classes de compactação	52
Quadro 6 - Classes de espalhamento	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

ACI	American Concrete Institute
EC2	Eurocódigo 2
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
E	Especificação LNEC
EN	Euro Norma
a/c	Relação água cimento

1. Introdução

1.1. Motivação

Hoje em dia, devido à forte concorrência presente no mercado da construção, existe uma preocupação crescente em encontrar soluções competitivas, de forma a satisfazer as necessidades e problemas encontrados nesse tipo de mercado. Por essa razão, o Grupo Cimentos Madeira reavaliou o sistema de produção de betão, em busca de produtividade e competitividade, e desenvolveu um novo produto, denominado de Betomix, de forma a adaptar a produção de betão às exigências que se podem colocar pontualmente nos dias atuais. Um dos objetivos principais da criação deste produto é facilitar a aplicação do betão em obras de difícil acesso e obras cuja finalidade seja a execução de pequenos elementos de betão.

Constitui assim a motivação deste trabalho, o estudo do comportamento mecânico deste produto inovador, denominado Betomix, que surge como um produto alternativo ao betão pronto convencional.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste estudo, passou por compreender e analisar o comportamento mecânico dos betões pré-misturados a seco, realizando ensaios experimentais que permitem caracterizar esse betão, nomeadamente ensaios de resistência à compressão, de resistência à tração, de módulo de elasticidade e de retração. No presente estudo, pretendeu-se ainda efetuar uma análise comparativa, através da realização dos mesmos ensaios, entre este tipo de betão e o betão pronto C30/37.

Para cumprimento dos objetivos enunciados, seguiu-se a seguinte metodologia:

- realização de ensaios experimentais de resistência à compressão em provetes cúbicos, módulo de elasticidade e resistência à tração em provetes cilíndricos e ensaio à retração em provetes prismáticos de um betão pronto C30/37;
- realização de ensaios experimentais da resistência à compressão em provetes cúbicos, módulo de elasticidade e resistência à tração em provetes cilíndricos e ensaio à retração em provetes prismáticos de um betão pré-misturado a seco dos Cimentos Madeira;
- análise e discussão dos resultados obtidos.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo concluído com diversos anexos.

No primeiro capítulo, *Introdução*, apresenta-se um enquadramento do tema da dissertação, descreve-se a motivação para realização deste tema, os objetivos e a metodologia a seguir na elaboração deste trabalho, assim como a sua organização.

No segundo capítulo, *Revisão da literatura*, apresenta-se uma revisão da literatura acerca do material betão. Esta inicia-se com a definição do conceito de betão pronto, passando depois à definição do betão pré-misturado a seco, assim como à sua preparação, às suas características mecânicas e às vantagens e desvantagens que foi possível identificar. Seguidamente, procede-se a uma breve descrição do enquadramento normativo e legislativo do betão, mais precisamente sobre a especificação, desempenho, produção e conformidade do betão. Posteriormente, expõe-se uma descrição das propriedades de cada um dos materiais que compõem o betão: cimento, agregados, água, adições e adjuvantes. Nesse capítulo, faz-se também uma abordagem às principais características e propriedades do betão no estado fresco e endurecido, tais como: resistência à compressão, trabalhabilidade, resistência à tração, módulo de elasticidade e retração. Aborda-se igualmente a forma de classificação do betão segundo as classes de resistência e de consistência.

No terceiro capítulo, *Descrição da campanha laboratorial*, descrevem-se em pormenor todos os elementos relativos aos ensaios experimentais efetuados ao longo deste trabalho. Esse capítulo inicia-se com uma breve esquematização de todas as atividades desenvolvidas nos dois laboratórios: Laboratório Cimentos Madeira e Laboratório Regional de Engenharia Civil. Seguidamente, efetua-se uma descrição completa dos materiais empregues na produção do betão pré-misturado a seco e do betão pronto C30/37, assim como das suas características. Apresenta-se, ainda, o procedimento da produção dos dois tipos de betão. Na restante parte do capítulo, descreve-se a metodologia de todos os ensaios realizados.

No quarto capítulo, *Apresentação e análise dos resultados obtidos*, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados aos dois tipos de betão. É também efetuada uma análise crítica aos valores obtidos para o betão pré-misturado a seco, e, seguidamente, é realizada uma comparação das características mecânicas desse betão com os resultados obtidos nos ensaios para o betão pronto C30/37.

No quinto capítulo, *Conclusões finais*, apresentam-se as conclusões deste trabalho referindo os objetivos alcançados, assim como as sugestões para desenvolvimentos futuros.

2. Revisão da literatura

2.1. Considerações iniciais

O betão é o material de construção mais utilizado do mundo. A base desta afirmação pode ser atribuída a dois aspetos: o facto deste material ser utilizado numa variedade de aplicações na construção, tais como edifícios, estradas, ruas, barragens, estações de tratamento de águas, entre outras, e o facto da quantidade de betão utilizado ser muito maior do que a de qualquer outro material. De notar que a produção mundial do betão excede claramente a produção do aço (Li, 2011).

Sendo o betão um dos materiais mais utilizados, é importante conhecer e desenvolver novas soluções para que este possa ser empregue pelo consumidor em qualquer tipo de obra, com as características pretendidas e de forma mais rápida, sem grandes custos e equipamentos. Sendo assim, é necessário conhecer perfeitamente a composição e o comportamento deste material de forma a utilizá-lo corretamente, garantindo a sua resistência e durabilidade.

2.2. Betão pronto – conceito

O betão é um material constituído pela mistura, devidamente proporcionada, de pedras e areia, com um ligante hidráulico, água e, eventualmente, adjuvantes e adições (Coutinho, 2002a). A composição de um betão é definida pelas proporções dos vários componentes da mistura. Por isso, é fundamental realizar uma preparação adequada da mistura, assim como a escolha correta dos materiais constituintes. A composição de um betão é definida conforme as exigências pretendidas para a sua utilização, dependendo de várias características, tais como resistência, durabilidade, trabalhabilidade, compacidade, massa volúmica, entre outros (NP EN 206-1, 2007).

O betão pronto é preparado e misturado numa central de produção, fora do local de construção, e entregue num estado pré-misturado e não endurecido. Segundo a NP EN 206-1 (2007), é também designado de betão pronto:

- o betão produzido pelo utilizador fora do local de construção;
- o betão produzido no local de construção, mas não pelo utilizador.

Segundo Kosmatka, kerkhoff e Panarese (2003), o betão pode ser amassado de três maneiras distintas, a seguir indicadas:

- amassado completamente na central, por uma betoneira-misturadora, e entregue por um camião transportador, mantendo-se em agitação ou sem agitação;
- realização de amassadura parcial na central de produção, completada no camião betoneira;
- amassado completamente no camião betoneira. Esta é realizada no caminho para o local de aplicação ou à chegada.

O camião betoneira (Figura 1) é responsável pelo transporte de betão da central de produção até ao local de aplicação. É importante considerar a distância e o tempo executado pelo sistema de transporte do betão, de forma a evitar a possível perda de trabalhabilidade entre o início da amassadura e a colocação (Coutinho, 1988b).



Figura 1 - Camião betoneira

O tipo de transporte usado para deslocar o betão, desde que este é descarregado da betoneira até ao local onde vai ser colocado, depende do tipo de obra, e pode determinar a trabalhabilidade com que tem de ser utilizado (p.e., se for utilizado um sistema de bombagem, é importante garantir um betão suficientemente trabalhável de modo a percorrer a distância necessária). De referir ainda que é importante que o transporte de betão seja adequado, de modo que não ocorra segregação, evitando a perda da pasta de cimento, e a separação entre os agregados grossos e a pasta de cimento.

É importante salientar que, uma vez alcançada a segregação dos componentes durante o transporte de betão, esta jamais pode ser eliminada noutras operações. Pensando desta forma, a segregação deve ser impedida e nunca corrigida.

Por fim, dada a importância que o tempo tem sobre o betão fresco, o sistema de transporte deve ser o mais rápido possível, para evitar a perda de trabalhabilidade do betão e interrupções que provoquem na estrutura juntas de betonagem (pontos de descontinuidade) onde o betão não adere completamente ao betão que já se encontra em fase de presa, impedindo que o betão tenha uma ligação forte e uniforme.

2.3. *Betão pré-misturado a seco – conceito*

Os materiais utilizados no betão pré-misturado a seco são, como no betão pronto, agregados, água, ligante hidráulico e, eventualmente, adjuvantes e adições. Este produto consiste numa pré-mistura, realizada numa central de produção de betão certificada, de todos os materiais que constituem o betão, dos quais fazem parte os agregados, adições, adjuvantes e o ligante hidráulico, com exceção da água. Para a realização da pré-mistura, os materiais são devidamente pesados na central, de acordo com a quantidade desejada, de forma a cumprir todas as características do betão pretendido.

A diferença na produção deste betão pré-misturado relativamente à do betão pronto consiste no facto de não ser adicionada água na pré-mistura, realizada na central de betão. A única água presente nesta fase é a que está contida nos agregados.

Contrariamente ao betão pronto, este tipo de betão pode ser levantado na central de betão com recurso a uma viatura de caixa aberta, não sendo necessário recorrer a uma autobetoneira como meio de transporte. De forma a ser possível garantir uma correta dosagem dos constituintes, existe uma quantidade mínima de produção que é de 1 m³.

A pré-mistura é posteriormente transportada para o local de utilização, sendo a mistura de betão preparada por um trabalhador com o auxílio de uma betoneira, num período máximo de três horas após a produção em central, tempo até ao qual consegue-se obter as características requeridas, devendo a pré-mistura estar protegida do sol, chuva ou vento. A Figura 2 representa esquematicamente todo o processo, desde a produção até à aplicação.



Figura 2 - Esquema do processo da produção do betão pré-misturado a seco (adaptado de Bento, 2016)

O Betomix é especialmente adequado para a execução de trabalhos de construção correntes, tais como pilares, pavimentos, soleiras, enchimentos, paredes de betão simples, betão ciclópico, adequado igualmente para obras de difícil acesso e execução de pequenos elementos de betão.

No anexo A, apresenta-se um folheto informativo, referente ao produto Betomix, fornecido pelo Grupo Cimentos Madeira, com as principais características do produto e indicações de preparação.

2.3.1. Preparação

Após a realização da pré-mistura, em central, procede-se ao transporte do produto para o local de utilização. O processo de produção deste tipo de betão é igual ao de misturas realizadas em betoneiras em obra, utilizando os mesmos equipamentos e ferramentas.

A amassadura é efetuada com recurso a um misturador tipo betoneira (Figura 3). A eficiência da operação de amassadura depende da forma e conceção das placas helicoidais da betoneira.

No entanto, a descarga ocorre sempre em boas condições, pois o betão sai rapidamente, numa massa homogénea e não segregada, no momento da inclinação do eixo de rotação (Coutinho, 1988b).



Figura 3 - Betoneira de eixo inclinado

Procede-se à colocação da pré-mistura no interior da betoneira, e adiciona-se água ao produto, deixando amassar por, aproximadamente, três minutos.

De notar que a água adicionada deve estar isenta de quaisquer impurezas, cumprindo a norma NP EN 1008 (2003), devendo, em caso de dúvida, ser utilizada água potável da rede pública.

Dada a importância da quantidade de água presente no betão, é importante respeitar a quantidade recomendada pelo fornecedor para ser adicionada à amassadura, sendo aconselhada a porção de um balde com dez litros de água por cada dois baldes de 50 litros de Betomix.

A água desempenha um papel fundamental na massa fresca e na fase de endurecimento do betão. No estado fresco, a água permite que o material obtenha uma trabalhabilidade adequada à boa colocação e compactação (Carminho, 2012). No estado endurecido, a água participa nas reações de hidratação do cimento que conferem a resistência pretendida ao betão (Carminho, 2012). No entanto, salienta-se que a quantidade de água utilizada no fabrico do betão deve ser limitada ao mínimo, dado que a água em excesso se evapora, levando a um aumento da porosidade e da permeabilidade, o que prejudica a resistência e torna o betão mais suscetível à deterioração provocada pelos agentes agressivos afetando a sua durabilidade. Desde modo, a quantidade de água a ser utilizada deve ser a necessária para se obter a trabalhabilidade pretendida (Carminho, 2012).

A relação água/cimento é um critério fundamental na determinação do desempenho e comportamento do betão. Esta relação consiste na medição da dosagem de água contida na mistura do betão em relação à dosagem de massa de cimento. A dosagem de água medida é a diferença entre a quantidade total de água presente no betão fresco e a quantidade de água absorvida pelos agregados (Carminho, 2012).

2.3.2. Resistência

A gama de produtos designada de Betomix está classificada segundo a norma NP EN 206-1 (2007) e a especificação E 464 (2005). As resistências que foram desenvolvidas até à data são três, procurando compreender diferentes aplicações. Existe o Betomix simples R20, equivalente a uma resistência C16/20 de um betão pronto, o Betomix Plus R30, equivalente a uma resistência C25/30 de um betão pronto, e o Betomix Ultra R37, equivalente a uma resistência C30/37 de um betão pronto. Na Tabela 1 são apresentadas as diversas resistências para o betão pré-misturado, com as respetivas características relativas à sua composição, resistência e classe de exposição ambiental.

Tabela 1 - Características do Betomix Simples R20, Betomix Plus R30 e Betomix Ultra R37 (adaptado de Bento, 2016)

Características	Betomix Simples R20	Betomix Plus R30	Betomix Ultra R37	Normas
Granulometria máxima (mm)		10		-
Água de amassadura (%)		10 a 12		-
Relação a/c	< 0.65	< 0.65	< 0.55	LNEC E 464
Abaixamento (cm)		10 a 15		NP EN 12350-2
Massa volúmica (kg/m ³)		2350 ± 100		NP EN 12350-6
R. Compressão (28 dias)	C16/20	C25/30	C30/37	NP EN 12390-3
Classe de exposição ambiental	X0	XC1 e XC2	XC1 XC2 XC3 e XC4	NP EN 206-1 LNEC E 464

2.3.3. Vantagens

Existem diversas vantagens na aplicação deste tipo de produto. Um dos seus grandes benefícios, maior razão do seu sucesso, é a facilidade de manuseamento e aplicação. Pois para produzir este produto em obra basta a adição de água. Seguem-se algumas das principais vantagens da aplicação do Betomix (Bento, 2016):

- facilidade de transporte, permitindo a sua utilização em locais de difícil acesso, como por exemplo: levadas, caminhos agrícolas, zonas históricas no centro das cidades;
- obras de pequena e média dimensão sem acesso a autobetoneira;
- não requer estaleiro;
- garante um betão estrutural de qualidade;

- garantia da resistência mecânica pretendida;
- elevada plasticidade;
- elevada rapidez de execução em obra;
- económico, evitando desperdícios.

2.3.4. Desvantagens

Seguem-se as principais desvantagens da aplicação e produção do material Betomix:

- deve evitar-se uma exposição deste material a ventos fortes, chuva e uma exposição solar intensa;
- maior dificuldade de garantir em obra a fabricação do betão com as dosagens corretas de água;
- período de tempo máximo de três horas para proceder à introdução de água na pré-mistura de betão.

2.4. Revisão da bibliografia sobre produtos semelhantes ao Betomix

Com base numa revisão das informações atualmente disponíveis, constatou-se a existência de um produto, o betão pré-doseado a seco, que embora tenha um conceito ligeiramente diferente ao Betomix, produz materiais com os mesmos objetivos. Existem diversos produtores deste material, a nível nacional temos a Secil e a Cimpor. No estrangeiro temos a Betonex, Codepo, Building Products Supplies, Boral, Quikrete, Votorantim, entre outros.

Este produto é um betão seco, cuja composição é corretamente formulada pelos fabricantes de acordo com as características pré-estabelecidas por estes, para venda no mercado da construção. No entanto, existem variantes deste produto dependendo do fabricante, embora na generalidade, este é constituído por uma mistura devidamente proporcionada, embalada em sacos de papel, contendo agregados secos, ligante hidráulico (cimento) e adjuvantes, contudo num dos fabricantes investigados, a Betonex, verifica-se que existe uma separação do cimento, armazenado num saco apropriado, dos restantes componentes. Para proceder à utilização deste tipo de betão, basta adicionar-se a quantidade de água recomendada pelo fabricante. A Secil recomenda uma quantidade de água a ser adicionada em função da consistência pretendida em obra.

Este betão pré-doseado a seco é embalado em sacos, e o seu peso varia consoante o produtor, mas geralmente ronda os 30 kg. A Secil e a Cimpor vendem este material em paletes plastificadas com cerca de 54 sacos, que devem ser cuidadosamente armazenados, ao abrigo de temperaturas extremas e da humidade. Este produto, segundo esses fabricantes portugueses, tem validade de 12 meses sobre a data de fabrico, se forem mantidas todas as condições da embalagem original e de armazenamento.

Para aplicação deste betão pré-doseado a seco, deve ser realizada uma amassadura com recurso a um misturador tipo betoneira, adicionando a quantidade de água recomendada, podendo, no entanto, em alguns produtos, ser realizada manualmente. O tempo da realização da amassadura deve ser o necessário para obtenção de uma mistura homogénea. Em certos produtos, os fabricantes recomendam repousar cerca de cinco minutos antes da utilização do betão. De referir ainda que existem diversos fabricantes, a Building Products Supplies e Codepo, cujo material é possível realizar a amassadura dentro da própria embalagem, através de diversos movimentos sucessivos, até obtenção de uma mistura homogénea.

É importante salientar que o betão, uma vez amassado, deve ser aplicado de imediato, e nunca deve ser adicionada mais água após a amassadura, sob pena de afetar seriamente o seu desempenho.

Este tipo de betão pré-doseado a seco é especialmente indicado na execução para trabalhos de construções correntes, pavimentações, betonagens *in situ* de elementos estruturais, soleiras, entre outros. O betão pré-doseado a seco é sobretudo recomendado para:

- pequenas betonagens;
- condições de difícil acesso;
- distâncias incomportáveis à central.

Relativamente à resistência do betão, existem diversas classes de resistências disponíveis para este produto que variam conforme o fabricante. Entre os produtos Portugueses consultados encontraram-se as seguintes resistências: C16/20; C25/30; C30/37; C35/45. No entanto, salienta-se que existe um betão pré-doseado a seco de um fabricante estrangeiro que permite a introdução de uma determinada quantidade de cimento, para um betão com uma resistência especificada de 20 MPa, que permite um aumento da resistência até aos 32 MPa.

Este tipo de betão pré-doseado a seco diferencia-se do Betomix, essencialmente nestes aspetos:

- os agregados utilizados no betão pré-doseado a seco, têm de ser secos em estufa;
- este é ensacado, permitindo um armazenamento do mesmo;
- o betão pré-doseado a seco tem um prazo de validade de 12 meses, se forem mantidas todas as condições recomendadas;
- existência de um fabricante português - Secil - do betão pré-doseado a seco, que fornece uma classe de resistência superior em comparação com as classes de resistência disponíveis para o produto Betomix.

2.5. Enquadramento legislativo e normativo do betão

O decreto de lei nº 301/2007 define as condições que são exigidas aos fabricantes para a colocação dos betões de ligantes hidráulicos no mercado nacional, assim como as disposições relativas à execução de estruturas de betão, de forma a proporcionar um aumento dos requisitos

de segurança, qualidade e durabilidade das estruturas de betão. Sendo assim, o betão destinado a ser colocado no mercado deve ser especificado e produzido em conformidade com a NP EN 206-1 – “Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”, e a execução de estruturas de betão deve ser feita de acordo com a norma NP ENV 13670-1 – “Execução de estruturas em betão. Parte 1: Regras Gerais”.

No esquema da Figura 4 observam-se as relações entre as normas referentes à regulação do betão quanto à execução, projeto, materiais constituintes e métodos de ensaios.

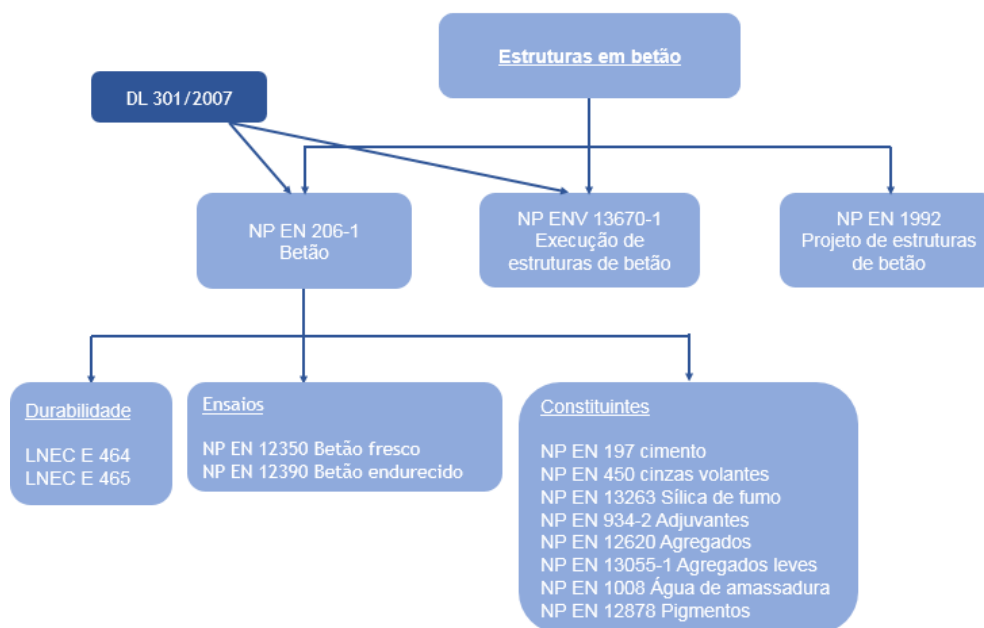


Figura 4 - Relações entre as normas referentes à regulação do betão (adaptado de NP EN 206-1, 2007; Cachim, n.d.)

A norma europeia NP EN 206-1 (2007) aplica-se ao betão de massa volúmica normal, betão pesado e betão leve, destinado a estruturas betonadas no local, estruturas prefabricadas para edifícios e estruturas de engenharia civil. O betão referido pode ser amassado no local, betão pronto ou betão produzido numa fábrica de prefabricados de betão. Esta norma especifica diversos requisitos para:

- materiais constituintes do betão;
- propriedades do betão fresco e endurecido;
- especificação do betão;
- entrega do betão fresco;
- controlo de produção;
- critérios de conformidade e avaliação da conformidade.

São esclarecidas também as tarefas entre as partes intervenientes (especificador, produtor e utilizador) durante as fases de projeto cuja relação é apresentada na Figura 5.

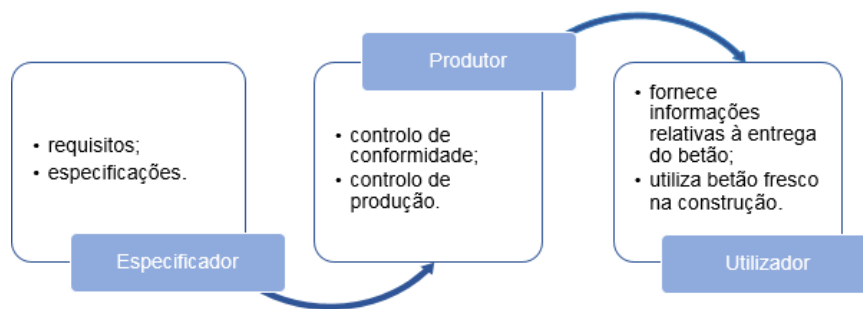


Figura 5 - Relação entre os intervenientes e respetivas tarefas, definidas pela NP EN 206-1 (2007)
(adaptado de TRF Planege, n.d.)

A especificação do betão é uma descrição específica das características e propriedades do betão para que possa atingir um determinado comportamento e desempenho. O especificador deve garantir que todos os requisitos relevantes, relativos às propriedades do betão, se encontram na especificação fornecida ao produtor. Devem ser também incluídos na especificação todos os requisitos para as propriedades do betão que sejam importantes para o transporte após a entrega, para a colocação, compactação, cura ou outro tratamento adicional. Os requisitos especiais devem igualmente ser incluídos sempre que necessário na especificação (p.e., para obtenção de um acabamento arquitetónico) (NP EN 206-1, 2007).

O especificador deve ter em consideração os seguintes aspetos de acordo com a NP EN 206-1 (2007):

- a utilização do betão fresco ou endurecido;
- as condições de cura;
- as dimensões da estrutura;
- a exposição da estrutura às ações ambientais;
- requisitos para agregados expostos ou acabamento superficial;
- requisitos relacionados com o recobrimento das armaduras ou largura mínima da secção (p.e. máxima dimensão do agregado mais grosso);
- restrições à utilização de materiais constituintes com aptidão estabelecida, (p.e. resultante das classes de exposição).

Segundo a NP EN 206-1 (2007), existem três formas de especificar o betão:

1. Betão de comportamento especificado

Betão cujas propriedades e características requeridas são especificadas ao produtor, sendo este responsável pelo fornecimento de um betão que satisfaça as propriedades e características indicadas.

2. Betão de composição prescrita

Betão cuja composição e materiais constituintes requeridos são especificados ao produtor, sendo este responsável pelo fornecimento de um betão com a composição indicada.

3. Betão de composição prescrita em norma

É utilizado um betão cuja composição se encontrar estabelecida numa norma válida no local de utilização do betão, que ainda não existe em Portugal.

A especificação do betão de comportamento especificado (situação 1) deve conter em todos os casos requisitos fundamentais específicos a seguir indicados (NP EN 206-1, 2007):

- requisito de conformidade com a NP EN 206-1 (2007);
- classe de resistência à compressão;
- classes de exposição ambiental;
- máxima dimensão do agregado mais grosso;
- classe de teor de cloretos;
- classe de massa volúmica (betão leve);
- massa volúmica pretendida (betão leve e betão pesado);
- classe de consistência ou, valor pretendido para a consistência (betão pronto e betão fabricado no local).

Para além dos requisitos principais, podem igualmente ser especificados determinados aspetos, sempre que necessário, através de requisitos adicionais de desempenho e de métodos de ensaio. A norma NP 206-1 (2007) define ainda a possibilidade de indicar de uma forma abreviada as características essenciais do betão de comportamento especificado.

Sempre que é estabelecido um betão de composição prescrita (situação 2), este deve ser especificado, de acordo com a NP EN 206-1 (2007), através dos requisitos fundamentais a seguir indicados:

- requisito de conformidade com a EN 206-1;
- dosagem de cimento;
- tipo e classe de resistência do cimento;
- razão a/c ou consistência, através de classe ou valor pretendido;
- tipo, categorias e teor máximo de cloretos dos agregados; no caso de betão leve ou pesado, a massa volúmica ou mínima dos agregados, conforme o caso;
- máxima dimensão do agregado mais grosso;
- tipo e quantidade de adjuvantes ou adições, sempre que utilizados;
- origens dos adjuvantes ou adições, sempre que utilizados, e do cimento, em substituição das características impossíveis de definir por outros meios.

Tal como na situação de especificação do betão de comportamento especificado, neste tipo de especificação existe a possibilidade de serem ainda incluídos requisitos adicionais.

Relativamente aos requisitos essenciais, necessários na especificação do betão de composição prescrita em norma (situação 3), a especificação deve ser estabelecida indicando, de acordo com a NP EN 206-1 (2007), os seguintes aspetos:

- norma válida no local de utilização do betão;
- designação do betão naquela norma;

Este tipo de especificação do betão, pode apenas ser utilizado em betão normal para estruturas simples ou armadas, classes de resistência à compressão $\leq C16/20$ (exceto se existirem disposições válidas no local de utilização do betão que permitam a classe C20/25) e classes de exposição X0 e XC1 (exceto se existirem disposições válidas no local de utilização do betão que permitam outras classes de exposição) (NP EN 206-1, 2007).

Salienta-se que no caso de uma nova composição de um betão, devem ser executados ensaios iniciais, realizados antes do início da produção, para demonstrar que o betão satisfaz todos os requisitos especificados para o betão nos estados fresco e endurecido, e da mesma forma verificar se adquire o desempenho pretendido com uma margem apropriada (NP EN 206-1, 2007). Os ensaios iniciais são da responsabilidade do especificador no caso do betão de composição prescrita, e do produtor no caso do betão de comportamento especificado (NP EN 206-1, 2007).

De acordo com a NP EN 206-1 (2007), todo o betão deve ser sujeito ao controlo de produção, incluindo o controlo da conformidade, sob responsabilidade do produtor. O controlo de produção abrange todas as medidas essenciais para manter as propriedades do betão em conformidade com os requisitos especificados. Inclui (NP EN 206-1, 2007):

- seleção de materiais;
- formulação do betão;
- procedimentos de produção do betão;
- planos de inspeções e ensaios;
- utilização dos resultados dos ensaios efetuados sobre os materiais constituintes, o betão fresco e endurecido e o equipamento;
- inspeções do equipamento de transporte do betão fresco, se necessário;
- controlo de conformidade.

Para além destes requisitos, existem outros que devem ser considerados noutros aspetos do controlo de produção, tendo em conta o tipo e volume da produção, as obras, o equipamento, os procedimentos e as regras usadas no local de produção e de utilização do betão (NP EN 206-1, 2007).

Para um controlo de produção adequado, é necessário que o produtor desenvolva e implemente um sistema de controlo de produção que se encontra documentado através de um manual, incluindo instruções, procedimentos e relação hierárquica entre o pessoal envolvido, minimizando assim o risco de betão não conforme e permitir a identificação e registo de qualquer problema de qualidade. Este sistema deve ser revisto pela direção do produtor, pelo menos de dois em dois anos.

Relativamente ao controlo de conformidade, este é uma parte integrante do controlo de produção, e inclui o conjunto de ações e de decisões a implementar de acordo com as regras de conformidade previamente adotadas para verificar a conformidade do betão com as especificações (NP EN 206-1, 2007).

Para o produtor proceder à entrega de betão fresco é necessário que o utilizador (pessoa ou entidade que utiliza o betão fresco na execução de uma estrutura) tenha acordado com este todas as informações relevantes necessárias tais como (NP EN 206-1, 2007):

- data, hora e a cadência da entrega;
- transporte especial no local (se for relevante);
- métodos especiais de colocação (se for relevante);
- limitações dos veículos de entrega (tamanho, altura, peso bruto, entre outros).

2.6. Componentes do betão

Para assegurar as propriedades e desempenho do betão, é preciso garantir a sua uniformidade. Por isso, é importante conhecer as propriedades dos materiais constituintes. Visto que o produtor tem liberdade para alterar a mistura do betão dentro de alguns limites (podendo alterar algum dos seus constituintes), este tem de conhecer as propriedades dos seus constituintes de modo a garantir que não ocorram mudanças imprevistas nas propriedades críticas de componentes individuais, arriscando causar problemas no desempenho do betão fresco ou endurecido.

Existem materiais constituintes que afetam mais o desempenho do betão que outros. Fiorato (2006) refere que, em 1988, os membros do Comité C1 da ASTM, realizaram um estudo para conhecer a importância relativa dos materiais na fabricação do betão. Esse estudo consistiu na realização de um questionário aos membros do Comités do ASTM C1, sobre cimento, e C9, sobre o betão e agregados do betão, conhecedores e experientes no mundo da tecnologia dos materiais do betão. Todos estes membros foram interrogados relativamente ao impacto que as variações nas propriedades dos materiais constituintes teriam no desempenho do betão. Não sendo abordado o aspeto de desempenho (força, durabilidade, entre outros) que poderia ser afetado. Foram ordenados vários materiais constituintes de betão pela ordem de importância. À pesquisa responderam 28 membros, cuja resposta tendeu, por uma margem significativa, para as variações no cimento como sendo de maior importância e de menor importância as variações nas características da água.

Segundo Kosmatka et al. (2003), o betão em relação aos materiais constituintes conforme apresenta-se na Figura 6 é composto por 7% a 15% de cimento, 14% a 21% de água, 4% a 8% de ar, e 60% a 75% de agregados.

Sendo o cimento o constituinte mais importante do betão, a sua escolha deve ser feita em função da utilização do betão, ou seja, se é usado em betão simples, em betão armado, ou em betão pré-esforçado (Cunha, 2011). É importante ter-se em conta as dimensões da estrutura (desenvolvimento de calor pelo betão na estrutura), as condições ambientais a que a estrutura vai estar sujeita e ainda a reatividade potencial dos agregados com os álcalis dos constituintes (NP EN 206-1, 2007).

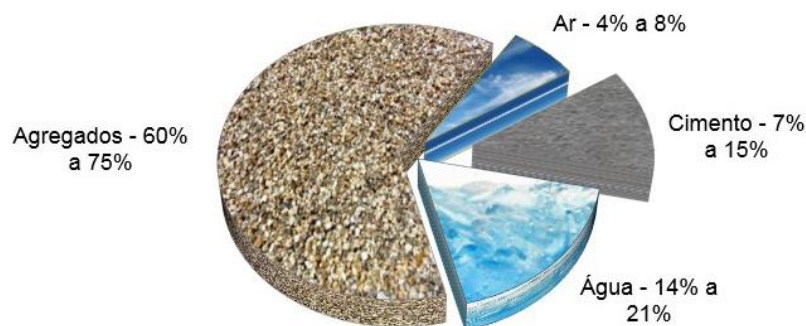


Figura 6 - Constituintes do betão (adaptado de Barbosa, 2013)

A palavra Cimento deriva do latim “Caementum”, expressão que identifica um material que contém uma mistura de pedras, areia, cal, água, cascalho. O cimento é um ligante hidráulico, formado a partir de uma mistura de pó muito fino inorgânico constituída por quantidades adequadas de matéria-prima como o calcário, argila, e outras substâncias apropriadas ricas em sílica, ferro ou alumina. Inicialmente na matéria-prima são encontrados na sua composição química quatro óxidos principais: óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃). O cimento é considerado hidráulico devido à mistura formar uma pasta que faz presa e endurece mediante reações química e processos de hidratação e que, depois do endurecimento, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água (NP EN 197-1, 2001). Este é considerado um ligante devido à propriedade de aglomerar uma proporção elevada de materiais como areias, godos, pedra britada, entre outros. Este atributo confere ao conjunto trabalhabilidade adequada durante um tempo suficiente, grande coesão e níveis de resistência especificados, tornando-o habilitado a ser utilizado na construção como argamassas e betões (Coutinho, 1988a).

Atualmente existem vários tipos de cimento produzidos e comercializados em Portugal, definidos e apresentados na Norma Portuguesa – Cimento: Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes (NP EN 197-1, 2001). Esta norma define as especificações, requisitos mecânicos, físicos e químicos, e os critérios de conformidade de cada cimento incluindo as percentagens de cada constituinte para produzir os diferentes produtos nas várias classes de resistência. Os cimentos em conformidade com a NP EN 197-1 (2001), são designados de cimento CEM, estes são compostos de diferentes materiais e formulados em função das quantidades de clínquer e outros constituintes principais (escória, pozolana, cinza volante, calcário, sílica de fumo, xisto cozido e sulfatos de cálcio) podendo ainda conter outros constituintes adicionais minoritários e os aditivos que são adicionados para melhorar o fabrico ou as propriedades do cimento (Figura 7). Os cimentos especificados na norma são 27 e diferem-se uns dos outros pela seleção do tipo de constituintes presentes em cada cimento e na proporção entre si.

O cimento mais utilizado é o Portland (CEM I), a norma enumera para além deste, quatro tipos principais de cimento agrupados em: CEM II, CEM III, CEM IV e CEM V. Os principais tipos de cimento estão expostos no Quadro 1.

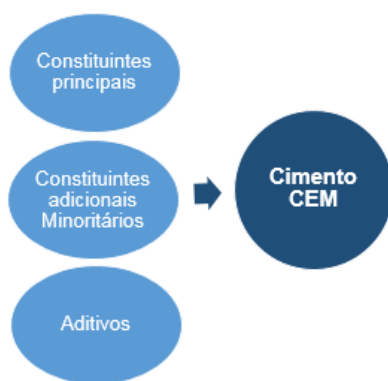


Figura 7 - Constituintes de um cimento CEM (adaptado de Faustino, 2011)

Quadro 1 - Principais tipos de cimento.

Tipos principais de cimento	Notação
Cimento Portland	CEM I
Cimento Portland de escória	CEM II-S
Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II-D
Cimento Portland de pozolana natural	CEM II-P
Cimento Portland de pozolana natural calcinada	CEM II-Q
Cimento Portland de cinza volante siliciosa	CEM II-V
Cimento Portland de cinza volanta calcária	CEM II-W
Cimento Portland de xisto cozido	CEM II-T
Cimento Portland de calcário	CEM II-L
Cimento Portland composto	CEM II
Cimento de alto forno	CEM III
Cimento pozolânico	CEM IV
Cimento composto	CEM V

À exceção do CEM I, que é composto apenas por clínquer e constituintes adicionais minoritários, os restantes cimentos correntes são formados por diversos materiais minerais que se podem incorporar com o clínquer que são designados por constituintes principais quando são adicionados numa percentagem superior a 5% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários, originando um ligante hidráulico comerciável em conformidade com as normas europeias em vigor (Faustino, 2011).

A escolha do tipo de cimento tem de ser ponderada, é necessário perceber o destino do betão que será fabricado e qual será a sua exposição ambiental, com o propósito de saber qual a quantidade, qualidade e tipo de cimento mais aconselhável a utilizar na mistura.

Em termos de requisitos mecânicos a NP EN 197-1 (2001) enumera uma das características mais referidas no cimento que são as classes de resistência. Nesta norma servem de referência três classes de resistência: classe 32.5, classe 42.5 e classe 52.5. As três classes estão diretamente relacionadas com a resistência à compressão aos 28 dias para cada cimento, sendo esta a resistência de referência. Para cada classe de resistência de referência são consideradas duas classes de resistência aos primeiros dias (2 e 7 dias), atribuindo-se a designação de “N” (normal) ou “R” (rápido) conforme o cimento adquire as resistências normais ou mais elevadas logo nos primeiros dias de cura (Quadro 2).

Quadro 2 - Requisitos mecânicos expressos como valores característicos especificados (adaptado de NP EN 197-1, 2001)

Classe de resistência	Resistência à compressão MPa			
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	
	2 dias	7 dias	28 dias	
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥ 10.0	-		
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 R	≥ 20.0	-		
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-
52.5 R	≥ 30.0	-		

Em termos gerais, os cimentos das classes 32.5 e 42.5 são mais utilizados em obras correntes. Já no caso da classe 52.5 geralmente são utilizados em obras que exigem resistências mecânicas mais elevadas, podendo ser utilizados para o fabrico de betões de elevado desempenho (Loureiro, 2013).

A resistência inicial de compressão de um betão é influenciada pelo tipo de composição química do cimento. Os principais responsáveis pela produção de resistência no cimento Portland são o silicato tricálcico (C_3S), silicato bicálcico (C_2S) e aluminato tricálcico (C_3A), as proporções destes componentes podem variar conforme o tipo de cimento e podem alterar tanto as características de resistência inicial como as de resistência a longo prazo. O ACI 225R-99 (1999) apresenta um estudo, onde se analisaram as resistências à compressão de vários betões com diferentes tipos de cimento, e chegou-se à conclusão que os betões quando atingem os 90 dias de idade as resistências à compressão são semelhantes entre todos eles. Os betões que são constituídos por cimentos com maior quantidade de C_3S apresentam antes dos 90 dias as resistências mais elevadas em comparação com os outros, e estes apresentam após os 90 dias uma evolução de resistência menor relativamente aos outros tipos de cimento, que apresentavam uma resistência inicial mais baixa. Um aumento da proporção de C_2S com reduções proporcionais de C_3S , geralmente reduzem a força nos primeiros 28 dias e aumentam a resistência em idades de 45 a 60 dias até 5 ou mais anos. Por exemplo, o betão com o cimento Portland tipo IV a percentagem de C_3S pode ser tão baixa como 20% e a percentagem de C_2S pode ser tão elevada

como 55%, resultando numa resistência inicial aos 28 dias com cerca de 25 MPa, e uma resistência aos 180 dias mais elevada com cerca de 40 MPa (Figura 8).

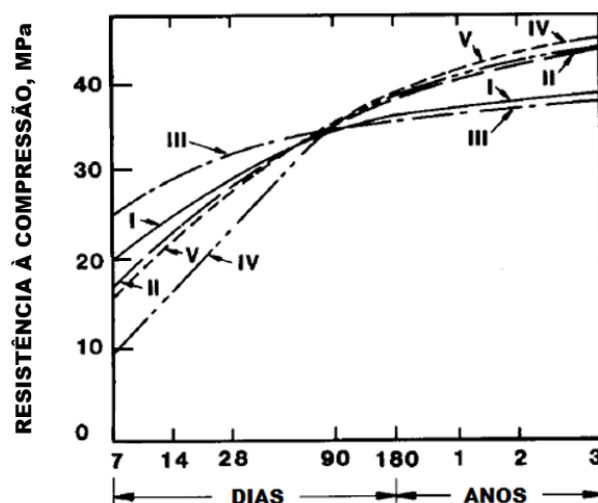


Figura 8 - Relação entre betões com diferentes tipos de cimento (adaptado de ACI 225R-99, 1999)

Conclui-se com este estudo, que são três os constituintes do cimento que contribuem essencialmente para o aumento da resistência mecânica a idades diferentes no betão, sendo esses o silicato tricálcico (C_3S), o silicato bicálcico (C_2S) e o aluminato tricálcico (C_3A). O silicato tricálcico contribui para um aumento da resistência em idades iniciais, pelo contrário o silicato bicálcico contribui para o aumento da resistência a longo prazo, já o aluminato tricálcico contribui para a resistência principalmente nas vinte e quatro horas iniciais.

Um fator também importante é a mistura do cimento com a água. Os silicatos e os aluminatos do cimento Portland, originam os produtos de hidratação ou hidratos produzindo uma pasta que gradualmente endurece passando do estado líquido ao sólido, neste processo distinguem-se dois períodos: a presa e o endurecimento. Esta pasta exibe uma considerável plasticidade (permanece trabalhável) e mantém-na durante um intervalo de tempo (pode durar de 40 a 140 minutos), isto é, período disponível entre a adição de água e o acabamento e compactação satisfatória após o transporte e colocação do betão, este período designa-se por período dormente ou de indução. No entanto, passado algum tempo a pasta começa a tornar-se rígida, embora sem qualquer força considerável (Popovics, 1992). O processo de endurecimento ocorre após o tempo de presa. É comum falar-se sobre o início de presa, que é o instante em que a massa começa a perder a sua consistência pastosa e apresenta um ganho inicial de resistência, e o fim de presa é quando a massa se transforma numa massa rígida, instante esse de difícil determinação. A pasta depois de se tornar rígida vai endurecer cada vez mais ao longo do tempo entrando no processo de endurecimento onde são desenvolvidas todas as características que são necessárias para que o material desempenhe o seu papel na construção (Coutinho, 1988a).

Uma apresentação esquemática dos períodos de presa e endurecimento do cimento é representada na Figura 9.

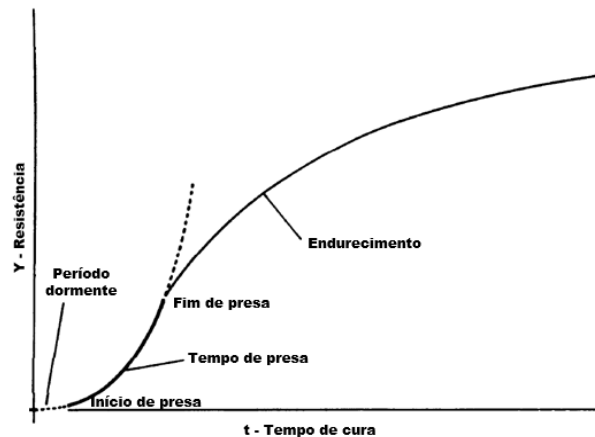


Figura 9 - Ilustração dos períodos: a presa e o endurecimento (adaptado de Popovics, 1992)

Relativamente aos agregados, tal como referido anteriormente, estes são utilizados em grande quantidade constituindo uma grande percentagem na composição do betão, sendo assim, a qualidade dos agregados é extremamente importante. A norma NP EN 12620 (2004) indica o agregado como sendo um material granular utilizado na construção, que pode ser natural (sujeito apenas a processamento mecânico natural, por exemplo a areia rolada, os godos), artificial (obtido através de um processo industrial envolvendo modificações das propriedades mecânicas, térmicas ou outras, como por exemplo agregados que resultam da fragmentação mecânica de rocha, a brita e a areia britada) ou reciclado (é obtido através do processamento de materiais inorgânicos previamente utilizados na construção). Relativamente à massa volúmica existem três tipos de agregados (NP EN 206-1, 2007):

- agregados normais com massa volúmica maior que 2000 kg/m^3 e menor que 3000 kg/m^3 ;
- agregados leves com massa volúmica menor ou igual a 2000 kg/m^3 ;
- agregados pesados com massa volúmica maior ou igual a 3000 kg/m^3 .

A norma NP EN 12620 (2004) tem o intuito de particularizar as propriedades (geométricas, físicas e químicas) dos agregados normais e pesados adquiridos através do processamento de materiais (naturais, artificiais ou reciclados) para utilização no fabrico do betão. Os agregados leves devem estar conformes a NP EN 13055-1.

Coutinho (1988a), denomina o agregado como um material inerte disperso por toda a pasta de cimento. No entanto, Mehta e Monteiro (2006) e Neville (2011) consideram que o agregado não é realmente inerte, dado que as suas propriedades físicas, térmicas e por vezes também químicas influenciam a qualidade do betão, podendo igualmente limitar a sua resistência como também a durabilidade e o desempenho estrutural. Deste modo, afirma-se que os agregados possuem um papel preponderante no comportamento do betão fresco ou endurecido. Assim, exigem-se que estes contenham diversas características de natureza geométrica, física e química para que não ocorram efeitos impróprios no comportamento do betão que se sintetizam em (Coutinho, 1988a):

- forma adequada e dimensões proporcionais (granulometria), segundo determinados limites;

- resistência à rotura adequada conforme a sua utilização no betão;
- propriedades térmicas apropriadas;
- propriedades químicas de acordo com as ações exteriores e com a sua aplicação no betão;
- inexistência de componentes prejudiciais.

Estas características são provenientes da composição mineralógica e condições de exposição da rocha que originou o agregado, assim como, do tipo de equipamento utilizado para produzi-lo (Mehta e Monteiro, 2006).

Para proceder à determinação destas propriedades e da qualidade do agregado, de modo a prever o seu comportamento no betão, é necessário a realização de ensaios, tais como: análise granulométrica, índice de forma, índice de achatamento, entre outros. Sendo que a melhor informação que se pode obter sobre a qualidade de um agregado é a observação do comportamento do betão confeccionado com esse agregado, e não unicamente a partir de ensaios isolados (Coutinho, 1988a).

Todos os agregados devem ser definidos em termos das suas dimensões, usando as denominações em termos das aberturas do peneiro inferior (d , mínima dimensão do agregado) e do superior (D , máxima dimensão do agregado), expressas como d/D (NP EN 12620, 2004). A máxima dimensão do agregado (D) é definida pela menor abertura do peneiro de uma série de peneiros de referência selecionada através da qual passa uma quantidade de agregado igual ou superior a 90%, ou seja, apenas pode incluir até um máximo de 10% de partículas com dimensão superior a D . Os agregados consideram-se finos (areia rolada ou areia britada), quando têm partículas de menores dimensões, em que D é menor ou igual a 4 mm, ou grossos (britas ou godos), quando têm partículas de maiores dimensões, em que D é maior ou igual a 4 mm, e d maior ou igual a 2 mm (NP EN 12620, 2004).

É importante salientar que, as propriedades do betão fresco e endurecido tais como: trabalhabilidade, compacidade, e todas as propriedades que dependem da quantidade de água presente na amassadura, são muito influenciadas pela forma das partículas agregadas (Coutinho, 1988a). Por isso, é essencial classificar os agregados relativamente à sua forma. Assim, estes podem ser classificados através da definição das suas características geométricas como sendo cúbicos, achatados ou lamelares (espessura pequena em relação a outras dimensões) e alongados (comprimento grande em relação a outras dimensões). De um modo geral, considera-se que, em termos de forma, preferem-se partículas agregadas cúbicas arredondadas para o fabrico do betão, dado que estas conduzem a uma maior trabalhabilidade e melhor arranjo das partículas (Coutinho, 1988a). Por outro lado, as partículas mais indesejáveis são as simultaneamente achatadas, alongadas e rugosas, porque requerem uma maior quantidade de areia para preencher a grande quantidade de vazios existentes e conseqüentemente aumenta a necessidade da quantidade de água na mistura para proporcionar um betão trabalhável (Kosmatka et al., 2003; Qureshi et al., 2015). Para além disso, de acordo com Coutinho (1988a), as partículas achatadas tendem a orientar-se segundo um plano preferencial (horizontal), e debaixo delas ocorre a

exsudação ou a segregação de água do betão fresco após a sua colocação, provocando a formação de uma película de água que impede aderência da pasta de cimento.

De referir ainda que, Kosmatka et al. (2003), Mehta e Monteiro (2006) e Neville (2011), salientam que a presença de partículas alongadas e achatadas devem ser limitadas a um máximo de 15% em massa do agregado total. No entanto, Coutinho (1988a) refere que a melhor maneira de definir os agregados para o betão consiste em impor uma percentagem inferior a 50% de partículas achatadas e alongadas.

Dada a importância da resistência do betão, diversos autores relatam a influência dos agregados nesta propriedade. Assim, Coutinho (1988a) evidencia que normalmente a resistência do betão só depende da resistência da pasta de cimento, pois geralmente a tensão de rotura dos agregados é superior a 60 ou 70 MPa, ou seja, normalmente estes apresentam uma resistência superior à do betão. Apenas no caso de serem utilizados agregados com tensões de rotura inferiores a cerca de duas vezes a da pasta de cimento, a resistência do betão depende da resistência do agregado

Para além disso, Meddah et al. (2010) e Walker e Bloem (1960), verificaram através de ensaios realizados em diversos betões que a resistência do betão é influenciada pelo tamanho do agregado grosso presente na mistura do betão. Walker e Bloem (1960) concluíram que, para uma dada razão de água, a resistência do betão torna-se menor à medida que o tamanho máximo do agregado grosso aumenta, sendo esta redução mais pronunciada em betões com quantidades de cimento superiores. Para além disso, estes consideram provável que a relação entre a resistência do betão e o tamanho máximo do agregado dependa das características do agregado. Por outro lado, Meddah et al. (2010) relatam que a resistência à compressão do betão aumenta quando se aumenta o tamanho máximo do agregado grosso.

Em suma, todos os resultados demonstraram que a influência da utilização de diferentes tipos de agregados nas propriedades do betão é indiscutível.

Um aspeto igualmente importante, é a escolha da água a ser utilizada na mistura do betão, pois esta desempenha funções importantes no betão fresco e na fase de endurecimento do betão. A água de amassadura é a porção presente durante a amassadura do betão que foi introduzida na betoneira, compreendendo a que resulta da humidade própria no interior e na superfície dos agregados (Cunha, 2011), nos adjuvantes e nas adições usadas (NP EN 206-1, 2007). As funções da água no betão passam por reagir quimicamente com o cimento, hidratando-o, de modo a ganhar presa e endurecer (confere a resistência necessária ao betão), aglomerar os agregados e garantir a trabalhabilidade do betão adequada, ou seja, certificar que a mistura é amassada facilmente e colocada em obra sem que ocorra segregação (Pereira, 2014).

Para fabricar um betão, a água de amassadura deve estar conforme as exigências normativas. Deste modo a NP EN 206-1 (2007) indica que a água utilizada na amassadura de betão deve estar conforme a NP EN 1008 (2003).

A NP EN 1008 (2003) especifica os requisitos para que a água seja apta para o fabrico do betão, e descreve os métodos para avaliação dessa aptidão.

A qualidade da água é importante porque a água de má qualidade pode afetar negativamente o tempo de presa, o desenvolvimento da resistência ou causar manchas no betão. Quase todas as águas naturais, águas doces, e águas tratadas para o uso municipal são satisfatórias para a água de mistura do betão se não tiverem odor ou gosto pronunciado (Pierce, 2006). As águas subterrâneas e águas residuais industriais podem também ser utilizadas no fabrico do betão, mas devem ser ensaiadas (NP EN 1008, 2003).

Pierce (2006), defende um critério popular quanto à adequação da água para a mistura do betão, que é a expressão clássica “se a água está apta para beber, então está bem para produzir betão”. Por outro lado, Neville e Brooks (2010) evidenciam que por vezes a água que não é adequada para beber, pode muitas vezes ser satisfatoriamente utilizada no fabrico do betão, no entanto, a água potável pode não ser necessariamente adequada para o fabrico do betão, pois pode conter níveis de sódio e potássio elevados existindo risco de reação com os agregados.

A água para usar na mistura do betão deve estar limpa e livre de materiais prejudiciais. As águas que se encontram na natureza raramente têm um pH que influencie na amassadura do betão. No entanto, se as águas contiverem um pH inferior a 4 deve evitar-se o seu uso. Para além disso, deve-se evitar também águas que contenham presença de óleos e gorduras, resíduos em suspensão, apresentem turvação, detergentes, e matéria orgânica (por exemplo as algas podem provocar uma diminuição da tensão de rotura) (Coutinho, 1988a; Pereira, 2014).

No entanto, Coutinho (1988a) refere que a água proveniente do mar pode ser utilizada no fabrico do betão, sem qualquer tipo de precaução no betão simples. Contudo, em estruturas de betão armado, expostas ao ar livre, não é recomendado o uso dessa água, devido a possíveis problemas de corrosão. Para além disso, quando a aparência do betão for um requisito relevante, o seu uso também não é recomendado, dado que esta água contém uma grande quantidade de cloretos podendo causar eflorescências na superfície do betão (Neville e Brooks. 2010). Desta forma, a norma NP EN 1008 (2003) considera que a água do mar pode ser utilizada no fabrico de betão simples, mas salienta que em geral esta água não é apta para o fabrico de betão armado ou pré-esforçado.

De referir ainda que, se a água utilizada na produção de um betão, não for obtida a partir de uma fonte que esteja provada ser satisfatória, ou uma fonte que possa suscitar dúvidas, deve-se realizar uma série de ensaios comparativos. Como por exemplo, comparar os valores obtidos de resistência e tempo de presa de um betão, produzido com uma água que é questionável, com os valores desses mesmos parâmetros, de um betão fabricado com uma água conhecida como adequada (Pierce, 2006).

De notar que, para além dos componentes anteriormente referidos, por vezes é necessário considerar a utilização de adições na composição do betão, permitindo deste modo melhorar o seu desempenho, conforme prevê a norma NP EN 206-1 (2007). De acordo com esta norma, adições

são materiais finamente divididos empregues no betão com a finalidade de melhorar certas propriedades, ou adquirir propriedades especiais. As adições são incorporadas no betão em quantidades superiores a 5% do peso do cimento (Sika, 2017). No entanto, a quantidade de adição a incorporar no betão irá depender das propriedades pretendidas para o betão, e o fim a que se destina (Antunes, 2013). A norma NP EN 206-1 (2007) contempla dois tipos de adições inorgânicas:

- tipo I (adições quase inertes, p.e. fíleres e pigmentos);
- tipo II (adições pozolânicas ou hidráulicas latentes, p.e. sílica de fumo, pozolanas naturais e cinzas volantes).

As adições do tipo I são, tipicamente consideradas como fíleres, em referência à sua aptidão de preencher os poros nos materiais à base de cimento endurecidos, completando a curva granulométrica dos agregados finos (Conceição, 2011).

As adições do tipo II, são materiais inorgânicos que apesar de não terem propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que reagem na presença de água com o hidróxido de cálcio e com o cimento, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades pozolânicas (Pereira, 2014). A sílica ativa e o metacaulino são exemplos de adições que adicionadas ao cimento provocam uma diminuição da permeabilidade e da porosidade, aumentam a resistência a sulfatos e reduzem o calor de hidratação (Pereira, 2014)

O betão pode ser utilizado apenas com o cimento como ligante hidráulico. No entanto, através da substituição parcial do cimento por adições, é possível obter soluções mais económicas e ambientais (Torgal e Jalali, 2011). Segundo a NP EN 197-1 (2001), as adições que podem ser usadas como constituintes de um cimento são: sílica de fumo, escórias de alto forno, pozolana natural, pozolana natural calcinada, cinza volante (siliciosa, calcária), xisto cozido e calcário.

Por fim, estas adições podem conferir melhores características aos betões, quer no estado fresco (trabalhabilidade, tempos de presa, entre outros), quer no estado endurecido (resistência e durabilidade) (Gomes, Pinto e Pinto, 2013). Neste sentido, e de forma abreviada as adições podem conferir um efeito benéfico a algumas propriedades do betão (Antunes, 2013):

- maior resistência mecânica;
- maior resistência à segregação do betão;
- maior densidade;
- melhor trabalhabilidade.

Dada a importância das adições no fabrico do betão, procede-se sempre que necessário à realização de ensaios experimentais de modo a verificar a sua compatibilidade com os outros componentes do betão.

Em complemento aos principais componentes do betão, e para além das adições, os adjuvantes são frequentemente usados para melhorar a performance do betão. Segundo a Norma NP EN 934-2 (2008), o adjuvante é um produto que é incorporado durante o processo de

amassadura do betão, com uma dosagem inferior ou igual a 5% em massa da dosagem de cimento do betão, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido. A Norma NP EN 206-1 (2007) enuncia que a quantidade total de adjuvantes a serem utilizados não deve exceder a dosagem máxima recomendada pelo produtor, nem ultrapassar as 50 g de adjuvantes por kg de cimento, e o uso dos adjuvantes inferior a 2 g por kg de cimento só é permitido se estes forem dispersos numa parte da água de amassadura. Os adjuvantes são utilizados por exemplo para (ACI education bulletin E4-12, 2013):

- aumentar a trabalhabilidade sem aumentar a quantidade de água, ou reduzindo a água necessária, mas obtendo uma boa trabalhabilidade;
- diminuir a permeabilidade à água;
- aumentar a resistência;
- retardar ou acelerar a presa;
- melhorar a resistência à ação do gelo-degelo;
- aumentar a durabilidade;
- produção de betão colorido;
- inibir a corrosão das armaduras;

Os adjuvantes são normalmente adicionados ao betão, em dosagens específicas para o produto em uso dependendo de vários fatores, como por exemplo: o efeito desejado, a sua interação química com os outros materiais na mistura e as condições ambientais (Taylor, 2014). Os adjuvantes interagem com o sistema de hidratação do cimento, por ações físicas e químicas, modificando uma ou mais propriedades do betão no estado fresco ou endurecido (ACI education bulletin E4-12, 2013). De acordo com o ACI 212.3R-10 (2010), um adjuvante ou uma combinação de adjuvantes (desde que a compatibilidade da combinação seja verificada em ensaios iniciais) (NP EN 206-1, 2007) pode ser necessária para alcançar o resultado desejado no betão, em alguns casos o efeito pretendido no desempenho pode ser obtido através da alteração da mistura de betão, para além da utilização de um adjuvante adequado. No entanto, os adjuvantes não são substitutos de uma mistura com proporções adequadas e práticas de construção aceitáveis.

Apesar de existir uma grande variedade de produtos, tornando difícil a classificação dos adjuvantes, de acordo com a sua função, estes podem ser classificados em redutores de água de amassadura (plastificantes e superplastificantes), aceleradores e retardadores de presa, introdutórios de ar, redutores de permeabilidade (hidrófugos), inibidores de corrosão de armaduras, aceleradores de endurecimento, pigmentos e fungicidas (Coutinho, 1988a; Cunha, 2011).

Embora todos os adjuvantes sejam importantes para atingir determinado desempenho no betão, destacam-se aqui aqueles que são destinados a melhorar a trabalhabilidade. Estes adjuvantes são designados por redutores de água (plastificantes ou superplastificantes), pois têm como função diminuir a quantidade de água introduzida na amassadura sem afetar a trabalhabilidade.

Os plastificantes permitem reduzir a água da amassadura em 5 a 12% (dependendo da mistura, dosagem, e outros materiais e proporções (ACI education bulletin E4-12, 2013), mantendo a trabalhabilidade do betão pretendida, ou aumentando a trabalhabilidade sem alterar as dosagens de água e cimento (Coutinho, 1988a). Os plastificantes atuam na redução das forças interpartículas que existem entre os grãos de cimento no estado fresco, aumentando assim a fluidez da pasta (Nilson, Darwin e Dolan, 2010). Estes são usados principalmente quando o betão tem pouco cimento ou poucos agregados finos, quando é bombado e quando a colocação do betão é difícil. (Coutinho, 1988a; ACI education bulletin E4-12, 2013).

Os superplastificantes desempenham uma função semelhante aos plastificantes, mas são muito mais eficientes pois permitem reduzir a água da amassadura na ordem dos 30% ou mais (ACI education bulletin E4-12, 2013). Estes são utilizados para produzir betão de alta resistência com relação de a/c muito baixa, enquanto mantêm a trabalhabilidade necessária para a colocação e compactação adequada do betão (Nilson et al., 2010). Quando são utilizados com a finalidade de produzir um betão fluído, estes adjuvantes facilitam a colocação e o endurecimento do betão (ACI education bulletin E4-12, 2013).

Desta forma, pode-se afirmar que o surgimento dos superplastificantes revolucionou de certa forma a utilização do betão, tornando possível colocá-lo e compactá-lo onde previamente não era viável, e permitindo o fabrico de betões de alta resistência e alto desempenho (Costa e Appleton, 2002).

Por fim, a possibilidade de serem introduzidos adjuvantes na composição do betão, aumenta a variedade de opções na criação da composição do betão disponíveis aos vários intervenientes (produtor, especificador e utilizador) de modo a que verifique a conformidade do betão, e respeite as normas e especificações em vigor.

2.7. Características do betão

O betão, tal como referido anteriormente, define-se como um material originário da mistura de um ligante com agregados, água e, eventualmente, adições e adjuvantes. Deste modo, o conhecimento na avaliação das suas propriedades, limitações e fatores condicionantes é essencial para um engenheiro, sendo que este conhecimento permite a escolha do tipo de betão adequado para aplicação em obra, de acordo com a solução estrutural pretendida.

Para além do conhecimento das propriedades, é necessário garantir que o betão possua as características e requisitos estabelecidos no dimensionamento estrutural, para isso é necessário seguir diversas regras de conformidade estabelecidas na norma NP EN 206-1 (2007) para verificar a conformidade do betão de acordo com a sua especificação.

Assim, a escolha da composição do betão tem em conta diversas variáveis que claramente influenciam no comportamento e aplicação deste material, tais como a seleção e proporção dos materiais constituintes, resistência mecânica, retração, trabalhabilidade, exigências relativas ao tipo de obra, técnicas de transporte, queda e a sua compactação.

Esta secção tem como finalidade destacar as principais características e propriedades do betão, tais como: resistência à compressão, resistência à tração, trabalhabilidade, módulo de elasticidade e retração.

2.7.1. Resistência à compressão

De todas as características mecânicas concedidas ao betão endurecido, a resistência à compressão é a principal, pois nas estruturas a função deste material é fundamentalmente resistir às tensões de compressão enquanto nas estruturas de betão armado a função das armaduras é essencialmente resistir às tensões de tração. Para além disso, muitas propriedades do betão que são determinadas por ensaios mais complicados, tal como o módulo de elasticidade e a resistência à tração, podem ser relacionadas com a resistência à compressão (Mehta e Monteiro, 2006; Ozyildirim e Carino, 2006). No entanto, se alguma propriedade é de interesse primordial, então, ensaios relativos a essa propriedade devem ser realizados, pois correlações entre a resistência e essa mesma propriedade podem levar a resultados pouco fiáveis.

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a resistência de um material está relacionada com a capacidade deste suportar a aplicação de cargas sem ocorrência de deformação ou rotura. Deste modo, a resistência à compressão do betão é definida como a tensão máxima à compressão que a amostra de betão pode suportar.

Hsu, Sturman e Winter (1963) e Neville e Brooks (2010) destacam que, apesar do betão ainda não ter sido sujeito a qualquer tipo de carga, existem fissuras pequenas (microfissuras) que ocorrem geralmente na interface dos agregados grossos e da pasta de cimento (fissuras de ligação). Estas são originadas por diversos fatores como hidratação da pasta de cimento, diferenças das propriedades mecânicas destes dois elementos, e ocorrência de retração ou de deformações térmicas (Hsu et al., 1963). Ozyildirim e Carino (2006) e Hsu et al. (1963) mencionam que as pequenas fissuras de ligação se desenvolvem aumentando em comprimento, largura e número, consequência do aumento da tensão aplicada no betão. A curva apresentada no gráfico tensão-extensão está relacionada com a formação e crescimento das fissuras no betão. Este modo de fissuração e a sua relação com a curva tensão-extensão está ilustrado na Figura 10. À medida que a carga externa é aplicada até 30% da carga final, as pequenas fissuras existentes mantêm-se sem alterações, correspondendo à parte aproximadamente linear da curva tensão-extensão. Após essa carga ser atingida, as fissuras existentes começam a aumentar em comprimento, largura e quantidade, e a curva tensão-extensão começa a desviar-se do comportamento linear. Quando é atingida cerca de 70 a 90% da resistência final, as fissuras penetram na estrutura da pasta de cimento, e, à medida que a carga aplicada aumenta, estas tornam-se visíveis, levando a padrões de fissuras maiores e contínuos, paralelas à direção de carregamento, até que o betão não suporte mais carga adicional (Hsu et al., 1963). A cerca de 70% da resistência final, a curva tensão-extensão começa a aproximar-se bruscamente da horizontal, desviando-se da linearidade a um ritmo mais rápido, indicando o início da degradação da estrutura interna do betão. Por fim, a extensão da fissuração é tão grande que o betão não suporta uma carga mais elevada, e

subsequentemente a tensão requerida para a extensão adicional diminui (Ozyildirim e Carino, 2006).

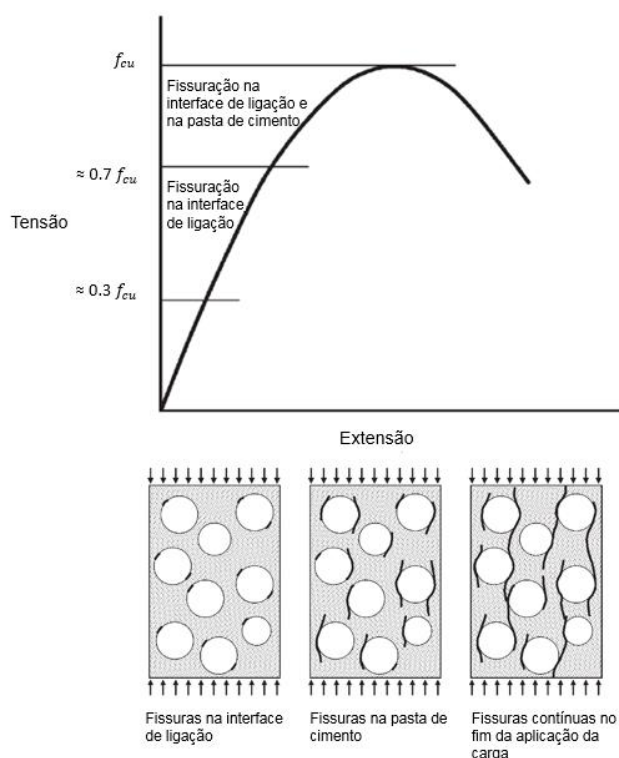


Figura 10 - Curva tensão-extensão do betão em compressão e estados de fissuração (adaptado de Ozyildirim e Carino, 2006)

Com base no processo de fissuração acima referido, é evidente que a resistência do betão está relacionada com a resistência da pasta de cimento (Ozyildirim e Carino, 2006). De notar que são vários os fatores que afetam essa resistência, tal como a relação entre a pasta de cimento e agregados, a qualidade dos agregados (classificação, forma, textura, resistência e tamanho), idade do betão, temperatura e porosidade (Neville e Brooks, 2010). Na maioria dos betões, a resistência dos agregados é maior do que a resistência do betão, e, tal como referido anteriormente, a resistência dos agregados não são o fator limitante que regula a resistência à compressão (Adbullahi, 2012).

Relativamente ao fator que tem maior importância na resistência à compressão do betão, Neville e Brooks (2010) consideram que esse fator é a porosidade, embora seja uma propriedade de difícil determinação. Uma vez que esta propriedade depende essencialmente da relação água/cimento (a/c), Kosmatka et al. (2003) referem a influência das proporções a/c na resistência do betão, e, de acordo com estes, à medida que as proporções água-cimento (a/c) diminuem, a porosidade diminui e a resistência à compressão aumenta.

A Figura 11 mostra as resistências à compressão para uma ampla gama de misturas de betão e proporções de água-cimento a uma idade de 28 dias. De referir ainda, que todos estes fatores

enunciados também afetam a resistências à flexão e à tração e a ligação do betão ao aço (Kosmatka et al., 2003).

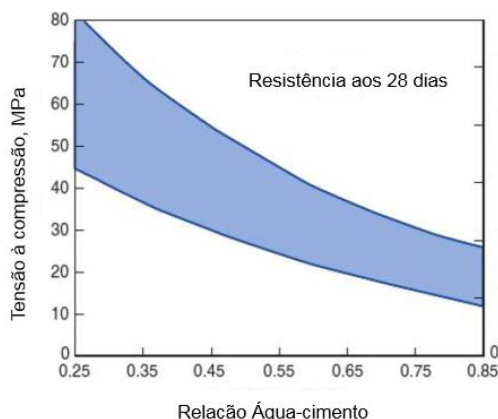


Figura 11 - Variedade de relações da resistência do betão com a relação água-cimento (adaptado de Kosmatka et al., 2003).

A fim de avaliar a resistência à compressão de um determinado tipo de betão, habitualmente submetem-se um número elevado de amostras de betão, colhidas no decurso da betonagem, a ensaios de compressão. Na resistência à compressão podem ser utilizados dois tipos de provetes, com dimensões conformes com a NP EN 206-1 (2007) e a NP EN 12390-1 (2012), que podem ser cúbicos, de 150 mm de aresta, ou cilíndricos, de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Estes são fabricados e curados de acordo com a NP EN 12390-2 (2009). Na Europa, os provetes mais utilizados para determinação da resistência à compressão são os cubos, enquanto que na América do Norte usualmente são usados os cilindros (Li, 2011). A cura usualmente é realizada num tanque de cura com os provetes imersos em água à temperatura de (20 ± 2) °C (NP EN 12390-2, 2009). A resistência à compressão é determinada em provetes ensaiados aos 28 dias, a não ser que seja necessário especificar outras idades (NP 206-1, 2007). No entanto, a resistência determinada por este procedimento apenas representa uma aproximação da resistência real do betão *in situ*, pois um grande número de provetes utilizados não reflete as condições existentes na própria estrutura (não homogeneidade do betão, diferentes condições de cura, segregação do betão, grau de compactação) e variação de resistência de elemento para elemento. Por outro lado, se a avaliação da resistência for realizada através de ensaio de amostras (carotes) da própria estrutura, obtém-se uma aproximação à situação real da estrutura. No entanto, apesar dos resultados destes provetes (carotes) proporcionarem uma melhor avaliação da qualidade do betão e da resistência de cada elemento da própria estrutura, a dificuldade na obtenção de carotes, os danos causados à estrutura e o tempo de execução são vulgarmente grandes inconvenientes (Carminho, 2012).

Para proceder à realização do ensaio de resistência à compressão, os provetes são retirados do tanque de cura, no dia da execução deste, e o excesso de humidade presente na superfície do provete é removido. No instante imediatamente a seguir, os provetes são devidamente posicionados e centrados na superfície da máquina de ensaio, de forma que a carga seja aplicada perpendicularmente à direção de moldagem.

A carga deve ser aplicada gradualmente e de forma contínua, a uma velocidade selecionada de (0.6 ± 0.2) MPa/s, aumentando-a até que não seja possível aplicar uma carga superior. Por fim, o provete atinge a rotura, e regista-se a carga máxima indicada na máquina (em kN).

Posteriormente, é verificada a rotura de cada provete, conforme indicado na NP EN 12390-3 (2011), de forma a confirmar se esta é ou não satisfatória. Se a rotura do provete for não satisfatória, tal deve ser registado e deve-se fazer referencia sobre a sua forma de rotura.

A resistência à compressão é determinada através da expressão dada pela NP EN 12390-3 (2011):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.1)$$

onde,

f_c é a resistência à compressão do betão (MPa);

F é a carga máxima à rotura (N);

A_c é a área da secção transversal do provete na qual a carga foi aplicada (mm^2);

Controlo de conformidade da resistência à compressão

Dada a importância dos resultados dos ensaios de avaliação da resistência à compressão é necessário um controlo desses resultados de forma a garantir a conformidade normativa (NP EN 206-1, 2007)

O controlo de conformidade abrange o conjunto de ações e de decisões a executar de acordo com as regras de conformidade previamente adotadas para certificar a conformidade do betão de acordo com as especificações (NP EN 206-1, 2007).

A avaliação de conformidade deve-se fundamentar nos resultados dos ensaios obtidos durante um período de avaliação que não deve ultrapassar os últimos 12 meses (NP EN 206-1, 2007). Esta avaliação é avaliada em provetes ensaiados aos 28 dias (pode ser avaliada em provetes ensaiados a uma idade diferente, se especificado) e é realizada recorrendo a vários critérios de conformidade que variam consoante o tipo de produção (produção inicial ou produção contínua), número de resultados obtidos e resistência característica do betão.

A produção inicial cobre o período da produção até que estejam disponíveis os primeiros 35 resultados de ensaios, enquanto produção contínua é atingida quando são alcançados, pelo menos, 35 resultados de ensaios num período que não supere os 12 meses (NP EN 206-1, 2007).

A conformidade é confirmada se os resultados dos ensaios satisfizerem os seguintes critérios, consoante o tipo de produção (NP EN 206-1, 2007; Cunha, 2011):

Produção inicial:

Nesta situação, o número de resultados de ensaios da resistência à compressão no grupo são 3.

Critério 1:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 4 \quad (2.2)$$

Critério 2:

$$f_{ci} \geq f_{ck} - 4 \quad (2.3)$$

Produção Contínua:

Nesta situação, o número de resultados de ensaios da resistência à compressão no grupo é superior ou igual a 15.

Critério 1:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1.48 \sigma \quad (2.4)$$

Critério 2:

$$f_{ci} \geq f_{ck} - 4 \quad (2.5)$$

onde,

f_{cm} é a média dos “n” resultados da resistência à compressão do betão (N/mm²);

f_{ck} é a resistência característica especificada à compressão do betão (MPa);

f_{ci} é a resistência individual do ensaio de resistência à compressão do betão (N/mm²);

σ é o desvio padrão das resistências da amostra de “n” provetes;

O desvio-padrão (σ) é um fator que diminui as incertezas que resultam da produção do betão, Este é calculado com base na seguinte fórmula (Carminho, 2012):

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} \quad (2.6)$$

É de salientar que no caso duma nova composição de betão devem ser executados ensaios iniciais para verificar se o betão fresco ou endurecido satisfaz todas as características especificadas ou o desempenho pretendido com uma margem adequada. Sendo assim a NP EN 206-1 (2007) recomenda que a resistência à compressão do betão com a composição a utilizar no caso real deve exceder o valor de f_{ck} numa margem de, pelo menos, 6 MPa a 12 MPa.

Para os ensaios iniciais devem ser realizadas pelo menos três amassaduras e ensaiados pelo menos três provetes de cada uma delas. A resistência de cada amassadura deve ser a média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos respetivos provetes (f_{cm}) (NP EN 206-1, 2007).

2.7.2. Resistência à tração

A resistência à tração no betão é pequena, mas não é desprezável (McNelly e Lash, 1963). Como já tem sido referido, são várias as propriedades mecânicas do betão que estão relacionadas com a sua resistência à compressão, no entanto não há proporcionalidade direta entre a resistência à tração e a resistência à compressão (Li, 2011; McCormac e Brown, 2014). À medida que a resistência à compressão do betão aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a um ritmo menor, ou seja, quanto maior for a resistência à compressão menor será a razão entre estas duas resistências (Li, 2011). A resistência à tração varia geralmente entre 8% a 15% da resistência à compressão do betão (McCormac e Brown, 2014). Salienta-se que são vários os fatores que afetam a resistência à tração do betão, e conseqüentemente a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão. Esta pode ser influenciada, por exemplo, pelas condições de cura, idade do betão e ainda pelas características da mistura do betão tal como a relação água/cimento, tipo de agregado e adjuvantes (Li, 2011; Weerheijm, 2013). Por exemplo, após cerca de um mês de cura do betão, a resistência à tração é conhecida por aumentar mais lentamente do que a resistência à compressão, ou seja, a razão entre estas duas resistências diminui com a idade do betão. Para além disso, a uma determinada idade do betão a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão também diminui com a diminuição da relação água/cimento (Li, 2011).

A principal razão para que o betão tenha fraco comportamento à tração, conforme anteriormente dito, é a existência de microfissuras no betão antes das cargas exteriores serem aplicadas (Ozyildirim e Carino, 2006; McCormac e Brown, 2014). No entanto, a existência destas microfissuras tem pouco efeito quando o betão é sujeito a cargas de compressão, porque as cargas fazem com que as fissuras pequenas se fechem e permitam a transferência de compressão, não sendo obviamente o caso da resistência à tração (McCormac e Brown, 2014). Sendo assim, importa salientar que a resistência à tração do betão é uma propriedade importante, pois influencia o tamanho e a extensão das fissuras, e, para além disso, a fissuração só ocorre depois desta resistência ser excedida. Por exemplo, as deformações térmicas e a retração causam tensões próprias que podem levar a fissuras quando a resistência à tração é atingida (McNeely e Lash, 1963; Weerheijm, 2013). Essa resistência é essencial não só para manter a continuidade da estrutura, mas também para impedir a corrosão das armaduras, influenciando igualmente a durabilidade da estrutura (Coutinho e Gonçalves, 1994).

A resistência à tração, em geral, pode ser estimada através de três tipos de ensaios: ensaio de tração direta, ensaio de flexão e ensaio de compressão diametral. Segundo McNeely e Lash (1963) e Oluokun, Burdette e Deatherage (1991) a maneira mais simples e fiável de medir a resistência à tração é pelo ensaio de compressão diametral, comumente conhecido por ensaio Brasileiro. Acrescenta-se a vantagem deste ensaio ser fácil de executar, permitindo assim testar um grande número de provetes num período relativamente curto (Oluokun et al., 1991). Esta escolha deve-se ao facto do ensaio de tração direta ser de difícil realização devido à dificuldade de garantir que a carga seja verdadeiramente axial (sem excentricidade), resultando numa

subestimação da resistência à tração em alguns materiais, sobretudo os frágeis. Da mesma forma, o ensaio de flexão não é recomendado, pois não é representativo da verdadeira resistência à tração axial (McNeely e Lash, 1963).

Segundo a Norma NP EN 206-1 (2007), o ensaio de resistência à tração por compressão diametral é realizado de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011), e a não ser que seja especificado de forma diferente, a resistência à tração por compressão diametral é determinada em provetes ensaiados aos 28 dias. Normalmente, o ensaio é executado em provetes cilíndricos com dimensões de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura conformes a norma NP EN 12390-1 (2012). O provete cilíndrico é colocado na máquina de ensaio e submetido a uma força de compressão aplicada ao longo do seu comprimento em duas zonas diametralmente opostas (Oluokun et al., 1991). A carga é distribuída numa largura com cerca de um duodécimo do diâmetro do cilindro por intermédio de faixas de carregamento de cartão prensado, o esquema do ensaio está representado na Figura 12 (NP EN 12390-6, 2011). As faixas servem para evitar múltiplas fissuras e deformações nos pontos de carga (Rocco et al., 1999).

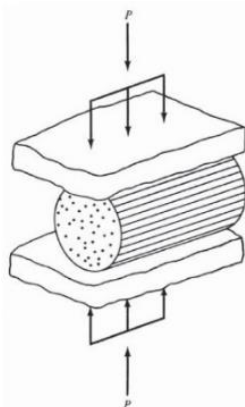


Figura 12 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (McCormac e Brown, 2014)

As tensões de tração resultantes do ensaio por compressão diametral provocam a rutura do provete no plano de carga (NP EN 12390-6, 2011). O modo de rutura esperado é a divisão da amostra em duas, através do plano de carregamento (Rocco et al., 1999). A resistência característica à tração por compressão diametral deve ser maior ou igual ao valor especificado para essa resistência (NP EN 206-1, 2007), determinada através da expressão dada pela NP EN 12390-6 (2011):

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (2.7)$$

onde,

f_{ct} é a resistência à tração por compressão do betão (MPa);

F é a carga máxima (N);

L é o comprimento da linha de contacto do provete (mm);

d é a dimensão vertical da secção transversal do provete (mm).

Controlo de conformidade da resistência à tração por compressão diametral

Tal como na resistência à compressão, para garantir a conformidade normativa, quando for especificada a resistência do betão à tração por compressão diametral, é necessário efetuar a avaliação da conformidade que deve ser baseada nos resultados dos ensaios efetuados durante um período de avaliação que não deve exceder os últimos 12 meses (NP EN 206-1, 2007). A conformidade é confirmada se forem verificados todos os critérios de conformidade, em seguida apresentados, tanto para a produção inicial como para a produção contínua:

Produção inicial:

Neste caso, o número de resultados de ensaios da resistência à tração no grupo são 3.

Critério 1:

$$f_{tm} \geq f_{tk} + 0.5 \quad (2.8)$$

Critério 2:

$$f_{ti} \geq f_{tk} - 0.5 \quad (2.9)$$

Produção Contínua:

Nesta situação, o número de resultados de ensaios da resistência à tração no grupo é superior ou igual a 15.

Critério 1:

$$f_{tm} \geq f_{tk} + 1.48 \sigma \quad (2.10)$$

Critério 2:

$$f_{ti} \geq f_{tk} - 0.5 \quad (2.11)$$

onde,

f_{tm} é a média dos “n” resultados da resistência à tração do betão (N/mm²);

f_{tk} é a resistência característica especificada à tração do betão em cubos ou cilindros (MPa);

f_{ti} é a resistência individual do ensaio de resistência à tração do betão (N/mm²);

σ é o desvio padrão das resistências da amostra de “n” provetes;

2.7.3. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma preocupação diária nas construções em betão, sendo esta facilmente avaliada na prática. No entanto, trabalhabilidade tem significados diferentes para pessoas diferentes e diferentes condições de colocação (Daniel 2006).

Deste modo, Mehta e Monteiro (2006), consideram a trabalhabilidade uma característica do betão no estado fresco, que determina a facilidade com que uma mistura de betão pode ser manipulada sem que ocorra segregação prejudicial. No entanto, Coutinho (1988b) e ACI 116R-00 (2000), de maneira mais detalhada descrevem a trabalhabilidade, como sendo a medida da maior ou menor facilidade com que o betão é transportado, colocado, compactado e acabado, e da maior ou menor facilidade de ocorrência de segregação durante estas operações.

De referir ainda que, associado ao conceito de trabalhabilidade, existem outras características do betão no estado fresco, tais como: a consistência e a coesão. Assim, define-se a coesão como uma medida da compatibilidade, ou seja, descreve a capacidade do betão fresco manter todos os seus constituintes ligados uniformemente (Li, 2011). A consistência é definida como a mobilidade relativa ou a capacidade de fluidez do betão recém-misturado (ACI 116R-00, 2000; Li, 2011). Para além disso, a consistência, geralmente indica a humidade na mistura de betão, e frequentemente é utilizada como medida no ensaio de abaixamento (slump test).

Daniel (2006) afirma que o ideal é o betão conter a consistência mais seca possível, para que seja exequível a sua colocação por meio de um equipamento de compactação acessível, contudo Neville (2011) considera que os betões mais húmidos, dentro dos limites, são os mais funcionais. Pesando desta forma, Li (2011) evidencia que quanto mais fácil for o fluxo do betão (betões mais húmidos) menor é o trabalho necessário para a sua compactação. No entanto este autor destaca que um betão tem de ser suficientemente coeso para conter todos os seus constituintes, essencialmente os agregados grossos, numa distribuição uniforme durante o processo de colocação (Li, 2011).

Quantificação da trabalhabilidade

Dada a diversidade de propriedades envolvidas no conceito de trabalhabilidade não se pode esperar que a sua medição se faça por um só método (Coutinho, 1988b). A trabalhabilidade do betão medida a partir da sua consistência pode ser determinada através de diversos ensaios: ensaio vêbê, ensaio de abaixamento, ensaio de compactação e ensaio de espalhamento.

O ensaio de abaixamento (cone de Abrams) é um dos mais antigos e o mais universalmente utilizado e de acordo com a NP EN 12350-2 (2009), é um método para a determinação da consistência do betão fresco.

O procedimento deste ensaio consiste na aplicação de um molde de metal com forma tronco-cónica com as seguintes dimensões: diâmetro de base 200 mm, diâmetro do topo 100 mm, altura 300 mm e 1.5 mm de espessura. O interior do molde deve ser liso e sem qualquer saliência. Este deve conter duas pegas laterais, perto do topo, para colocar as mãos, e abas junto à base, para colocar os pés do executante. O molde tem duas aberturas, sendo que a menor localiza-se na parte superior. Este deve ser humedecido e colocado firmemente, com o auxílio dos pés nas abas do molde, sobre uma superfície plana, não absorvente, húmida e rígida durante toda operação de enchimento do molde no ensaio (NP EN 12350-2, 2009).

A amostra de betão deve ser colocada no molde em três fases. Cada porção de betão fresco é colocada aproximadamente com um terço da altura do molde quando compactado. Cada camada é compactada com 25 pancadas através de um varão com 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento com as extremidades arredondadas. Na primeira camada deve-se inclinar o varão ligeiramente, dando sensivelmente metade das pancadas em espiral, ou seja, partindo do contorno do molde e progredindo até ao centro. As duas últimas camadas são compactadas em toda a sua espessura, mas de forma que o varão penetre apenas no interior da camada imediatamente adjacente. O molde deve estar preenchido de betão fresco e compactado até ao seu limite máximo, sendo essa superfície devidamente rasada através de movimentos de rolamento com o varão de compactação (NP EN 12350-2, 2009).

Imediatamente após o enchimento, sobe-se o molde, lentamente, em dois a cinco segundos, firmemente na vertical. O tempo total de ensaio não deve exceder os 2 minutos e meio.

O valor do abaixamento do betão neste ensaio é medido através da diferença entre a altura do molde e altura do centro da amostra de betão fresco tal como indicado na Figura 13.

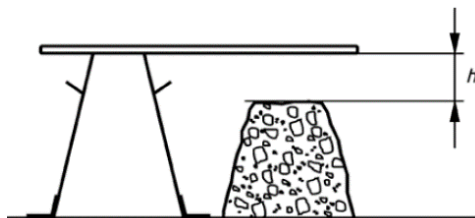


Figura 13 - Avaliação do valor de abaixamento (NP EN 12350-2, 2009)

O abaixamento do betão é considerado verdadeiro se for uniforme em todo o seu redor. Caso contrário, é considerado um abaixamento deformado. Se o abaixamento não for verdadeiro, é necessário repetir o ensaio, e, se for verificada a deformação em dois ensaios consecutivos, isso deve ser visto como uma indicação de falta de coesão e plasticidade apropriadas ao ensaio de abaixamento.

Apesar do ensaio de abaixamento (Slump test) ser o mais aceite por diversos autores, Day (2006) salienta que este é um teste de conveniência, pois é uma medição fraca da trabalhabilidade para as diferentes misturas. Uma das razões para este ensaio ser utilizado é por estar profundamente enraizado na teoria e na prática da tecnologia do betão. No entanto, Day (2006) destaca que o importante não é deixar de usar este tipo de ensaio, mas perceber as suas limitações.

Para além disso, o autor referido menciona que os objetivos da especificação do betão em projeto são evitar diversos fatores como segregação e exsudação, e evitar uma relação a/c excessiva que conduza a uma resistência ou durabilidade inadequadas. Desta forma, não é considerada uma boa estratégia o facto do especificador incluir na definição do betão um valor limite para o ensaio de abaixamento, pois, para qualquer valor de abaixamento obtido, é igualmente possível a ocorrência de qualquer um dos fatores acima mencionados, impedindo desta maneira que o especificador cumpra os objetivos definidos.

De referir ainda, que Mindess, Young e Darwin (2003) afirmam que podem ser obtidos valores de abaixamento iguais em betões com propriedades e consistências muito diferentes. Claramente, esses betões não poderiam ser usados para o mesmo propósito, mesmo que os seus valores de abaixamento sejam os mesmos. Além disso, Mindess et al. (2003) evidencia que o ensaio de abaixamento não consegue diferenciar betões com baixa trabalhabilidade. Sendo assim, apesar da norma NP EN 12350-2 (2009) permitir a medição de abaixamento até 10 mm, o autor recomenda que betões com valores de abaixamento inferiores a 25 mm sejam analisados por outro tipo de ensaio. De notar que Neville e Brooks (2010) recomendam um atraso de 15 minutos na realização do ensaio da trabalhabilidade, pois assim será obtido um resultado mais próximo do estado fresco do betão no momento da sua colocação.

Fatores que podem influenciar a trabalhabilidade

Existem fatores distintos que podem influenciar a obtenção da trabalhabilidade desejada. Estes assentam fundamentalmente na quantidade de água da mistura, proporções dos constituintes na mistura, propriedades dos agregados, tempo, temperatura, características do cimento e adjuvantes (Mindess et al., 2003).

A quantidade de água presente na mistura é um dos fatores mais importantes que condicionam a trabalhabilidade do betão. Aumentar a quantidade de água na mistura aumenta a fluidez do betão fresco e facilita a sua compactação. No entanto, o aumento de água na mistura para além de reduzir a resistência do betão, poderá causar a sua segregação e exsudação. Em geral, qualquer porção de partículas contidas na mistura de betão requer uma certa quantidade de água para a mistura obter uma trabalhabilidade adequada. A água deve preencher a superfície das partículas e os espaços entre estas, e ainda lubrificá-las para ajudar a se deslocarem entre elas facilmente (Mindess et al., 2003). É de notar que a influência do tipo de agregado, a sua classificação, a quantidade de agregados utilizados e a relação entre agregados grossos e finos são fatores que têm de ser considerados.

A influencia dos agregados mais finos é evidente, pois requerem uma maior quantidade de água necessária para que um determinado nível de trabalhabilidade seja atingido, originado pelo facto da sua superfície específica ser elevada (Neville e Brooks, 2010). Para além disso, os agregados arredondados, tal como referido anteriormente, são aconselhados, pois resultam num menor ângulo de atrito interno no betão fabricado, o que conduz a uma maior trabalhabilidade do betão. Pelo contrário, os agregados angulares, por conterem uma forma irregular e uma textura mais rugosa, resultam num maior esforço para superar o atrito interno no betão, requerendo mais água do que os agregados arredondados (Coutinho, 1988a).

A porosidade do agregado também pode afetar a trabalhabilidade. Se o agregado absorver uma grande quantidade de água, menos água estará disponível para providenciar trabalhabilidade (Neville e Brooks, 2010). Assim, poderá ser necessário haver uma distinção entre o teor de água total (que inclui a água absorvida) e o teor de água livre (que está disponível para proporcionar trabalhabilidade e que determina a razão água/cimento) (Mindess et al., 2003). Portanto, o teor em

água da mistura não pode ser estimado isoladamente sem considerar as características dos agregados presentes na mistura de betão.

É necessário considerar igualmente a relação entre agregados grossos e agregados finos presentes numa mistura de betão. Uma quantidade elevada de agregados grossos, em comparação com os agregados finos, conduz a uma mistura com pouca consistência e com acabamento difícil, podendo resultar na ocorrência de segregação e numa menor trabalhabilidade (Neville e Brooks, 2010). Por outro lado, a presença de uma maior quantidade de agregados finos na mistura conduz a um betão ligeiramente mais permeável e menos económico, embora resulte num betão mais trabalhável (Mindess et al., 2003). De referir ainda que, existe uma determinada relação entre agregados grossos e finos que concede uma máxima trabalhabilidade para uma dada razão a/c (Neville, 2011).

De notar que a quantidade de cimento e a relação água/cimento são fatores importantes que condicionam igualmente a trabalhabilidade. Desta forma, para misturas que apresentem um baixo teor de cimento, e relações água/cimento elevadas a perda de trabalhabilidade é menor (Mindess et al., 2003).

Para além disso, é importante deixar claro que ao formular a composição de um betão esta deve ser bem raciocinada, para não ser necessário efetuar uma reformulação após a execução da mistura, adicionando novamente água antes da colocação do betão, para conseguir alcançar a trabalhabilidade pretendida. Um aumento na quantidade de água após a realização da mistura de betão, aumenta a sua relação água/cimento, podendo ser muito prejudicial para a mistura de betão, portanto, é uma prática altamente desaconselhada (Mindess et al., 2003).

De referir ainda, que o tempo também é um fator que influencia a trabalhabilidade. Assim, o betão recém-misturado, durante o período de fluidez da mistura, tem um decréscimo progressivo da trabalhabilidade com o tempo praticamente linear, embora seja maior na primeira hora a uma hora após a realização da mistura (Mindess et al., 2003). Esta perda é causada parcialmente pela hidratação de C_3S e C_3A , que continua lentamente mesmo durante o período de inatividade, e parcialmente pela perda de água por absorção (absorvida pelo agregado) e evaporação (principalmente se a mistura for exposta ao sol ou ao vento) (Mindess et al., 2003).

Por fim, as condições ambientais como a temperatura, afetam igualmente a trabalhabilidade. A temperatura terá influência na taxa de evaporação da água e na hidratação do cimento, desta forma, na presença de temperaturas elevadas, a trabalhabilidade do betão é reduzida, (Neville e Brooks, 2010), tal como é evidenciado na Figura 14.

Esta fundamentação sugere que tenha de ser usada uma maior quantidade de água num clima mais quente para manter a mesma trabalhabilidade (Mindess et al., 2003). No entanto, quando as condições ambientais são incomuns, devem ser realizados ensaios reais no local para determinar os efeitos da temperatura na trabalhabilidade da mistura (Neville e Brooks, 2010).

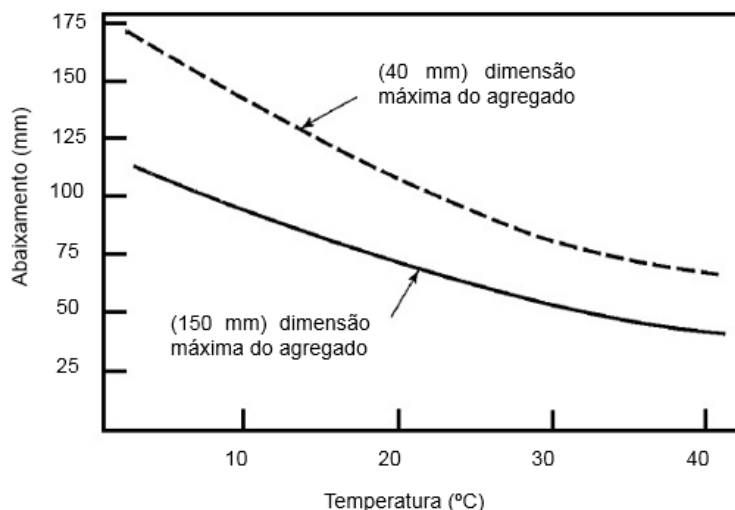


Figura 14 - Relação entre o abaixamento e a temperatura do betão (adaptado de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1988)

2.7.4. Módulo de elasticidade

É necessário considerar uma estimativa do módulo de elasticidade, por ser um dos parâmetros mais utilizados nos cálculos estruturais. Este relaciona a tensão aplicada e a deformação elástica instantânea obtida, e permite ter uma melhor noção das propriedades elásticas do betão, de forma a entender o comportamento da estrutura em relação à deformação ou a outras características desejadas do betão (Benetti, 2012; Carminho, 2012). De referir ainda que, quanto maior o valor do módulo de elasticidade, maior é o esforço a ser realizado para deformar um material (Silva, 2011).

Os materiais submetidos a esforços, podem apresentar vários tipos de comportamento relativamente à deformação: comportamento elástico, plástico ou elasto-plástico (Carminho, 2012). A deformação elástica é aquela que ocorre simultaneamente com a aplicação da carga na estrutura e é recuperável, ou seja, as relações entre a deformação e a força que lhe corresponde são as mesmas na fase de carga e na fase de descarga, enquanto que a deformação plástica não é recuperável e manifesta-se a partir de um determinado nível de tensões (Silva, 2004). A maioria dos materiais passa por um comportamento elástico, antes de atingir a deformação plástica (Carminho, 2012).

Contrariamente aos agregados e à pasta de cimento (Mehta e Monteiro, 2006), o betão não é um material verdadeiramente elástico, e a relação tensão-extensão para uma carga contínua crescente é geralmente representada por uma curva (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1988). A deformação obtida com o carregamento instantâneo não é diretamente proporcional à tensão aplicada nem tão pouco recuperável após a descarga. A causa da não linearidade da relação tensão-extensão pode ser conhecida a partir de estudos da microfissuração progressiva abordada anteriormente (Mehta e Monteiro, 2006).

No entanto, Weiss (2006) destaca frequentemente que para níveis baixos de carga (tensões inferiores a 50% da máxima resistência à compressão do betão) que a relação entre tensão-extensão pode ser descrita usando uma relação linear. O U.S Department of the Interior Bureau of Reclamation (1988) refere identicamente que a curva tensão-extensão se desvia consideravelmente da linearidade a partir dos 40% da máxima resistência à compressão do betão indicando que a tensão e a extensão já não são proporcionais. De notar que, Ozyildirim e Carino (2006) e Hsu et al., (1963) atentam que o desvio de linearidade acontece a partir dos 30% da máxima resistência à compressão do betão (f_{cu}). De referir ainda que, o U.S. Departement of the Interior Bureau of Reclamation (1988) considera que a relação tensão-extensão é bastante uniforme para tensões de compressão até 75% da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias.

Quando um material é sujeito a um carregamento uniaxial de tração ou de compressão (σ), atuando uniformemente na sua secção, este sofre uma deformação (ΔL) (alongamento ou encurtamento) que, por unidade de comprimento, L , se designa por extensão, ε (Carminho, 2012).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.12)$$

Sendo assim, de acordo com a lei de Hooke, lei constitutiva válida para comportamento linear elástico (tensão aplicada proporcional à extensão), o módulo de elasticidade é definido pela inclinação da tangente à curva tensão-deformação num determinado ponto (GangaRao, Taly e Vijay, 2007)

A equação (2.13) define a tensão máxima que um material é capaz de suportar sem qualquer desvio de proporcionalidade da tensão para a extensão (Haranki, 2009).

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.13)$$

onde,

σ é a tensão aplicada (GPa);

E é o módulo de elasticidade (GPa);

ε é extensão do material.

Devido ao facto do diagrama tensão-extensão não ser linear, existem dois tipos de módulos de elasticidade: módulo tangente e módulo secante (Alves, 2015). Segundo Mehta e Monteiro (2006), o módulo tangente (módulo dinâmico) é definido pela inclinação de uma reta tangente a cada ponto da curva tensão-extensão. Já o módulo secante (módulo estático) é definido pela inclinação de uma reta que liga a origem até a um ponto na curva correspondente a uma tensão de 40% da tensão de rotura. Na Figura 15 pode-se observar a representação dos dois módulos de elasticidade no gráfico tensão-extensão.

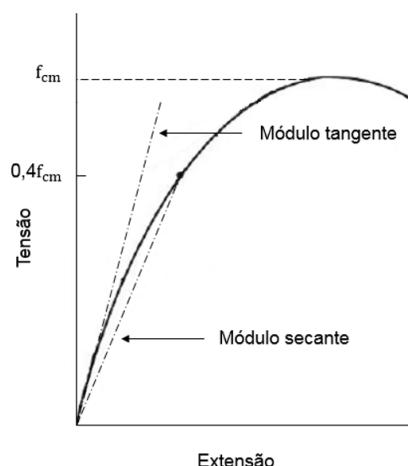


Figura 15 - Curva tensão-extensão e módulo de elasticidade do betão

De notar, que o módulo de elasticidade está relacionado com a resistência à compressão e com a densidade do betão (Mindess et al., 2003). Segundo Neville (2011), não existe dúvida de que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da resistência à compressão, embora não haja concordância sobre a forma precisa da sua relação. Pode-se afirmar com confiança que o aumento do módulo de elasticidade do betão é progressivamente menor do que o aumento da resistência à compressão (Zhou, Lydon e Barr, 1995; Neville e Brooks, 2010; Neville, 2011). Por exemplo, enquanto a resistência num betão de alta resistência aumenta de 50 MPa a 100 MPa, o módulo de elasticidade pode apenas aumentar cerca de 20% usando o mesmo tipo de agregado (Zhou et al., 1995).

A norma NP EN 1992-1-1 (2010), estabelece uma expressão que permite obter os valores do módulo de elasticidade secante do betão (E_{cm}), através do valor médio da tensão de rotura do betão à compressão (f_{cm}), dada pela seguinte expressão:

$$E_{cm} = 22 \times \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \quad (2.14)$$

Pensando desta forma, os fatores que afetam a resistência também influenciam o módulo de elasticidade (Mindess et al., 2009). Assim, o módulo de elasticidade do betão depende em grande parte da composição deste, ou seja, depende de dois constituintes (agregados e pasta de cimento), da ligação entre eles, da proporção volumétrica dos agregados, e ainda pelos vazios e poros existentes no betão (Mehta e Monteiro, 2006). De referir ainda que, tal como a resistência (embora a taxas diferentes), o módulo de elasticidade normalmente aumenta com a idade do betão à medida que este ganha resistência e rigidez (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1960; Gilbert e Ranzi, 2011).

Segundo Mindess et al., (2003) e Mehta e Monteiro (2006), a porosidade é uma das características que mais influencia o módulo de elasticidade do betão, pois esta é inversamente proporcional à densidade. Desta forma, dado que a porosidade do agregado determina a sua rigidez, o que, por sua vez, determina a capacidade do agregado conter a deformação da matriz, sendo assim, um betão que contém uma maior quantidade de agregados densos com um módulo

de elasticidade elevado, terá um módulo de elasticidade maior (Mehta e Monteiro, 2006). Mindess et al. (2003) e Mehta e Monteiro (2006) relacionam o módulo de elasticidade da pasta de cimento com a sua porosidade. Segundo Mindess et al. (2003), à medida que a relação a/c aumenta, aumenta a porosidade, e o módulo de elasticidade diminui acentuadamente. Num estudo realizado por Neto e Helene (n.d.) produziram-se betões com agregados grossos de origem granítica e analisou-se a relação a/c entre outros fatores que influenciam o módulo de elasticidade. Os resultados obtidos estão de acordo com a afirmação apresentada por Mindess et al. (2003). Demonstrou-se que com a diminuição da relação a/c há um aumento do módulo de elasticidade, e inversamente, com o aumento da relação a/c o módulo de elasticidade diminui.

Yang, Yang e Huang (1997) avaliaram a influência da relação a/c sobre o módulo de elasticidade da pasta de cimento. Analisou-se diversos provetes cilíndricos de pasta de cimento com diferentes relações a/c (0.4, 0.45, 0.5 e 0.55) e mediu-se o módulo de elasticidade aos 28 dias. Os resultados foram compatíveis com as afirmações dos outros autores. Concluiu-se que o módulo de elasticidade da pasta de cimento diminui com o aumento da relação a/c . A Figura 16 mostra a influência da relação a/c na pasta de cimento.

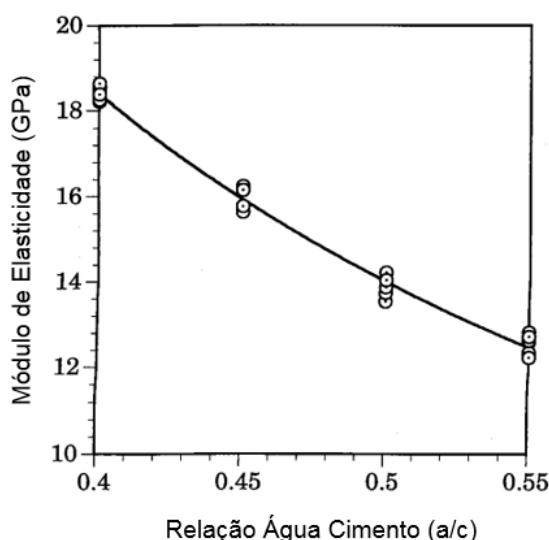


Figura 16 - Relação Água-Cimento vs módulo de elasticidade da pasta de cimento (adaptado de Yang et al., 1997)

Krizova e Hela (2014) realizaram também uma análise a uma série de fatores que influenciam o módulo de elasticidade do betão. Analisaram diversas composições de betão, diferindo no tipo e volume de cimento utilizado e no tipo de agregados utilizados. Estes autores concluíram que quanto maior a relação a/c , maior a porosidade capilar do betão e a zona de transição torna-se mais porosa. Esse fenómeno leva à criação de mais microfissuras, resultando numa diminuição do módulo de elasticidade.

Apesar das propriedades do agregado não influenciarem significativamente a resistência à compressão do betão, estas influenciam o seu módulo de elasticidade. A influência surge a partir do valor do módulo de elasticidade do agregado e das suas proporções volumétricas. A norma NP

EN 1992-1-1 (2010) indica valores aproximados para o módulo de elasticidade secante para diversos tipos de agregados (quartzito, calcário, basalto entre outros).

Como os materiais constituintes do betão, agregados e pasta de cimento, possuem um módulo de elasticidade diferente, o módulo de elasticidade do betão será um valor intermédio entre os módulos de elasticidade dos dois constituintes (Neto e Helene, n.d.). Assim, para um betão que contenha agregados com um maior módulo de elasticidade do que a pasta de cimento (que usualmente é o caso), quanto maior for o volume de agregados, maior é o módulo de elasticidade do betão (Neville e Brooks, 2010).

Na Figura 17 observa-se o comportamento típico da curva tensão-extensão dos materiais constituintes do betão (pasta de cimento e agregados). Verifica-se que tanto a pasta de cimento como os agregados apresentam propriedades elásticas lineares, enquanto o betão não (Mehta e Monteiro, 2006).

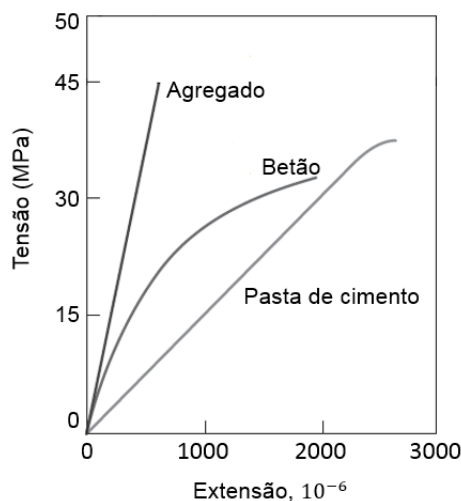


Figura 17 - Comportamento típico da tensão-extensão do betão e dos seus constituintes (adaptado de Neville, 2011)

A especificação que rege o ensaio do módulo de elasticidade do betão é a E 397 (1993). Esta especificação apresenta uma forma de determinar tal propriedade do betão, através do módulo de elasticidade secante.

O módulo de elasticidade para um material sob compressão uniaxial é determinado a partir da relação tensão-extensão de provetes prismáticos de secção quadrada ou cilíndricos, moldados conforme a especificação E 397 (1993), aos quais é aplicada gradualmente carga, observando-se as deformações correspondentes.

Os provetes têm de ter uma relação entre o comprimento e aresta (diâmetro) não inferior a 3, podendo atingir 4 ou 5, e a aresta (diâmetro) deve ser pelo menos igual a 4 vezes a máxima dimensão do inerte, com um mínimo de 100 mm (E 397, 1993).

Para a realização do ensaio do módulo de elasticidade é necessário, como valor de referência, a determinação da tensão de rotura à compressão do betão, f_c , e deve determinar-se esta tensão em pelo menos três provetes com as mesmas dimensões daqueles que serão utilizados no ensaio

para determinação do módulo de elasticidade. A especificação E 397 (1993) evidencia que a tensão de rotura à compressão do betão pode ser também determinada sobre cubos com 15 cm de aresta, fabricados e conservados nas mesmas condições. O ensaio de compressão é realizado segundo a NP EN 12390-3 (2011). O valor de referência que demarca qual a tensão a aplicar no ensaio do módulo de elasticidade é o valor médio da tensão de rotura do betão, f_c .

Para o começo da realização do ensaio do módulo de elasticidade, devem fixar-se os instrumentos de medida ao provete e este deve ser centrado na máquina de ensaio. Aplica-se uma tensão inicial de 0.5 a 1.0 MPa e lê-se a extensão ε_b . Em seguida, aumenta-se a tensão de forma contínua, a uma velocidade de 0.5 ± 0.1 MPa por segundo, até que a tensão ($\sigma_a = \frac{f_c}{3}$) seja atingida. A tensão deve ser mantida durante 60 segundos e realiza-se a leitura da extensão ε_{a1} nos 30 segundos subsequentes. As extensões medidas não devem diferir entre elas ($\varepsilon_{a1} - \varepsilon_b$) em mais de 10%. Se tal não acontecer, deve-se centrar de novo o provete e repetir todo o procedimento anterior. No entanto, se a centragem for satisfatória, reduz-se a carga, à mesma velocidade com que se efetuou o carregamento, até atingir novamente a tensão σ_b . Seguidamente após a carga ter sido mantida durante 60 segundos, realiza-se num intervalo de 30 segundos as leituras das extensões correspondentes (E 397, 1993). Devem repetir-se os ciclos de carga até que a diferença de extensão ($\varepsilon_a - \varepsilon_b$) entre dois ciclos consecutivos não seja superior a 1×10^{-5} . Posteriormente, aumenta-se a carga à mesma velocidade até à rotura do provete, caso o provete não seja levado à rotura, tal facto deve ser referido no boletim de ensaio (E 397, 1993).

O módulo de elasticidade em compressão E_c é calculado com base na expressão:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{(\varepsilon_{a,n} - \varepsilon_{b,n})} \times 10^{-3} \quad (2.15)$$

onde,

σ_a é a tensão máxima aplicada (MPa);

σ_b é a tensão inicial (MPa);

$\varepsilon_{a,n}$ é extensão para a tensão σ_a medida no ciclo de carga “n”;

$\varepsilon_{b,n}$ é extensão para a tensão σ_b medida no ciclo de carga “n”.

2.7.5. Retração

O betão está sujeito a diversos tipos de variações de volume durante a sua vida útil (Goodwin, 2006). A variação livre das dimensões das peças de betão, após a sua compactação, a uma temperatura constante e sem qualquer carga aplicada, pode ser uma retração ou uma expansão. Designa-se por retração a diminuição das dimensões da peça de betão provocadas após a secagem sob condições especificadas, e por expansão o aumento das dimensões da peça de betão em meio húmido sob condições especificadas. No entanto, a retração é o fenómeno mais

importante e frequente, termo que, geralmente se utiliza de forma geral, abrangendo a expansão (Coutinho e Gonçalves, 1994).

Na prática da engenharia, a alteração de volume geralmente é expressa como uma deformação, que é definida como uma variação de comprimento por unidade de comprimento, e, portanto, é uma grandeza sem dimensão (Goodwin, 2006). Para além disso, é fundamental que a alteração volumétrica de um material dimensionalmente estável durante um período longo de tempo, seja o mais curta possível para não causar problemas estruturais (Li, 2011).

De maneira mais detalhada, pode-se dizer que a retração acontece logo após a moldagem do betão. Observa-se que, ao expor ao ar um betão recém-fabricado, devidamente compactado, este inicia a retração (Figura 18) (Almeida, 2005). Neste período inicial é possível que ocorra uma pequena expansão no betão, provocada pela dilatação térmica resultante do calor produzido pela reação química dos componentes do cimento com a água (Almeida, 2005). As mudanças de volume iniciais, durante as primeiras 24 horas, podem influenciar a retração (como a retração por secagem) e a formação de fissuras do betão endurecido, especialmente para o betão com uma baixa relação água/cimento (Kosmatka et al., 2003). A ocorrência da retração nas primeiras horas é pouco conhecida, visto que as medições da retração geralmente são realizadas depois das 24 horas, quando os provetes podem começar a ser manipulados (Coutinho e Gonçalves, 1994; Almeida, 2005).

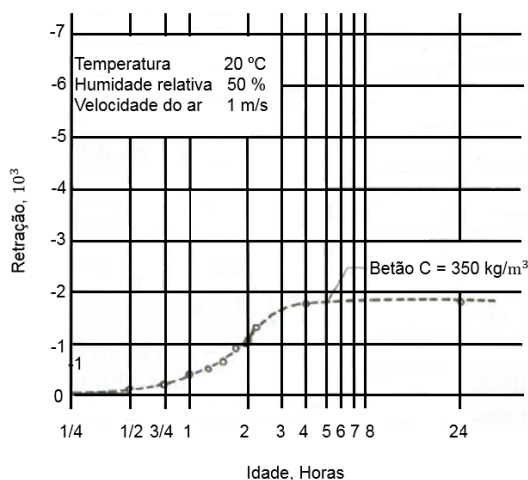


Figura 18 - Retração do betão nas primeiras vinte e quatro horas (adaptado de Coutinho e Gonçalves, 1994)

Podem ocorrer vários tipos de retração num betão, incluindo retração plástica, retração autogénea, retração por secagem e retração por carbonatação (Li, 2011).

Existem diversos fatores que provocam a retração no betão, a temperatura constante, que são enumerados a seguir (Cunha, 2011):

- evaporação da água utilizada na amassadura, que não foi consumida na hidratação do ligante;

- volume dos produtos de hidratação do cimento ser inferior à soma dos volumes da água e dos constituintes anidros;
- o calor provocado pelas reações de hidratação, provoca dilatação no betão fresco, e à medida que é alcançado o equilíbrio com o exterior, existe uma diminuição de volume, ou seja, uma contração.

A retração que ocorre antes da presa é devida ao assentamento dos materiais que constituem o betão e a evaporação da água à superfície (Santos, 2007). Este tipo de retração é denominada de retração plástica.

Destacando apenas a retração que ocorre após a presa do betão, ou seja, quando o betão adquire as propriedades necessárias para funcionar como material estrutural. As parcelas de retração mais significativas após a presa são as de secagem e a autogénea (Santos, 2007).

A retração por secagem é provocada pela saída de água do betão endurecido quando é exposto ao ar não saturado (Ferreira, 2000). Como mencionado anteriormente, para produção de um betão com qualidade, é necessário cerca de duas vezes mais água do que o necessário para a hidratação. Depois do betão ser curado e começar a secar, a água em excesso que não reagiu com o cimento começará a sair do interior do betão para a superfície (Li, 2011). À medida que ocorre a perda de humidade no betão, durante a cura ou após o seu endurecimento, sucede uma diminuição progressiva do volume de betão (retração) que, se for de magnitude suficiente, pode levar ao desenvolvimento de fissuras refletindo na sua durabilidade (Poole e Sims, 2016).

No entanto, uma parte da retração por secagem é reversível, devido à ocorrência de aumentos de volume quando o betão é sujeito a condições de molhagem (ou aumento de humidade relativa do ambiente), ou seja, o betão endurecido expande ligeiramente quando existe um ganho de humidade e contrai com a perda de humidade (Kosmatka et al., 2003).

Relativamente à retração autogénea, esta ocorre quando há uma variação de volume do betão que está conservado sem trocas de humidade com o exterior, a temperatura constante (Coutinho e Gonçalves, 1994). Esta condição acontece principalmente em betões de elevada resistência, que incluem elevadas doses de ligante, devido ao consumo de água interior durante a hidratação (Almeida, 2005). Esta retração ocorre também no interior de grandes massas, ou até em peças com secções superiores a 30 ou 40 cm (Coutinho e Gonçalves, 1994). No interior do betão, tudo acontece como se não houvesse trocas de humidade, ou seja, a secagem do betão é apenas afetada numa profundidade de poucos decímetros ao fim de alguns anos (Coutinho e Gonçalves, 1994).

Por último, com finalidade de efetuar uma análise comparativa entre estes dois tipos de retração, Brooks (2003) salienta, que num betão de resistência normal, a retração autogénea é pequena ($<100 \times 10^{-6}$) e está incluída na retração por secagem, por outro lado nos betões de elevada resistência este tipo de retração pode exceder a retração por secagem.

No entanto, apesar da retração por secagem e a retração autogénea serem de natureza bastante diferente, não há necessidade de realizar uma distinção entre elas no ponto de vista de

engenharia estrutural (Gilbert e Ranzi, 2011). Deste modo, para que a retração autogénea possa ser considerada em conjunto com a retração por secagem, embora seja um fenómeno tridimensional, geralmente é expressa por uma deformação linear (Ferreira, 2000).

Fatores que podem influenciar a retração

A retração do betão é condicionada por diversos fatores. Fatores relacionados com o próprio material, tais como propriedades dos constituintes, propriedades da mistura, geometria da peça e condições de fabrico, e fatores relacionados com as condições a que o material é sujeito, tais como humidade relativa do meio ambiente e a idade do betão (Santos, 2007).

O tipo de pasta de cimento influencia na retração do betão, pois a pasta quando retrai, exerce tensões sobre os agregados (Coutinho e Gonçalves, 1994). Mindess et al. (2003) refere que a retração por secagem do betão será menor do que a da pasta de cimento devido à restrição provocada pelos agregados. No entanto, não existe uma relação definida entre a retração da pasta de cimento e a do betão composto por essa pasta (Coutinho e Gonçalves, 1994). Para além disso, apesar do tipo de cimento influenciar bastante na retração do betão, não é possível prever a retração a partir das suas características (Coutinho e Gonçalves, 1994).

Neville e Brooks (2010) e Mindess et al. (2003) consideram que os agregados são os que têm mais influência na retração do betão, pois estes restringem a retração que efetivamente pode ocorrer. A quantidade de restrição que o agregado oferece depende da quantidade de agregado presente no betão, a sua rigidez, e a máxima dimensão do agregado grosso (Mindess et al., 2003). As tensões presentes na interface do agregado e da pasta de cimento devido a retração por secagem aumentam à medida que a máxima dimensão do agregado grosso aumenta (Mindess et al., 2003)

Troxell, Raphael e Davis, referidos por Coutinho e Gonçalves (1994) iniciaram, em 1926, ensaios com finalidade de medir a retração no betão a longo prazo em betões que apenas diferenciam no tipo de agregado utilizado. Nestes ensaios foi considerado para além do tempo, a natureza petrográfica do agregado. Constatou-se que os betões sofreram retrações diferentes, no entanto, verificou-se que a retração observada no betão que continha o agregado grés chegou a ser superior ao dobro da retração do betão que continha o agregado quartzo. Através destes ensaios concluíram que a natureza do agregado influencia a retração do betão.

Considerando a retração de uma pasta de cimento hidratada, verifica-se que quanto maior for a relação água/cimento, maior é a sua retração, dado que esta determina a quantidade de água evaporável da pasta de cimento e a velocidade que a água se move para a superfície do provete (Neville, 2011). Para além disso, quanto maior for a quantidade e finura de cimento, e principalmente o volume de água de amassadura maior é a retração (Almeida, 2005). Os gráficos da Figura 19 evidenciam a influência das dosagens de cimento e de água no valor da retração final do betão.

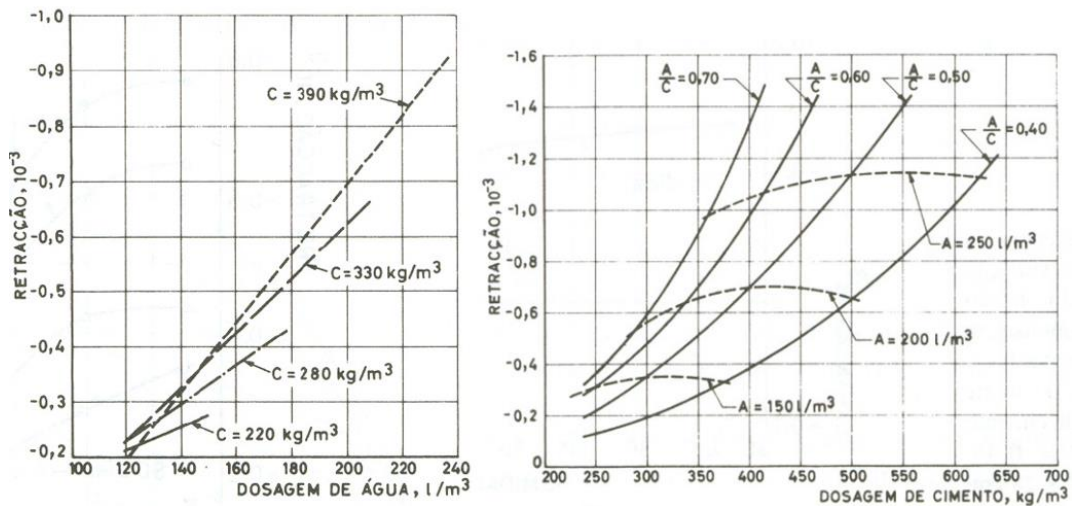


Figura 19 - Retração do betão em função das dosagens de cimento e de água (Coutinho e Gonçalves, 1994)

Contrariamente a Neville e Brooks (2010), Kosmatka et al. (2003) consideram que o fator de maior importância que afeta a retração é a quantidade de água por unidade de volume de betão. Estes realizaram ensaios cujos resultados são apresentados na Figura 20, estes relacionam a dosagem de água com a retração do betão, na área sombreada estão representadas um número elevado de misturas com diversas proporções. Kosmatka et al. (2003) salientam que a retração pode ser minimizada se a dosagem de água no betão for mantida o mais baixo quanto possível. Desta forma, o autor sugere que para se manter esta dosagem no mínimo possível é necessário manter a quantidade de agregados grossos presentes no betão o mais elevada possível (minimizando o volume da pasta de cimento). São, portanto, fatores de importância aqueles que minimizam os requisitos de água, tais como, evitar temperaturas excessivas num betão recém-fabricado, evitar uma percentagem alta de agregados finos, métodos de colocação do betão apropriados (Kosmatka et al., 2003).

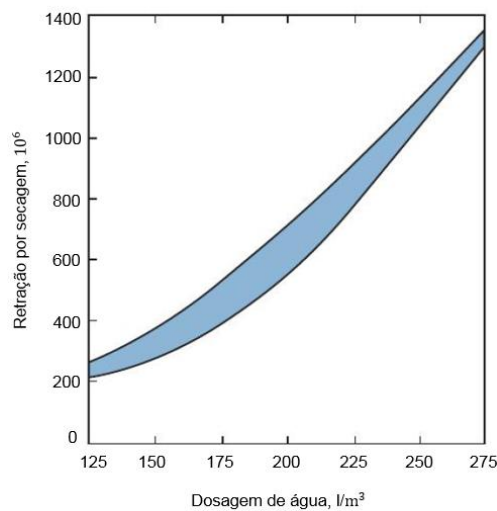


Figura 20 - Relação entre a dosagem de água e a retração por secagem (adaptado de Kosmatka et al., 2003)

Referiu-se que a retração é influenciada fortemente com a humidade relativa. À medida que a humidade relativa aumenta a retração diminui, pois quanto maior for gradiente de humidade relativa entre o betão e o meio ambiente existe uma maior perda de água (Brooks, 2003).

Segundo Coutinho e Gonçalves (1994), como se pode observar na Figura 21, a variação da retração com a humidade relativa é aproximadamente linear entre 100% e 75%. Para além disso, verifica-se que o aumento da retração é menor quando a humidade relativa diminui para valores abaixo dos 75%.

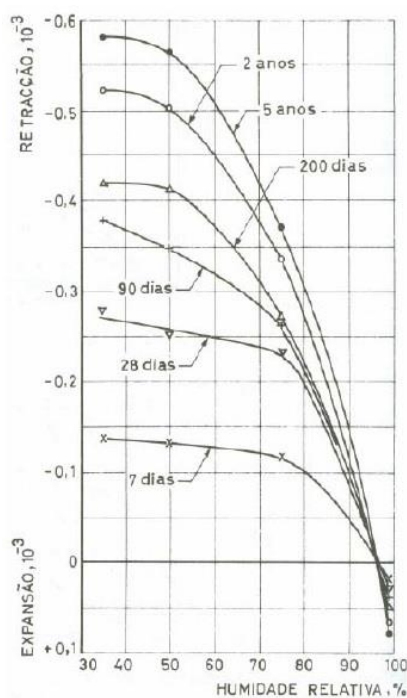


Figura 21 - Influência da humidade relativa na retração do betão. Dosagem de cimento 350 kg/m³ Relação água/cimento = 0.48. Prismas com 7x7x28 cm³ (Coutinho e Gonçalves, 1994).

A idade também influencia a retração, sendo que com o aumento da idade, a retração aumenta a uma taxa decrescente, conforme ilustrado na Figura 22. É assumido que a retração se aproxima de um valor final, ϵ_{cs} (Gilbert e Ranzi, 2011).

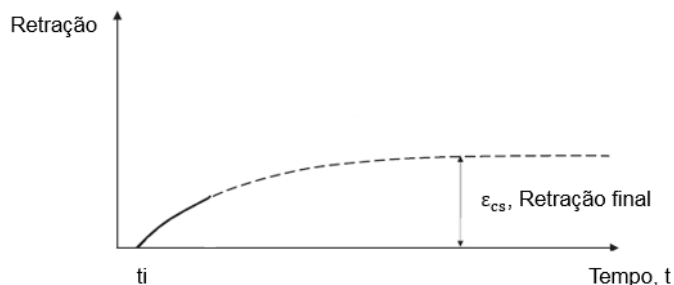


Figura 22 - Variação da retração com o tempo (adaptado de Gilbert e Ranzi, 2011)

O efeito da dimensão da peça é igualmente um fator que deve ser considerado na retração. Na estrutura de betão, relativamente à dimensão da peça, o que interessa considerar é a profundidade da peça (Coutinho e Gonçalves, 1994). Mindess et al. (2003) consideram que a forma

e o tamanho da peça são igualmente importantes visto que estes determinarão a taxa de perda de humidade na peça, e conseqüentemente, a taxa e dimensão da retração por secagem.

Para elementos finos, como as lajes, o processo de secagem (tempo que demora a ocorrer evaporação da água) pode ser concluído após vários anos, mas para o interior de um membro de maiores dimensões, o processo de secagem pode continuar ao longo de toda a sua vida útil (Gilbert e Ranzi, 2011), pois a retração está condicionada pela evaporação de parte da água de amassadura. Além do mais, nos elementos finos a retração é maior, dado que a retração diminui quando a espessura aumenta.

Determinação da retração

O método para a determinação da retração do betão é realizado segundo a especificação E 398 (1993). Nos ensaios da retração do betão é considerada na generalidade dos casos a retração global. Para a realização deste ensaio, a especificação E 398 (1993), prevê para a utilização de provetes prismáticos de secção quadrada ou provetes cilíndricos, sendo que, a relação entre o comprimento e a aresta ou diâmetro não deve ser inferior a 3 e estes devem ser pelo menos igual a 4 vezes a máxima dimensão do agregado.

Em cada provete, durante a moldagem, devem ser colocados nas extremidades pernos metálicos, ou devem ser colocadas hastes metálicas perpendicularmente ao seu eixo maior. Estes elementos metálicos servem como pontos de referência no provete de betão. Em cada ensaio devem ser utilizados pelo menos dois provetes (E 398, 1993). Durante todo período de secagem, os provetes devem ser mantidos num local a uma temperatura ambiente de 20 ± 2 °C e uma humidade relativa de $50 \pm 5\%$ (E 398, 1993).

A medição da retração é realizada com um equipamento com precisão de 5×10^{-6} com uma base de medida não inferior a 4 vezes a máxima dimensão do inerte, e deve começar logo após a desmoldagem do provete, sendo que a idade especificada para a primeira medição da retração em cada provete é de 24 ± 1 h. Nessa medição é medida a variação do comprimento total da peça a partir de uma referência inicial, e logo de seguida é colocado o provete no local de secagem com todas as suas faces em contacto com o ar. O período de secagem deve ser de 90 ± 1 dias. Após este período o provete é retirado do local de secagem e é retirada a distância entre os pontos de referência. No entanto, podem ser realizadas medições noutras idades pretendidas, e até pode ser prolongado o ensaio (E 398, 1993).

A retração do provete é obtida pela seguinte expressão (E 398, 1993):

$$\varepsilon_{cs} = \frac{d_f - d_i}{d_i} \quad (2.16)$$

onde,

d_i é a distância entre os pontos de referência no início do ensaio (mm);

d_f é a distância entre os pontos de referência no fim do ensaio (mm).

O resultado é a média dos valores obtidos nos provetes ensaiados.

2.8. Classificação do betão (NP EN 206-1, 2007)

O betão pode ser especificado de duas maneiras distintas, pode ser consoante o seu comportamento especificado ou composição prescrita. Para se proceder à caracterização de um betão de comportamento especificado é necessário ter como referência a classificação e os requisitos fundamentais e adicionais que constam na norma NP EN 206-1 (2007).

2.8.1. Classes de resistência

Na escolha da classe de resistência à compressão do betão de num elemento estrutural ou estrutura é necessário ter em consideração os ambientes a que vai estar exposto ao longo de toda a sua vida útil, de forma a garantir a durabilidade pretendida (APEB, 2008).

Segundo a NP EN 206-1 (2007), os betões são classificados em diferentes classes de resistência à compressão em função da medição da resistência à compressão aos 28 dias em provetes cilíndricos ($f_{ck,cyl}$) de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura ou em provetes cúbicos ($f_{ck,cube}$) de 150 mm de aresta. Estes provetes são fabricados e curados de acordo com a norma indicada.

O betão normal ou pesado é designado pelo símbolo (C) e o betão leve pelo símbolo (LC). A designação “Cx/y” é utilizada para as classes de resistência de betões de massa volúmica normal, onde “x” representa a resistência característica mínima em cilindros e o “y” representa a resistência característica mínima em cubos. Ambas as resistências características são obtidas aos 28 dias de idade do betão. Na Tabela 2 estão indicadas as classes mais comuns de resistências à compressão para betões de massa volúmica normal, com as resistências características relativas a cada tipo de provete.

Tabela 2 - Classes de resistência à compressão para betões de massa volúmica normal (NP EN 206-1, 2007).

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (MPa)	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (MPa)	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ (MPa)
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Para que se verifiquem os critérios de controlo de qualidade e segurança, a resistência característica do betão deve ser igual ou superior à resistência característica mínima à compressão requerida para a classe de resistência à compressão especificada (Carminho, 2012).

2.8.2. Classes de consistência

Numa amassadura do betão, o essencial é a homogeneização de todos os seus constituintes, de modo a que este possa ser transportado, colocado, compactado e acabado mantendo essa homogeneidade, sem segregação, em todas as fases do processo. Designa-se genericamente de consistência a propriedade associada a essa capacidade de manter a homogeneidade (Fernandes, 2005).

No entanto, este conceito é vago, pois o betão no estado fresco, pode variar do estado fluido a quase sólido. Sendo assim, a consistência inclui um conjunto de propriedades, tais como (Fernandes, 2005):

- o ângulo de atrito interno, viscosidade e coesão relacionadas com a maior ou menor mobilidade relativa do betão;
- exsudação e segregação associadas com a estabilidade da mistura;
- massa volúmica associada com a compactação.

A escolha da classe de consistência, depende de diversos fatores como por exemplo, a distância entre o local de produção e a estrutura onde será aplicado ou se o método de aplicação consistir em bombagem (Souto, 2010). Por exemplo, para um betão destinado a ser bombado, o abaixamento ideal terá no mínimo 10 cm. Um betão que geralmente é vibrado com vibrador de agulha, o abaixamento será da ordem dos 4 cm (APEB, 2008; Cunha, 2011).

A consistência deve ser especificada através de uma classe, tendo em consideração o método de ensaio mais adequado, a NP EN 206-1 (2007) estabelece quatro métodos de medição da consistência:

- ensaio de abaixamento;
- ensaio de Vêbê;
- ensaio de Compactação;
- ensaio de Espalhamento.

No entanto, o ensaio mais utilizado nas obras é o ensaio de abaixamento. Os quadros 3-6 apresentam quatro classes de consistências distintas que variam de acordo com o ensaio utilizado (NP EN 206-1, 2007). No entanto, as classes de consistência definidas por métodos diferentes não podem ser diretamente relacionadas.

Quadro 3 - Classes de abaixamento

Classe	Abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥ 220

Quadro 4 - Classes Vêbê

Classe	Tempo Vêbê (s)
V0	≥ 31
V1	30 a 21
V2	20 a 11
V3	10 a 6
V4	5 a 3

Quadro 5 - Classes de compactação

Classe	Grau de compatibilidade
C0	≥ 1.46
C1	1.45 a 1.26
C2	1.25 a 1.11
C3	1.10 a 1.04
C4	< 1.04

Quadro 6 - Classes de espalhamento

Classe	Diâmetro de espalhamento (mm)
F1	≤ 340
F2	350 a 410
F3	420 a 480
F4	490 a 550
F5	560 a 620
F6	≥ 630

3. Descrição da campanha laboratorial

A porção maioritária do trabalho experimental executado no âmbito desta dissertação foi realizada no Laboratório Cimentos Madeira, pertencente ao grupo Cimentos Madeira, sendo que a outra porção foi efetuada no Laboratório Regional de Engenharia Civil da Região Autónoma da Madeira.

Os ensaios realizados foram de resistência à compressão em provetes cúbicos, de resistência à tração em provetes cilíndricos, de módulo de elasticidade em provetes cilindros e resistência à retração em provetes prismáticos, todos eles com diferentes amostras de diversos tipos de betão.

O objetivo principal deste capítulo consiste em explicar todos os procedimentos adotados durante o trabalho experimental, assim como apresentar os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados durante esse trabalho.

3.1. Esquematização das atividades

Nas Figuras 23-25 apresentam-se três esquemas que descrevem as várias fases relativas ao trabalho experimental efetuado: fase da planificação, fase da produção do betão, fase da realização dos moldes e fase da realização dos ensaios.

Em primeiro lugar, foi necessária a realização de uma pesquisa para obtenção da informação sobre o leque de ensaios disponíveis capazes de conduzir aos objetivos pretendidos.

Efetou-se uma análise à documentação para averiguar possíveis limitações que possam ocorrer na realização dos ensaios. Seguidamente, uma visita ao Laboratório do Grupo Cimentos Madeira permitiu uma melhor perceção do tipo de equipamento e material disponível para a realização dos ensaios e as suas limitações. Nesta fase constatou-se o impedimento da execução dos ensaios referentes à carbonatação e aos cloretos devido à falta de equipamento. Averiguou-se que os moldes prismáticos disponíveis, apenas três, para a execução do ensaio de retração seriam insuficientes para produzir três provetes provenientes de cada uma das quatro amassaduras (perfazendo um total de nove provetes) realizadas no mesmo dia. Sendo assim concluiu-se que seriam necessárias duas amassaduras extra em dias diferenciados. Para além disso, recorreu-se ao Laboratório Regional de Engenharia Civil para a realização dos ensaios do módulo de elasticidade e de resistência à tração, devido à inexistência de equipamento inerente a estes ensaios no Laboratório Cimentos Madeira.

Em segundo lugar, procedeu-se à pesagem de todos os materiais necessários para a realização das seis pré-misturas de betão pré-doseado, sendo que quatro delas foram realizadas no mesmo dia e duas outras em dias distintos. Estas pré-misturas são devidamente identificadas e separadas de modo a não ocorrer desordem.

Procedeu-se à execução das seis amassaduras de betão pré-doseado para as diferentes horas de produção após a realização da pré-mistura.

Para a produção do betão pronto C30/37, realizada no dia 12-12-2016, pesaram-se todos os materiais necessários e realizou-se a sua amassadura.

Em terceiro lugar, em cada amassadura produzida com o betão no estado fresco efetuou-se o ensaio de abaixamento. Seguidamente procedeu-se ao enchimento de nove moldes cúbicos, três cilíndricos e três prismáticos de cada amassadura executada.

Em quarto lugar, avançou-se com a realização dos ensaios do betão no estado endurecido. Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizados três provetes de cada amassadura de Betomix e de betão pronto C30/37, para serem ensaiados aos 7, 28 e 56 dias.

Relativamente ao betão pronto C30/37, logo na execução deste ficou a dúvida sobre a sua qualidade em relação ao betão normalmente comercializado pela empresa Cimentos Madeira, pelo facto deste apresentar um valor de abaixamento elevado com 20 cm. No entanto, apenas confirmou-se esta questão, quando foram averiguados os resultados, relativos ao ensaio de resistência à compressão para este betão aos 28 dias, verificando-se que estes foram inferiores ao esperado para um betão desta classe de resistência. Sendo assim, houve a necessidade de proceder à repetição da produção deste betão no dia 18-01-2017.

Para o ensaio do módulo de elasticidade utilizaram-se três provetes cilíndricos de cada amassadura de Betomix e de betão pronto C30/37, para serem ensaiados aos 28 dias. Aproveitou-se estes mesmos provetes para a execução do ensaio de resistência à tração na data indicada.

No ensaio de retração, utilizaram-se três provetes de cada amassadura Betomix e de betão pronto C30/37. No entanto, devido à falta de provetes prismáticos, optou-se pela exclusão da amassadura das (0.0 h), dado que sempre que a pré-mistura sai da central de produção para ser entregue ao utilizador do betão, dificilmente é adicionada água num tempo muito próximo à realização desta, sendo assim preferiu-se executar este ensaio nas amassaduras (1.5 h), (3.0 h) e (4.5 h) por apresentarem condições mais realistas e desfavoráveis. As datas das medições deste ensaio foram escolhidas segundo as indicações fornecidas na especificação E 398 (1993).

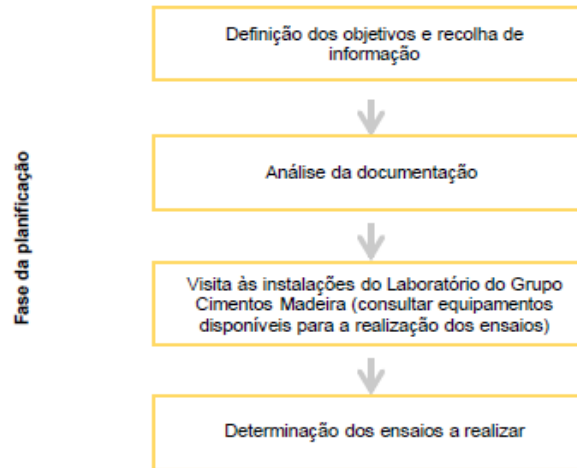


Figura 23 - Fase da planificação.

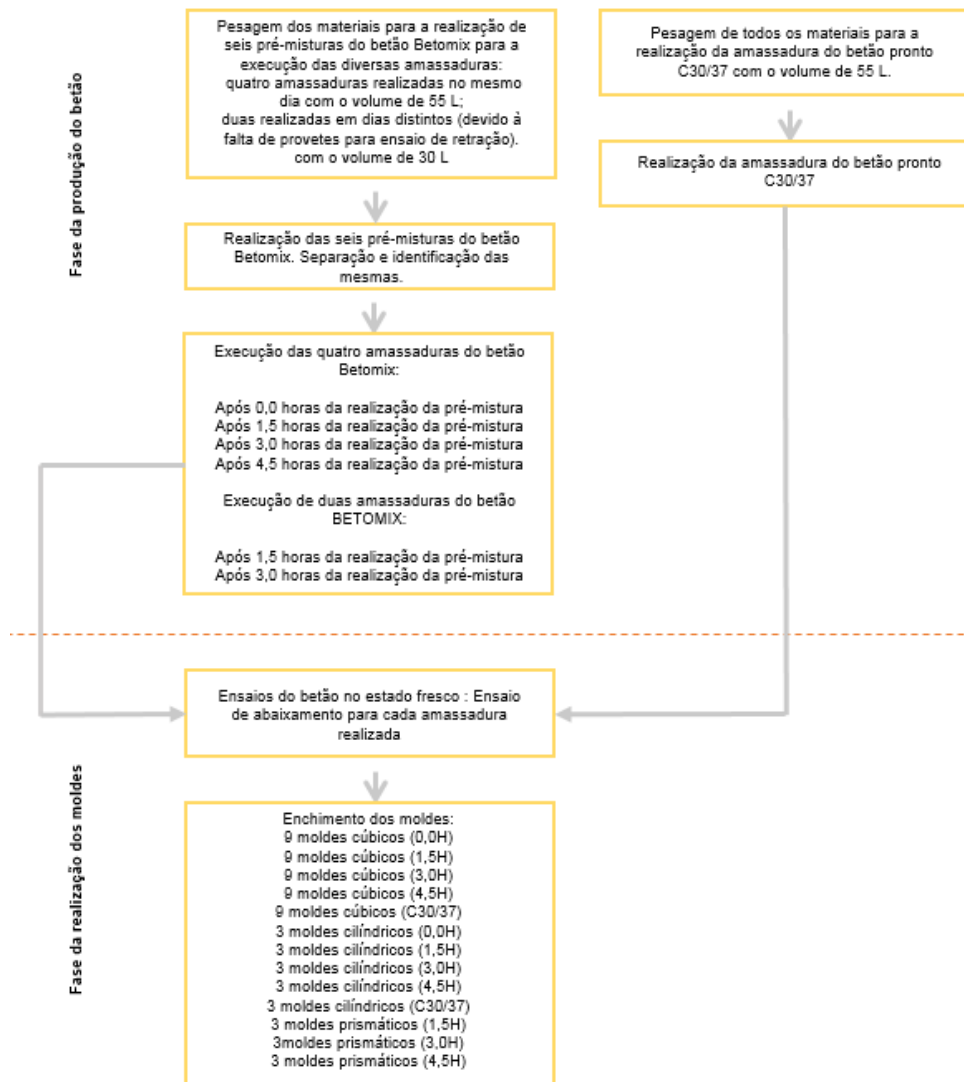


Figura 24 - Fase da produção de betão e fase da realização dos moldes.

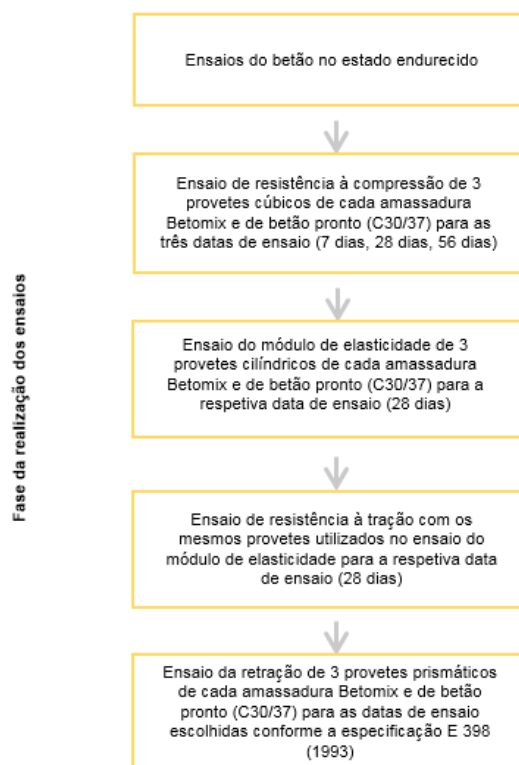


Figura 25 - Fase da realização dos ensaios.

3.2. Materiais

Neste trabalho, utilizou-se para a realização da pré-mistura o cimento Portland de calcário, CEM II / A-L 42.5 R da marca Secil, do qual se apresenta a ficha técnica no anexo B. A água utilizada na amassadura para o fabrico do betão foi a que se encontra disponível no laboratório Cimentos Madeira, que tem origem na rede pública de abastecimento de água da cidade do Funchal. Desta forma, e como é considerada uma água potável, satisfaz os requisitos da norma NP EN 1008 (2003) que define a água adequada para o fabrico do betão.

Na produção do betão pronto C30/37 convencional foram utilizados dois adjuvantes: o Pozzolith 390 N que se comporta, ao nível da redução de água e fluidificação; e o MasterEase atua como superplastificante. No entanto, na produção do betão Betomix apenas foi utilizado um adjuvante, o Pozzolith 390 N.

Relativamente aos agregados, foram utilizados três tipos: a brita 4/10 (Figura 26a), areia 0/4 (Figura 26b) e areia 0/2 (Figura 26c) todos eles com origem basáltica provenientes da Região Autónoma da Madeira. Na Tabela 3, demonstram-se as principais características dos agregados, particularmente a massa volúmica, absorção de água e diâmetro máximo. A absorção de água foi determinada pelo Laboratório Cimentos Madeira, de acordo com a NP EN 1097-6 (2016), desta forma, para as partículas de agregado utilizadas nestes dois tipos de betão foi utilizado o método do picnómetro.

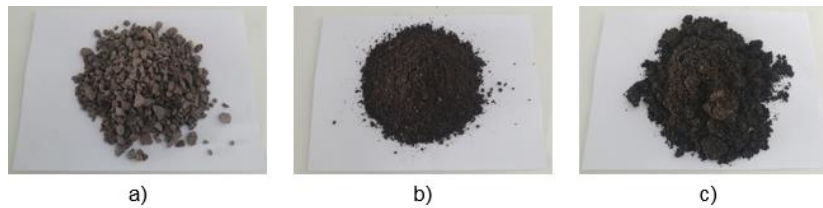


Figura 26 - Agregados utilizados: a) Brita 4/10, b) Areia 0/4, c) Areia 0/2

Tabela 3 - Principais características dos agregados.

	Absorção de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)
Brita 4/10	2.7	2890
Areia 0/4	2.8	2840
Areia 0/2	2.6	2890

Neste tipo de material, o Grupo Cimentos Madeira optou apenas pela introdução de uma adição, nomeadamente, cinzas volantes (Figura 27). As cinzas volantes utilizadas são provenientes da Central Termoelétrica de Sines.



Figura 27 - Cinzas Volantes

A composição do betão pré-misturado Betomix é da responsabilidade da própria empresa fornecedora, Grupo Cimentos Madeira, no entanto, as quantidades utilizadas, em kg/m³, para a execução das amassaduras de Betomix apresentam-se na Tabela 4. Salienta-se que a quantidade de água apresentada na tabela é a inicial, sendo que conforme aumentou o tempo após a pré-mistura introduziu-se uma quantidade de água adicional.

Tabela 4 - Composição do betão Betomix

Componentes	kg/m ³
Brita 4/10	780
Agregados Areia 0/4	685
Areia 0/2	399

Componentes		kg/m ³
Ligante	Cimento, CEM II/ A-L 42.5 R	400
	Cinzas volantes	60
Adjuvante	Pozzoloth 390 N	4.6
H ₂ O	Água	174

3.3. Pré-mistura do betão Betomix

Durante as diversas pré-misturas e amassaduras realizadas neste trabalho, optou-se sempre pela utilização de uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade máxima de 300 litros por mistura de betão (Figura 28).



Figura 28 - Betoneira de eixo inclinado utilizada na produção do betão.

Para a realização da pré-mistura de Betomix, iniciou-se a pesagem individual de todos os materiais que a constituem (agregados (Figura 30a), cimento, cinzas volantes e adjuvante) separando-os em diferentes recipientes (Figura 29). O adjuvante foi medido em volume, numa proveta graduada (Figura 30b). As dosagens dos materiais utilizados são de acordo com a composição formulada pelos Cimentos Madeira.



Figura 29 - Materiais que constituem a pré-mistura do betão pré-misturado devidamente separados



Figura 30 - Pesagem dos materiais para produzir a pré-mistura do Betomix: a) Agregados, b) Adjuvante

Após a pesagem de todos os materiais para a execução da pré-mistura de Betomix, introduziram-se sequencialmente os seus constituintes na betoneira, nomeadamente os agregados (a brita com a areia), o cimento e depois as cinzas volantes. Por último, adicionou-se o adjuvante. Após este procedimento, deixou-se a betoneira em atividade, de forma a misturar todos estes constituintes a seco, durante cerca de nove minutos. Posteriormente, registou-se o horário de finalização da pré-mistura de betão Betomix, a qual foi retirada da betoneira para um recipiente apropriado (Figura 31) ao abrigo da luz solar direta, vento e chuva.



Figura 31 - Introdução da pré-mistura num recipiente apropriado

Repetiu-se todo este processo quatro vezes no mesmo dia (14-12-2016), de forma a realizar quatro pré-misturas iguais, que foram devidamente separadas e identificadas (Figura 32). No entanto, após a execução da última pré-mistura efetuada no dia (14-12-2017), ao contrário de todas as outras, esta permaneceu na betoneira não sendo retirada para um recipiente.

De referir ainda, que no dia anterior (13-12-2016) e no dia posterior (15-12-2016) realizou-se todo este processo para a execução de uma pré-mistura em cada dia.



Figura 32 - Três pré-misturas do betão Betomix devidamente identificadas e separadas

3.4. Amassadura do betão Betomix

É essencial garantir uma mistura o mais homogénea possível, de modo que todos os materiais que constituem o betão fiquem devidamente envolvidos.

Estabeleceu-se que iriam ser concebidas quatro amassaduras exatamente iguais (mesmos constituintes e quantidades) variando apenas a hora da sua produção. A primeira amassadura realiza-se imediatamente após a conclusão da última pré-mistura, representando a amassadura das 0.0 horas após a execução da pré-mistura. As amassaduras restantes são realizadas em horas posteriores distintas:

- uma amassadura após 1.5 horas da realização da pré-mistura;
- uma amassadura após 3.0 horas da realização da pré-mistura;
- uma amassadura após 4.5 horas da realização da pré-mistura.

No entanto, devido à falta de moldes para o ensaio de retração foi necessária a execução de duas amassaduras extraordinárias:

- uma amassadura, realizada no dia 13-12-2016, após 3.0 horas da realização da pré-mistura efetuada nesse mesmo dia;
- uma amassadura, realizada no dia 15-12-2016, após 1.5 horas da realização da pré-mistura efetuada nesse mesmo dia.

Na Tabela 5 apresentam-se as datas da realização das amassaduras, assim como a quantidade de provetes cúbicos, cilíndricos e prismáticos que foram betonados nesses dias.

Tabela 5 - Datas da execução das amassaduras e provetes para os diversos betões

Betão	Data da amassadura	Volume da amassadura (litros)	Nº. Provetes cúbicos	Nº. Provetes cilíndricos	Nº. Provetes prismáticos
Betomix (0.0 h)	14-12-2016	55	9	3	0
Betomix (1.5 h)	14-12-2016	55	9	3	0
Betomix (3.0 h)	14-12-2016	55	9	3	0
Betomix (4.5 h)	14-12-2016	55	9	3	3
Betomix (1.5 h)	15-12-2016	30	0	0	3
Betomix (3.0 h)	13-12-2016	30	0	0	3
C30/37	12-12-2016	55	9	3	3
C30/37 Repetição	18-01-2017	55	9	3	3
Total			54	18	15

Para proceder ao início da confeção do betão fresco, mediu-se a quantidade de água mínima necessária, num recipiente limpo e seco, conforme recomendação do produtor.

Para produzir a primeira amassadura, a pré-mistura já se encontrava dentro da betoneira, bastou ligar o equipamento e proceder de imediato à introdução da quantidade de água correta na

betoneira. Após este procedimento deixou-se a máquina em atividade, de forma a envolver todos os materiais, durante nove minutos.

Para todas as amassaduras posteriores, colocou-se a pré-mistura na betoneira e ligou-se a máquina, seguidamente introduziu-se a quantidade de água correta na betoneira (igual à quantidade de água utilizada na primeira amassadura). Após este procedimento deixou-se a betoneira em atividade durante cinco minutos, retirou-se uma pequena amostra da amassadura de betão e constatou-se que seria necessário introduzir uma quantidade de água adicional.

Concluiu-se que seria necessária uma quantidade de água adicional através da realização do ensaio de abaixamento (Slump-test), executado com suporte na norma NP EN 12350-2 (2009). Apesar deste ensaio geralmente ser realizado no fim da execução das amassaduras, por haver suspeita visual de que a consistência das amassaduras de betão Betomix (1.5 h, 3.0 h e 4.5 h) não seria adequada, efetuou-se um ensaio de abaixamento suplementar sem que o processo de amassadura estivesse finalizado, ou seja, após cinco minutos dentro da betoneira em atividade. Deste modo, iniciou-se o ensaio, com a retirada de uma pequena amostra na execução de cada mistura no interior da betoneira e seguiu-se o método de ensaio descrito no capítulo anterior.

Com a execução deste ensaio, obteve-se a consistência do betão no estado fresco após cinco minutos de mistura. A consistência está relacionada com a capacidade de movimentação do betão, ou seja, está ligada com a habilidade que o betão tem de se espalhar e a facilidade de o moldar (Pereira, 2014). Desta forma, tem-se noção da trabalhabilidade do betão, e da eventual necessidade da adição de água durante a amassadura do betão Betomix ou se a mistura contém água em excesso. Nas amassaduras (1.5 h, 3.0 h, 4.5 h) resultaram valores de abaixamento baixos, verificando-se uma diminuição desses valores com o passar do tempo após a realização da pré-mistura. Deste modo, verificou-se através dos valores obtidos do abaixamento que existiu uma redução na trabalhabilidade deste betão face à primeira amassadura (0.0 h), resultando valores de abaixamento inadequados, levando à necessidade de introdução de água adicional.

Deste modo, observou-se através dos valores obtidos do abaixamento que existiu uma redução na trabalhabilidade deste betão face à primeira amassadura (0.0 h), que iria resultar em valores de abaixamento inadequados no fim da execução das amassaduras (1.5 h, 3.0 h, 4.5 h). Sendo assim, para obter-se uma trabalhabilidade adequada e semelhante em todos os betões, existiu a necessidade de introdução de água adicional.

A quantidade de água suplementar adicionada foi definida com base na sensibilidade visual até a obtenção de uma consistência apropriada. A quantidade de água adicionada na amassadura para além da inicial aumentou, conforme ocorreu a ampliação do intervalo de tempo entre a pré-mistura e execução da amassadura. Na Tabela 6 apresentam-se as quantidades de água totais adicionadas em cada uma das amassaduras, a quantidade de água inicialmente prevista para cada uma delas e a respetiva relação água/ligante.

Tabela 6 - Quantidade de água prevista, suplementar adicionada e total adicionada no Betomix e relação água/ligante

Betão	Quantidade (l/m ³)			Relação a/l
	Água inicialmente prevista	Água suplementar adicionada	Água total adicionada	
Betomix (0.0 h)	174	0.0	174	0.38
Betomix (1.5 h)	174	18.2	192	0.42
Betomix (3.0 h)	174	27.3	201	0.44
Betomix (4.5 h)	174	31.0	205	0.45

É fundamental mencionar que o início da amassadura corresponde ao momento em que a água é introduzida na betoneira, ou seja, corresponde ao instante em que esta água introduzida entra em contacto com o cimento.

Por fim, após a introdução de água adicional na betoneira, deixou-se a betoneira em atividade durante mais 5 minutos. Após a conclusão da mistura procede-se à retirada de todo o betão fresco contido na betoneira (Figura 33).



Figura 33 - Descarga do betão fresco

Concretizados todos os passos para a execução das amassaduras, efetuou-se o ensaio de abaixamento para cada uma das amassaduras Betomix de acordo com a NP EN 12350-2 (2009), como se pode observar na Figura 34. Este ensaio é válido quando se verifica um abaixamento verdadeiro, no qual o betão permanece intacto e simétrico. A Figura 35 evidencia o resultado da execução do ensaio de abaixamento para o betão Betomix após zero horas da realização da pré-mistura.



Figura 34 - Execução do ensaio de abaixamento



Figura 35 - Resultado do ensaio de abaixamento do betão Betomix (0.0 h)

Na Figura 36 está representado esquematicamente todo este processo relativo às amassaduras de betão Betomix (1.5 h, 3.0 h e 4.5 h), desde o início da amassadura até à realização do ensaio de abaixamento.

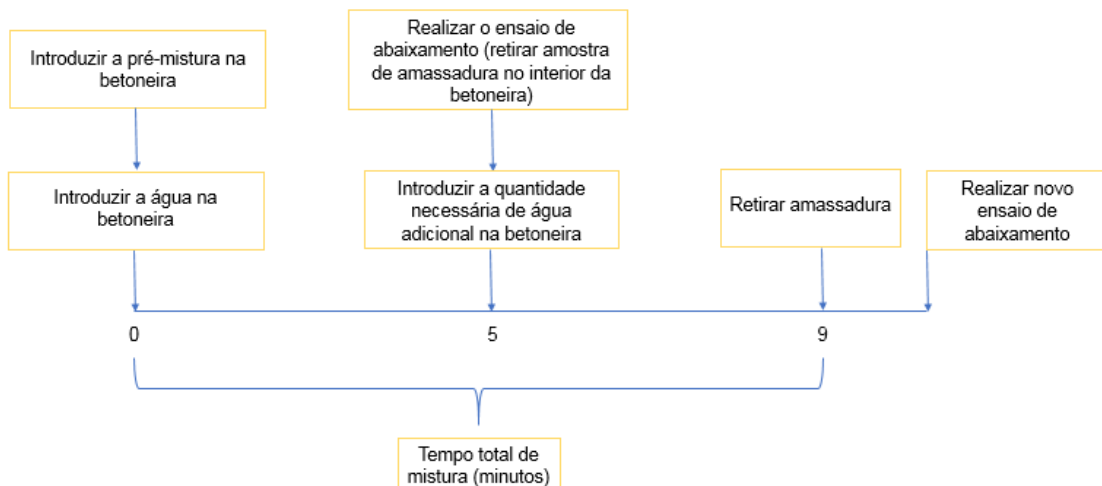


Figura 36 - Processo esquemático desde o início da amassadura (1.5 h, 3.0 h e 4.5 h) de betão Betomix até à execução do ensaio de abaixamento

Na Tabela 7 seguem-se os resultados de abaixamento obtidos para todos os tipos de amassaduras executadas após a conclusão da amassadura.

Tabela 7 - Valores de abaixamento obtidos após a conclusão de cada amassadura

Abaixamento (cm) – Mistura concluída					
Data	12-12-2016	13-12-2016	14-12-2016	15-12-2016	18-01-2017
Betomix (0.0 h)	-	-	16	-	-
Betomix (1.5 h)	-	-	12	13	-
Betomix (3.0 h)	-	11	15	-	-
Betomix (4.5 h)	-	-	17	-	-
Betão Pronto C30/37	20	-	-	-	13

É importante deixar claro, que nas amassaduras (4.5 h e 1.5 h) realizadas no dia 13-12-2016 e no dia 15-12-2016 respetivamente, utilizaram-se as mesmas quantidades e tipos de constituintes assim como a mesma quantidade de água adicionada nas amassaduras do dia 14-12-2016 para conseguir produzir um betão com as características exatamente iguais.

3.5. Amassadura do betão pronto C30/37

Para confeção do betão fresco C30/37, realizada no dia 12-12-2016 e repetida no dia 18-01-2017, pesaram-se todos os materiais necessários (agregados, cimento, água, cinzas volantes, adições e adjuvante) (Figura 37). Os materiais foram introduzidos sequencialmente na betoneira, iniciando pelos agregados (a brita com a areia), seguido do cimento, adições, água e por último os adjuvantes. Os agregados e o cimento foram misturados a seco durante um minuto de maneira a homogeneizar a mistura. Seguidamente adicionou-se água e deixou-se a betoneira em atividade durante mais nove minutos.



Figura 37 - Materiais devidamente pesados para produzir o betão pronto C30/37

Por fim, após a conclusão da mistura procede-se à retirada de todo o betão fresco contido na betoneira (Figura 33). Seguidamente, efetuou-se o ensaio de abaixamento de acordo com a NP EN 12350-2 (2009). Na Tabela 7 apresenta-se os valores de abaixamento obtido para a primeira amassadura do betão pronto C30/37 no dia 12-12-2016 e para a repetição deste betão no dia 18-01-2017.

A composição do betão C30/37 é da responsabilidade da própria empresa fornecedora, Grupo Cimentos Madeira, no entanto, as quantidades utilizadas, em kg/m³, para a execução das amassaduras apresentam-se na Tabela 8

Tabela 8 - Composição do betão C30/37

	Componentes	kg/m³
Agregados	Brita 4/10	732
	Areia 0/4	798
	Areia 0/2	422
Ligante	Cimento, CEM II/ A-L 42.5 R	355
	Cinzas volantes	55
Adjuvantes	Pozzolith 390 N	2.1
	MasterEase	2.5
H ₂ O	Água	173

3.6. Ensaios do betão no estado endurecido

Para caracterizar mecanicamente cada tipo de betão, efetuaram-se, no estado endurecido, os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração. Para além disso, para obter provetes adequados para a realização dos ensaios são necessários seguir determinados procedimentos na moldagem e desmoldagem e cura dos provetes.

Na Tabela 9 apresentam-se as datas da realização dos ensaios, assim como a quantidade de provetes utilizados para os ensaios de resistência à compressão, e na Tabela 10 apresentam-se esses mesmos dados, mas para os ensaios de resistência à tração e módulo de elasticidade. Tal como já foi referido anteriormente, os provetes utilizados no ensaio de resistência à tração foram os mesmos para a execução do ensaio do módulo de elasticidade.

Tabela 9 - Datas da realização do ensaio de resistência à compressão para os diversos tipos de betão e o número de provetes ensaiados

Ensaio de resistência à compressão			
Betão	Idade do provete	Data de ensaio	Nº provetes cúbicos
Betomix (0.0 h)	7	21-12-2016	3
	28	11-01-2017	3
	56	08-02-2017	3
Betomix (1.5 h)	7	21-12-2016	3
	28	11-01-2017	3
	56	08-02-2017	3
Betomix (3.0 h)	7	21-12-2016	3
	28	11-01-2017	3
	56	08-02-2017	3
Betomix (4.5 h)	7	21-12-2016	3
	28	11-01-2017	3
	56	08-02-2017	3
C30/37	7	19-12-2016	3
	28	09-01-2017	3
	56	06-02-2017	3
Repetição C30/37	7	25-01-2017	3
	28	17-02-2017	3
	56	15-03-2017	3
Total			54

Tabela 10 - Datas da realização do ensaio de resistência à tração e ensaio do módulo de elasticidade para os diversos tipos de betão e o número de provetes ensaiados

Ensaio de resistência à tração e ensaio do módulo de elasticidade			
Betão	Idade do provete	Data de ensaio	Nº provetes cilíndricos
Betomix (0.0 h)	30	13-01-2017	3
Betomix (1.5 h)	30	13-01-2017	3
Betomix (3.0 h)	30	13-01-2017	3
Betomix (4.5 h)	30	13-01-2017	3

Ensaio de resistência à tração e ensaio do módulo de elasticidade			
Betão	Idade do provete	Data de ensaio	Nº provetes cilíndricos
Repetição C30/37	28	15-02-2017	3
Total			15

3.6.1. *Moldagem, desmoldagem e cura dos provetes*

Antes de proceder ao enchimento dos moldes, trataram-se previamente os mesmos. Primeiramente, verificou-se se todos os moldes estavam em condições de serem utilizados e devidamente limpos. Em seguida procedeu-se à montagem dos moldes prismáticos com dimensões de 50x50x200 mm³ e dos moldes cilíndricos com dimensões de 300x150 mm. Posteriormente, aplicou-se óleo desmoldante em todos os moldes (prismáticos, cilíndricos e cúbicos), para facilitar o processo de desmoldagem (Figura 38). Identificaram-se todos os moldes de forma a conseguir distinguir os diversos betões na desmoldagem (Figura 39).



Figura 38 - Aplicação do óleo desmoldante nos moldes cúbicos.



Figura 39 - Moldes cúbicos devidamente identificados

Após a realização do ensaio de abaixamento, iniciou-se o enchimento dos moldes (cúbicos, cilíndricos e prismáticos), com recurso a uma colher (Figura 40). Quando os moldes cúbicos se encontravam preenchidos até à superfície, iniciou-se a vibração do betão, com recurso a um vibrador de agulha durante cerca de 20 segundos (Figura 41). Os moldes cilíndricos foram preenchidos em duas fases, primeiramente preencheu-se metade do molde e vibrou-se com um vibrador de agulha durante 10 segundos, em seguida, preencheu-se o restante e vibrou-se durante

15 segundos. Os moldes prismáticos foram preenchidos em duas fases, a primeira até sensivelmente metade da altura e a outra até à superfície. Em cada fase, com o auxílio de uma mesa compactadora de argamassa, realizaram-se 60 pancadas para alcançar um betão bem compactado (Figura 42). No final, após a compactação do betão, procedeu-se ao nivelamento da superfície de todos os moldes, rasando-a, de forma a retirar o excesso de betão (Figura 43).



Figura 40 - Enchimento dos moldes prismáticos, cilíndricos e cúbicos com o auxílio de colher

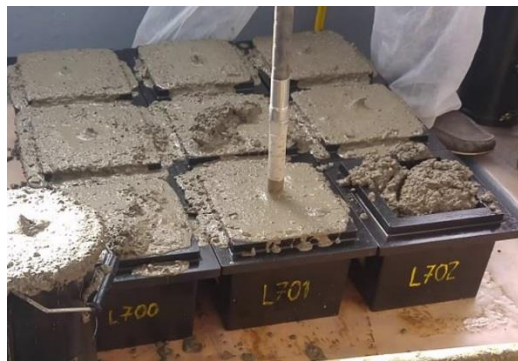


Figura 41 - Vibração do betão no molde cúbico



Figura 42 - Máquina para compactação dos moldes prismáticos.



Figura 43 - Rasamento das superfícies dos moldes cúbicos e prismáticos.

O betão permaneceu nos moldes cúbicos e cilíndricos durante um período de 24 horas, ao ar livre e protegido contra choques, vibrações e desidratação (Figura 44). O intervalo de tempo aconselhado é de pelo menos 16 horas e não mais de 36 horas (NP EN 12390-2, 2009). Particularmente para o ensaio de retração, após o nivelamento da superfície dos moldes prismáticos, foi colocada uma placa de vidro sobre estes para evitar perda de humidade e desidratação (Figura 45). O betão permaneceu dentro dos moldes prismáticos, numa sala climatizada, durante 24 ± 1 horas.



Figura 44 - Provetes de betão nos moldes cúbicos e cilíndricos expostos ao ar livre 16 horas após a sua betonagem.

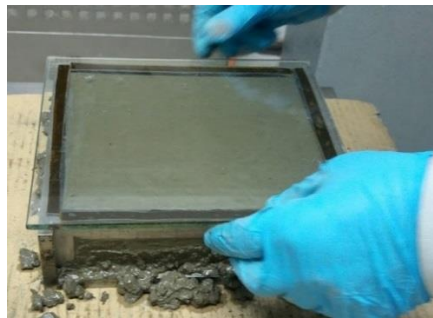


Figura 45 - Colocação da placa de vidro no topo do molde prismático.

Após este período, procedeu-se à desmoldagem dos provetes, conforme retratado na Figura 46. Todos os provetes foram devidamente identificados na face superior, imediatamente antes da desmoldagem, com um marcador específico, à prova de água (Figura 47).



Figura 46 - Desmoldagem dos provetes cúbicos, prismáticos e cilíndricos.



Figura 47 - Identificação dos provetes prismáticos com um marcador.

Os provetes cilíndricos e cúbicos foram colocados em água, à temperatura de 20 ± 2 °C, até ao instante imediatamente antes do ensaio (Figura 48). Os provetes prismáticos devem ser mantidos durante o período de secagem a uma temperatura ambiente de 20 ± 2 °C e uma humidade relativa de $50 \pm 5\%$.



Figura 48 - Colocação dos provetes cúbicos e cilíndricos submersos na água.

3.6.2. Resistência à compressão

Este ensaio tem como objetivo determinar a resistência que o betão em estudo detém quando sujeito a uma tensão de compressão uniforme. Este ensaio determina o valor máximo que o provete consegue resistir medido através do ensaio de rotura à compressão.

Para os diversos tipos de betão, procedeu-se à execução do ensaio de resistência à compressão realizado aos 7, 28 e 56 dias de idade em provetes cúbicos de 150 mm de aresta. São utilizados três provetes cúbicos de cada tipo de betão em cada uma das datas indicadas, sendo no total ensaiados 45 provetes cúbicos. No entanto, como foram realizadas duas amassaduras extraordinárias em dias diferentes, para controlo de qualidade do betão foram utilizados 3 provetes cúbicos em cada amassadura, para serem ensaiados um provete em cada uma das datas pretendidas. Sendo assim, no total foram ensaiados mais 6 provetes cúbicos para além dos previstos inicialmente.

O ensaio de resistência à compressão é realizado de acordo com exposto na NP EN 12390-3 (2009). Primeiramente, no dia do ensaio, retiram-se de dentro de água os provetes que irão ser ensaiados nesse mesmo dia, de forma a conseguir retirar o excesso de humidade da sua superfície antes da realização do ensaio. Posteriormente, os provetes são transportados até à sala do ensaio (Figura 49) e verificam-se as dimensões de cada um dos cubos de modo a verificar a sua planeza, perpendicularidade e linearidade, cumprindo assim os requisitos exigidos na NP EN 12390-1 (2012).



Figura 49 - Transporte dos provetes cúbicos para a sala onde será realizado o ensaio de resistência à compressão.

Em seguida, coloca-se os provetes numa balança e procede-se à sua pesagem registando o valor de cada um dos provetes cúbicos a ensaiar (Figura 50). Para dar início ao ensaio coloca-se o provete devidamente centralizado no prato da máquina de compressão uniaxial apresentada na Figura 51. Aplicou-se uma carga de compressão no provete a uma velocidade constante de 0.6 MPa/s até o provete atingir a rotura. Por fim, registou-se o valor da tensão de rotura (MPa) e da carga máxima suportada pelo provete (kN). Estes valores são adquiridos automaticamente pela máquina de ensaio.



Figura 50 - Pesagem do provete cúbico.



Figura 51 - Máquina de compressão uniaxial utilizada no ensaio de resistência à compressão.

Após a conclusão do ensaio, os provetes são examinados de modo a avaliar o seu tipo de rotura, verificando-se em todos os provetes uma rotura satisfatória.

Na Tabela 11 são apresentados todos os valores da força máxima à rotura, os valores da tensão de rotura obtidos para cada um dos provetes, dos diversos tipos de betão, na realização dos ensaios para as diversas datas de ensaio (7, 28, 56 dias). O valor médio das tensões de rotura foi obtido através da média aritmética das diferentes tensões de rotura obtidas nos três provetes ensaiados.

Tabela 11 - Registo do peso e da força dos provetes, de todos os tipos de betão, ensaiados à resistência à compressão nas diversas idades

Resistência à compressão						
Tipo de betão	Provetes Cúbicos	Idade do provete	Peso (g)	Força máxima aplicada (kN)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)
Betomix (0.0 h)	1	7	8530	822.4	36.55	36.32
	2		8485	789.8	35.10	
	3		8410	839.8	37.30	
	4	28	8440	1125.3	50.00	49.53
	5		8485	1092.5	48.60	
	6		8475	1124.4	50.00	
	7	56	8480	1282.4	57.00	57.17
	8		8535	1292.2	57.40	
	9		8530	1284.6	57.10	
Betomix (1.5 h)	1	7	8290	670.8	29.80	29.88
	2		8350	668.7	29.72	
	3		8330	677.5	30.11	
	4	28	8315	947.3	42.10	42.13
	5		8355	948.9	42.20	
	6		8375	948.1	42.10	
	7	56	8370	1094.0	48.60	48.80
	8		8390	1088.6	48.40	
	9		8355	1110.9	49.40	
Betomix (3.0 h)	1	7	8330	566.2	25.16	25.15
	2		8295	555.8	24.70	
	3		8290	575.8	25.59	
	4	28	8350	824.4	36.60	36.67
	5		8360	829.8	36.90	
	6		8320	821.7	36.50	
	7	56	8330	972.2	43.20	43.17
	8		8365	963.8	42.80	
	9		8360	979.6	43.50	
Betomix (4.5 h)	1	7	8245	488.6	21.72	21.81
	2		8260	493.9	21.95	

Resistência à compressão								
Tipo de betão	Provetes Cúbicos	Idade do provete	Peso (g)	Força máxima aplicada (kN)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)		
Betão C30/37	3	28	8260	489.9	21.77	32.10		
	4		8375	728.6	32.40			
	5		8320	717.0	31.90			
	6	56	8285	719.3	32.00			
	7		8270	844.8	37.50			
	8		8310	851.1	37.80			
	9	8280	854.0	38.00				
	Betão C30/37	1	7	8365	557.6		24.80	24.93
		2		8365	557.2		24.80	
3		8370		567.3	25.20			
4		28	8385	828.4	36.80			
5			8390	824.0	36.60			
6			8375	818.3	36.40			
7		56	8418	924.7	41.10			
8			8460	978.2	43.48			
9			8440	966.2	42.94			
Betão repetição C30/37	1	7	8300	662.2	29.40	29.83		
	2		8305	679.5	30.20			
	3		8305	672.1	29.90			
	4	28	8330	961.6	42.70			
	5		8360	949.6	42.20			
	6		8335	960.7	42.70			
	7	56	8395	1112.1	49.40			
	8		8315	1077.7	47.90			
	9		8325	1091.0	48.50			

É de salientar que, após a realização do ensaio de resistência à compressão, nos provetes referentes ao betão C30/37 com idade aos 7 dias, concluiu-se que este não obteve a resistência que normalmente é alcançada nesta idade na fabricação deste betão nos Cimentos Madeira. Desta forma este betão não irá atingir a resistência necessária na idade especificada

Sendo assim, de forma a confirmar esta observação, procedeu-se à realização deste ensaio, nos provetes referentes ao betão C30/37 com idade aos 28 dias, e observa-se na Tabela 11 que o valor da resistência deste betão, não é satisfatório porque efetivamente não corresponde à resistência especificada.

Deste modo, de forma a conseguir uma maior aproximação à realidade, repetiu-se a produção deste betão para assim poder haver uma comparação entre o betão pronto convencional e o novo tipo de betão Betomix. Na nova execução do betão C30/37, realizada a 18 de janeiro de 2017, repetiram-se todos os passos anteriormente descritos para a primeira amassadura do betão C30/37, incluindo a repetição dos provetes prismáticos para o ensaio de retração. Pelo exposto,

para efeitos de análise de resultados, apenas irão ser utilizados os dados referentes à nova amassadura do betão pronto C30/37, anulando-se todos os que se referiam à primeira amassadura deste tipo de betão.

Por fim, de forma a avaliar a conformidade de cada betão, efetuaram-se cálculos, realizados de acordo com a Equação (2.2) e (2.3), para verificar os dois critérios apresentados na NP EN 206-1 (2007) para a produção inicial (3 resultados de ensaios da resistência à compressão). A conformidade é verificada se forem satisfeitos os dois critérios apresentados tal como referido no capítulo 2.7.1.

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados obtidos na avaliação da conformidade para a produção inicial de todos os betões ensaiados. O valor característico especificado (f_{ck}) para provetes cúbicos, foi de 37 MPa.

Tabela 12 - Verificação dos critérios de conformidade para a resistência à compressão para a produção inicial

Betão	f_{cm} (MPa)	Critério 1:	Critério 2:	Conformidade
		Média dos resultados (f_{cm}) $\geq f_{ck} + 4$	Qualquer resultado individual (f_{ci}) $\geq f_{ck} - 4$	
Betomix (0.0 h)	49.53	Verifica	Verifica	Conforme
Betomix (1.5 h)	42.13	Verifica	Verifica	Conforme
Betomix (3.0 h)	36.67	Não verifica	Verifica	Não conforme
Betomix (4.5 h)	32.1	Não verifica	Não verifica	Não conforme
C30/37	42.53	Verifica	verifica	Conforme

Os resultados mostraram que o betão Betomix (0.0 h), Betomix (1.5 h), e betão pronto C30/37 verificam a conformidade para a resistência à compressão para a produção inicial, mas os betões Betomix (3.0 h) e Betomix (4.5 h) não verificam a conformidade, por não satisfazerem ambos os critérios.

3.6.3. Módulo de elasticidade

Este ensaio foi realizado no Laboratório Regional de Engenharia Civil. Como tal, foi necessário proceder ao transporte dos provetes que se encontravam no processo de cura no Laboratório Cimentos Madeira. Deste modo, na manhã do dia da execução do ensaio do módulo de elasticidade (dia 11-01-2017) retiraram-se os 12 provetes cilíndricos submersos em água com 28 dias de idade, e transportou-se com uma carrinha pertencente aos Cimentos Madeira esses

provetes para o LREC para estes serem ensaiados. No entanto, num dia posterior (dia 15-02-2017) ao transporte destes 12 provetes, tiveram de ser transportados para o LREC mais 3 provetes cilíndricos com 28 dias de idade, provenientes da repetição da amassadura do C30/37, para serem ensaiados nesse dia.

Em dias anteriores ao transporte, verificou-se que dois provetes cilíndricos, do betão pronto C30/37, continham uma das faces ligeiramente danificada (Figura 52).

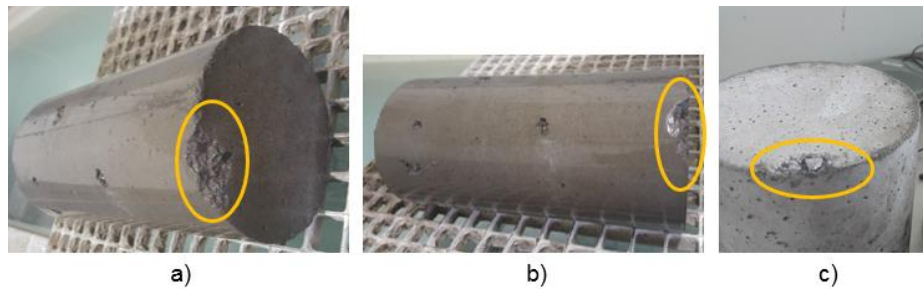


Figura 52 - Provetes ligeiramente danificados, a) dano no primeiro provete - vista frontal, b) dano no primeiro provete - vista lateral, c) dano no segundo provete

Para a retificação das faces destes provetes, utilizou-se uma cola estrutural designada de Sikadur 32N (Figura 54). Esta é uma cola de dois componentes, à base de resinas epóxi, aplicável sobre superfícies de betão endurecido, proporcionando uma ligação perfeita. Desta forma, para moldar o provete, de modo a aplicar a cola com exatidão no local necessário, utilizou-se cartolina e película adesiva, tal como apresentado na Figura 53. Utilizou-se cartolina apenas em um dos provetes, por ter sido verificado que esta, com a aplicação do produto, não era tão firme em comparação com a película adesiva.



Figura 53 - Moldagem dos provetes para aplicação do produto, a) provete moldado com película adesiva, b) provete moldado com cartolina

Iniciou-se a preparação da superfície dos dois provetes cilíndricos, limpando e secando-as. Em seguida, realizou-se a mistura dos dois componentes do produto, de acordo com as indicações fornecidas na embalagem, e adicionou-se ainda outro componente, a areia, com o objetivo de dar consistência e realizar uma aproximação à constituição do betão que compõe o provete. A mistura foi realizada com o auxílio de uma ferramenta mecânica elétrica rotativa, apresentada na Figura 55a, durante três minutos, de forma a obter uma mistura o mais homogênea possível. Posteriormente procedeu-se à aplicação direta do produto (Figura 55b), em seguida utilizou-se uma espátula para retirar o excesso do produto e alisar a superfície (Figura 55c). Por fim, deixou-se

o produto secar, e no dia seguinte retirou-se a cartolina e a película adesiva dos provetes e usou-se uma lixa fina para amaciar e regularizar a superfície dos provetes.



Figura 54 - Cola estrutural - Sikadur 32 N, a) embalagem do produto, b) aparência dos dois componentes constituintes do produto

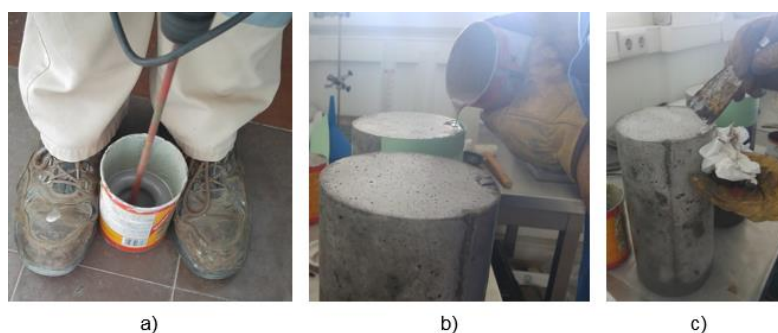


Figura 55 - Preparação para retificação dos provetes, a) ferramenta mecânica rotativa misturando os dois componentes do produto Sikadur 32 N, b) aplicação do produto nos dois provetes, c) remoção do excesso de produto

O ensaio para determinar o módulo de elasticidade é realizado de acordo com a especificação E 397 (1993). O ensaio é efetuado em provetes cilíndricos com dimensões $\varnothing 150 \times 300$ mm que são submetidos a diversos ciclos de carga e descarga. Os provetes cilíndricos são ensaiados aos 28 dias de idade, no entanto no dia do ensaio (11-01-2017) ocorreu um imprevisto, constatou-se a inexistência de um ficheiro no programa de execução deste ensaio, sendo impossível a realização do mesmo. Deste modo, 12 dos provetes cilíndricos foram apenas ensaiados, no dia 13-01-2017, aos 30 dias de idade. Contudo, os 3 provetes relativos ao betão pronto C30/37, por terem sido fabricados numa data posterior, foram ensaiados aos 28 dias de idade no dia 15-02-2017.

Os provetes cilíndricos são posicionados centralmente e ensaiados numa máquina que exerce uma força de compressão (Figura 56). Para a execução do ensaio é necessário utilizar um extensómetro elétrico, com comprimento l de 100 mm, fixo ao provete externamente conforme apresentado na Figura 57. Para fixar este provete de modo a que os seus pontos de fixação externa fiquem a igual distância das faces do provete cilíndrico, é necessário efetuar uma marcação prévia em cada provete de modo a dividi-lo em três partes iguais, cada uma com 100 mm (Figura 58).



Figura 56 - Máquina utilizada para executar o ensaio do módulo de elasticidade

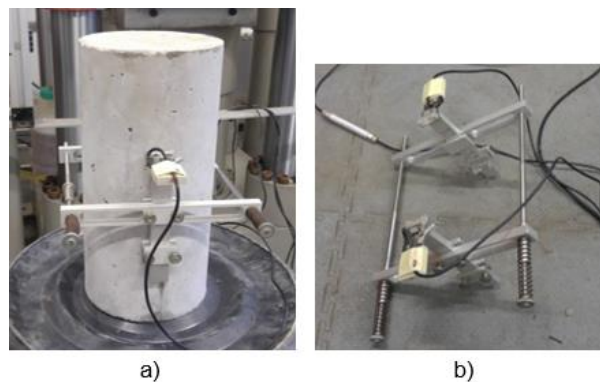


Figura 57 - a) Fixação externa do extensômetro ao provete cilíndrico, b) instrumento de medida – extensômetro elétrico

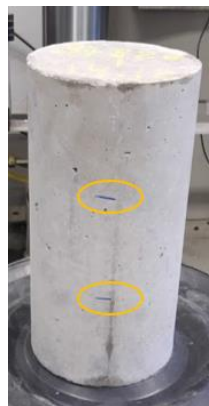


Figura 58 - Marcação do provete cilíndrico para execução do ensaio do módulo de elasticidade

Neste ensaio são efetuados diversos ciclos de carga a uma velocidade constante de 8.83 kN/s. Cada ciclo inicia-se com a aplicação de uma tensão mínima inicial (σ_b) de 0.5 MPa e regista-se o valor da sua deformação (ϵ_b), em seguida aumenta-se a tensão de forma contínua à velocidade estipulada até que se alcance a tensão máxima (σ_a), correspondente a um terço da tensão de resistência à compressão ($\sigma_a = \frac{f_c}{3}$). O valor da tensão máxima foi obtido através da média aritmética dos valores da resistência à compressão de cada um dos 3 provetes cúbicos com 150x150 mm pertencentes à mesma amassadura dos provetes cilíndricos.

A tensão aplicada é mantida constante durante 60 segundos e efetua-se as leituras das deformações (ϵ_{a1}) no espaço de 30 segundos de modo que as leituras estejam finalizadas em 90 segundos. A Figura 59 evidencia o painel da máquina utilizada na medição das leituras.



Figura 59 - Máquina utilizada na leitura das deformações

Seguidamente ao registo das leituras, efetua-se uma verificação necessária para confirmar a centralização do provete na máquina de ensaio, para tal as extensões ($\epsilon_{a1} - \epsilon_b$) não devem diferir em mais de 10%. Se esta condição não se verificar é necessário retirar a carga e centrar de novo o provete (Figura 60).



Figura 60 - Centralização do provete na máquina de ensaio

Após a avaliação desta condição, a carga é reduzida à mesma velocidade de 8.83 kN/s, até que se alcance novamente a tensão mínima (σ_b) de 0.5 MPa.

Destaca-se que todo este processo anteriormente descrito corresponde apenas a um ciclo. No entanto, neste ensaio, tal como referido anteriormente, repetem-se os ciclos de carga até que a diferença de variação da extensão ($\epsilon_a - \epsilon_b$) entre dois ciclos consecutivos não ultrapasse 1×10^{-5} . O cálculo do módulo de elasticidade (E_c) é conseguido através da expressão (2.15) com base nos valores correspondes ao último ciclo.

É de salientar, que neste ensaio optou-se por não levar os provetes até à rotura, devido a estes terem de ser usados para a execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Na Tabela 13 apresentam-se as tensões iniciais e tensões máximas aplicadas, e os valores dos módulos de elasticidade obtidos no último ciclo de carga para cada um dos provetes ensaiados.

Tabela 13 - Módulos de elasticidade obtidos em cada um dos provetes, tensão mínima e máxima aplicada em cada provete

Módulo de elasticidade						
Betão	Provetes		Tensão aplicada (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)
	Idade (dias)	Provetes cilíndricos	Máxima	Inicial		
Betomix (0.0 h)	30	1	16.51	0.50	28.79	29.36
		2			30.44	
		3			28.85	
Betomix (1.5 h)	30	1	14.04	0.50	27.03	26.52
		2			26.55	
		3			25.99	
Betomix (3.0 h)	30	1	12.22	0.50	25.10	24.78
		2			24.32	
		3			24.94	
Betomix (4.5 h)	30	1	10.70	0.50	25.50	25.66
		2			25.19	
		3			26.29	
Repetição do C30/37	28	1	14.18	0.50	30.20	29.52
		2			28.44	
		3			29.93	

3.6.4. Resistência à tração

Um dos mecanismos para a caracterização do betão em relação ao seu comportamento à tração, consiste em submeter provetes cilíndricos ao ensaio de resistência à tração por compressão de provetes. Este ensaio é realizado de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011).

Para proceder à realização deste ensaio, usaram-se os mesmos provetes cilíndricos utilizados no ensaio do módulo de elasticidade com dimensões $\approx 150 \times 300$ mm. Como os provetes utilizados são os mesmos, é necessário executar primeiro o ensaio do módulo de elasticidade sem levar os provetes à rotura para posteriormente efetuar este ensaio.

Para os diversos tipos de betão procedeu-se à execução do ensaio de resistência à tração realizado aos 28 dias de idade em provetes cilíndricos. São utilizados três provetes cilíndricos de cada tipo de betão, sendo no total ensaiados 15 provetes. É de salientar que devido a uma falha ocorrida no ensaio do módulo de elasticidade, devido à inexistência de um ficheiro no software, este ensaio teve de ser adiado dois dias, sendo assim 12 provetes referentes ao betão Betomix, foram ensaiados aos 30 dias de idade. De notar que, devido à necessidade da repetição da fabricação do betão pronto C30/37 os três provetes referentes a esta amassadura foram ensaiados aos 28 dias de idade numa data posterior aos do betão Betomix.

O ensaio foi realizado no Laboratório Regional de Engenharia Civil, na máquina apresentada na Figura 61. O provete a ser ensaiado é pesado e colocado na máquina de ensaio numa posição central (Figura 62 e Figura 63), de modo a que este seja solicitado por uma carga concentrada de compressão, a uma velocidade constante, aplicada diametralmente ao longo do seu comprimento, gerando tensões de tração por compressão até o provete atingir a rotura.

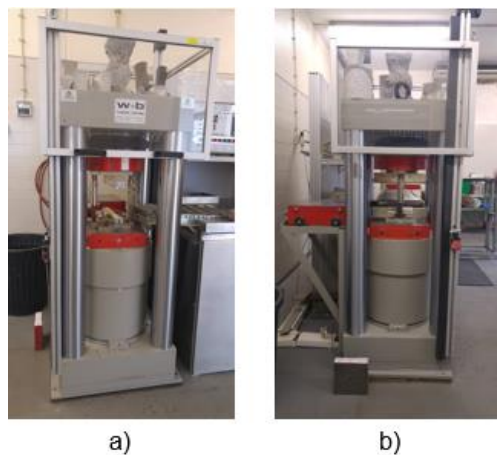


Figura 61 - Máquina utilizada no ensaio de resistência à tração por compressão de provetes. a) vista frontal, b) vista lateral



Figura 62 - Pesagem do provete cilíndrico.

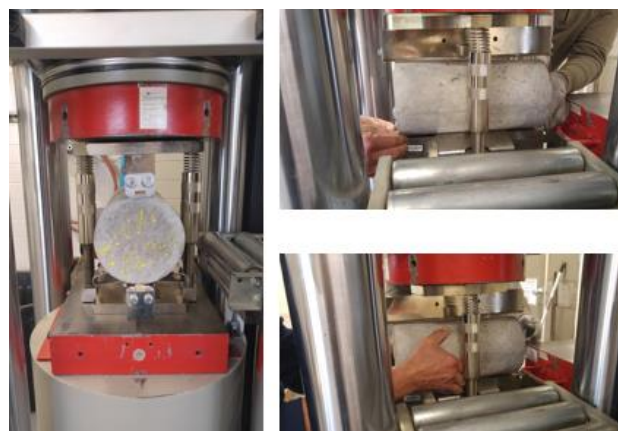


Figura 63 - Posicionamento do provete cilíndrico na máquina de ensaio.

De referir ainda, que foi necessário calcular a velocidade de aplicação da carga através da expressão dada na NP EN 12390-6 (2012):

$$R = \frac{s \times \pi \times L \times d}{2} \quad (3.1)$$

onde,

R é a velocidade de aplicação da carga (N/s);

s é a velocidade de aplicação da tensão (0.5 MPa/s);

L é o comprimento da linha de contacto do provete (300 mm);

d é a dimensão vertical da secção transversal do provete (150 mm).

Sendo assim, a velocidade de aplicação da carga foi de 3.53 kN/s.

Por fim, registou-se o valor da carga máxima que é obtida automaticamente pela máquina de ensaio e examinou-se o provete fraturado e o seu aspeto (Figura 64).



Figura 64 - Rotura do provete cilíndrico após a realização do ensaio de resistência à tração por compressão

Na Tabela 14 apresentam-se os valores médios da tensão de tração (MPa) que foram calculados através da expressão (2.7) com base na carga máxima (F) registada em cada provete no ensaio de resistência à tração por compressão. Os valores médios da resistência à tração por compressão diametral foram obtidos através da média aritmética das diferentes tensões de rotura calculadas para cada um dos provetes ensaiados. Nessa tabela, apresentam-se ainda os valores da tensão de tração (MPa) e da força (kN) obtidos em cada provete ensaiado para os diferentes tipos de betão.

Tabela 14 - Valores obtidos da força máxima no ensaio de resistência à tração e os respetivos valores de tensão obtidos para cada provete ensaiado

Resistência à tração						
Tipo de betão	Idade do provete (dias)	Provetes cilíndricos	Peso (g)	Força (kN)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)
Betomix (0.0 h)	30	1	13069	246.7	3.49	3.72
		2	13094	296.9	4.20	
		3	13127	244.5	3.46	
Betomix (1.5 h)	30	1	12917	269.9	3.82	3.78

Resistência à tração						
Tipo de betão	Idade do provete (dias)	Provetes cilíndricos	Peso (g)	Força (kN)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)
		2	12928	252.4	3.57	
		3	12926	278.7	3.94	
Betomix (3.0 h)	30	1	12956	261.3	3.70	3.60
		2	12942	245.6	3.47	
		3	12961	255.8	3.62	
Betomix (4.5 h)	30	1	12868	253.5	3.59	3.45
		2	12868	233.5	3.30	
		3	12868	244.5	3.46	
Repetição do C30/37	28	1	13147	291.0	4.12	4.05
		2	13147	255.7	3.62	
		3	13147	311.9	4.41	

3.6.5. Retração

Este ensaio é realizado no Laboratório Cimentos Madeira e é executado de acordo com a especificação E 398 (1993). Para a determinação da retração utilizou-se provetes prismáticos com dimensões de 50x50x200 mm³, orquestrados com dois pernos de aço roscados, com 2 cm de comprimento, no centro de cada uma das extremidades do provete (Figura 65). Estes pernos foram introduzidos antes da colocação do betão fresco nos moldes prismáticos.



Figura 65 - Perno utilizado no molde prismático

O ensaio de determinação da retração é realizado através de um equipamento que determina as variações de comprimento dos provetes (comparador de comprimentos). No Laboratório Cimentos Madeira esse equipamento denomina-se de retractómetro analógico, e é composto por um suporte de aço (Figura 66a). O retractómetro analógico está graduado em milésimas de milímetro. Este aparelho contém duas concavidades, uma no retractómetro e outra no suporte de aço, para possibilitar a colocação dos pernos que estão inseridos nos provetes.

Para efetuar as leituras dos comprimentos, primeiramente ajustou-se o retractómetro, numa posição *standard*, de modo a medir todos os provetes sem ter de alterar essa posição. Em seguida, limpam-se as concavidades com um papel e introduz-se uma barra vertical comparadora no retractómetro com o auxílio de duas esferas, de forma a verificar se o aparelho encontra-se na posição inicialmente estabelecida. A Figura 66b evidencia o aparelho com a barra vertical comparadora introduzida.

Posteriormente introduz-se o provete a ensaiar no retractómetro, de forma que os pernos inseridos nas extremidades do provete assentem na concavidade existente no retractómetro e no suporte de aço (Figura 66c). É de salientar que, para uma leitura mais precisa deve-se rodar o provete lateralmente até o ponteiro do retractómetro estabilizar, e de seguida regista-se o valor obtido no aparelho.

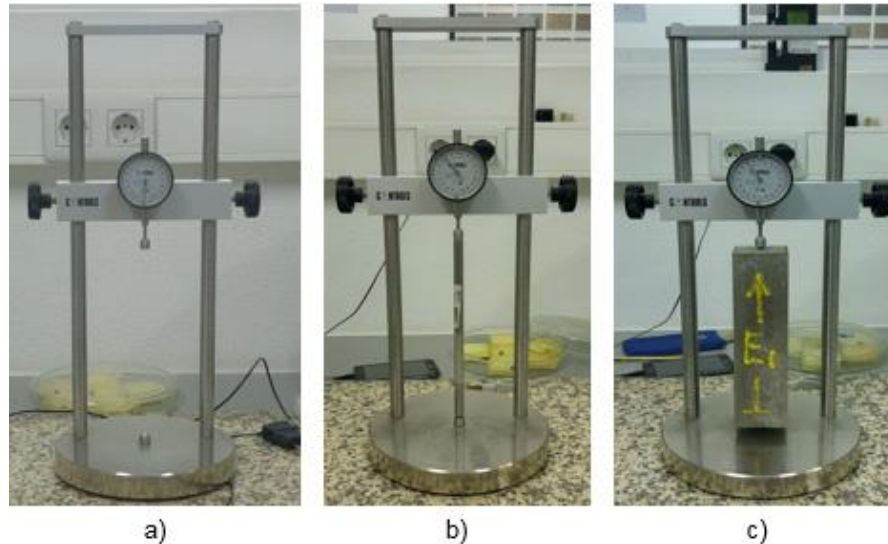


Figura 66 - Execução do ensaio de retração, a) retractómetro analógico com suporte de aço, b) introdução da barra vertical comparadora no retractómetro, c) introdução do provete no retractómetro para leitura

De referir ainda, que todos provetes possuem uma seta que funciona como referência, para assinalar a posição de leitura dos provetes, de modo que a extremidade indicada pela seta fique sempre voltada para cima sempre que se efetua leituras no retractómetro.

É importante deixar claro que os provetes prismáticos, durante a secagem, devem ser mantidos a uma temperatura ambiente de 20 ± 2 °C e uma humidade relativa de $50 \pm 5\%$, cujo controlo é realizado por um aparelho denominado de termo-higrómetro (Figura 67). No entanto, surgiu um imprevisto, não tendo sido possível conservar essa humidade relativa ao longo de todo o período de secagem. Contudo, realizaram-se diversas tentativas de aproximação à humidade relativa pretendida, que foram as seguintes:

- procedeu-se à colocação dos provetes prismáticos num recipiente fechado (Figura 68);
- colocou-se os provetes prismáticos num recipiente fechado, na presença de sílica de gel;
- transferiu-se os provetes prismáticos para três salas diferentes com ar condicionado (Figura 69);
- colocou-se os provetes prismáticos numa das salas e desligou-se o ar condicionado.

No entanto, verificou-se que nenhuma destas tentativas foi completamente eficaz.



Figura 67 - Aparelho que mede a temperatura e humidade relativa



Figura 68 - Período de secagem dos provetes prismáticos num recipiente fechado

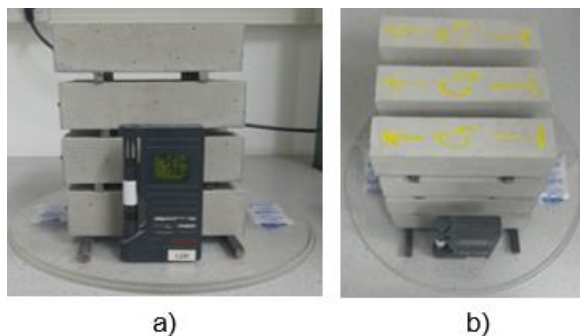


Figura 69 - Período de secagem dos provetes numa das salas, a) vista lateral, b) vista frontal

Relativamente às datas de ensaio, as primeiras medições iniciaram-se logo após a desmoldagem dos provetes, as restantes foram realizadas diariamente até aos 8 dias, sendo estas reduzidas gradualmente até leituras de 8 em 8 dias a partir de sensivelmente metade do período temporal de leitura, que são 90 dias. No anexo C, apresentam-se as datas e as leituras efetuadas dos diversos betões em estudo.

É de salientar que, foram ensaiados três provetes de cada amassadura de betão, perfazendo no total 12 provetes.

4. Apresentação e análise dos resultados obtidos

Após a realização dos ensaios laboratoriais, foi possível proceder ao cálculo, para os diferentes tipos de betão, da resistência à compressão nos provetes cúbicos (aos 7, 28 e 56 dias), da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de elasticidade nos provetes cilíndricos (aos 28 dias), e da retração nos provetes prismáticos (nas idades selecionadas). Neste capítulo analisam-se os resultados obtidos, abordando as relações da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e da retração, entre as diversas amassaduras de betão Betomix, em função do tempo e em função da quantidade de água adicionada na preparação destes betões, para cada data de ensaio especificada. Posteriormente, apresenta-se uma análise comparativa entre o betão pré-misturado Betomix com o betão pronto C30/37 convencional.

4.1. Resistência à compressão

Conforme descrito acima, a resistência à compressão dos betões produzidos foi avaliada através de ensaios, realizados segundo a NP EN 12390-3 (2011), com recurso a três provetes cúbicos, com 150 mm de lado, de cada betão. Para cada amassadura avaliou-se a resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias.

Os resultados individuais da resistência à compressão dos betões Betomix (0.0 h), Betomix (1.5 h), Betomix (3.0 h) e Betomix (4.5 h) são apresentados na Figura 70. Nessa figura apresentam-se também as curvas de tendência, à qual correspondem os coeficientes de determinação (R^2) exibidos.

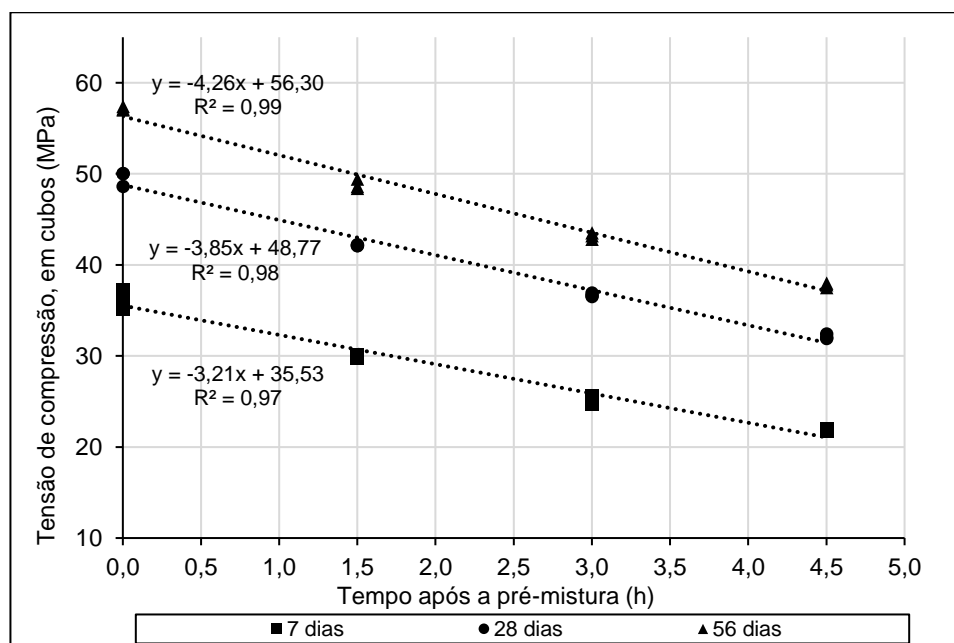


Figura 70 - Variação da resistência à compressão do Betomix com o tempo decorrido desde a execução da pré-mistura, para as diferentes datas de ensaio (7, 28 e 56 dias)

Como se pode observar na Figura 70, a resistência à compressão aumentou ao longo da idade, tal como era esperado, observando-se uma evolução maior até aos 28 dias de idade. A resistência continuou a evoluir, embora a um ritmo inferior, atingindo valores de resistência à compressão superiores aos 56 dias de idade. Isto deve-se ao facto de, com o tempo, a quantidade de cimento por hidratar ser cada vez menor, sendo este efeito mais evidente com uma relação a/c maior.

É de referir ainda que, em cada um dos provetes, nas diversas datas de ensaio (7, 28 e 56 dias), existe uma diminuição da resistência à compressão com o aumento do tempo entre a realização da pré-mistura e o início da realização da amassadura, como também seria de esperar.

No entanto, o Betomix (3.0 h), representando o tempo até ao qual o produtor garante as características pretendidas no betão, apresenta uma resistência média à compressão, aos 28 dias de idade, de 37 MPa, encontrando-se no limite da resistência estabelecida. Por outro lado, o Betomix (4.5 h), aos 28 dias de idade, apresenta uma resistência média à compressão inferior à estabelecida, de 32 MPa. Deste modo confirma-se que, a partir das três horas de tempo após a realização da pré-mistura, o Betomix não deve ser utilizado porque as suas características não estão garantidas.

É importante deixar claro que a diminuição da resistência ao longo do tempo deve-se, em primeiro lugar, à necessidade do aumento da quantidade de água na mistura, devida à diminuição da trabalhabilidade da amassadura, provocada pelos produtos de hidratação do cimento, que ocorrem desde início, devido à presença da água contida nos agregados. O incremento da quantidade de água no betão leva a um aumento da porosidade, influenciando a sua resistência à compressão, diminuindo-a.

Na Figura 71, apresentam-se os valores médios da resistência à compressão obtidos através dos ensaios realizados para as várias amassaduras de Betomix com idade 7 e 56 dias. Nessa mesma figura, são ainda representados os valores médios da resistência à compressão aos 7 e 56 dias estimados de acordo com a NP EN 1992-1-1 (2010), através das expressões (4.1) e (4.2). Estas expressões estimam a resistência média à compressão em função do tempo. Assim, de forma a verificar se as estimativas obtidas aproximam-se dos resultados verificados para o Betomix, calcularam-se as resistências médias aos 7 e 56 dias, em função dos valores da resistência à compressão para os 28 dias obtidos nos ensaios realizados.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad (4.1)$$

onde,

- $f_{cm}(t)$ é a tensão média de rotura do betão à compressão à idade de t dias;
- f_{cm} é a tensão média de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade;
- $\beta_{cc}(t)$ é um coeficiente que depende da idade do betão (t);
- t é a idade do betão, em dias.

com

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (4.2)$$

onde,

s é um coeficiente que depende do tipo de cimento, assumindo valores de:

0.20 para cimentos das classes de resistência CEM 42.5 R, CEM 52.2 N e CEM 52.5 R;

0.25 para cimentos das classes de resistência CEM 32.5 R, CEM 42.5 N;

0.38 para cimentos das classes de resistência CEM 32.5 N.

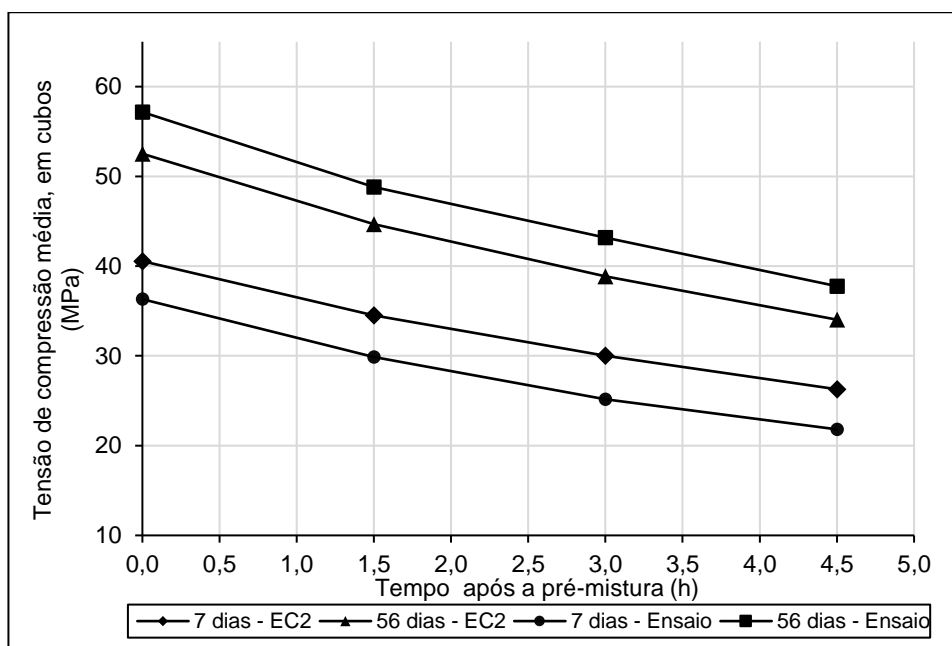


Figura 71 - Evolução da resistência média à compressão dos diversos betões, Betomix, com idades 7 e 56 dias, obtida de dois modos distintos: Eurocódigo 2, e ensaios realizados

Analisando a Figura 71, observa-se uma diferença significativa, para todos os betões Betomix, em relação ao valor da tensão de rotura à compressão calculado segundo a NP EN 1992-1-1 (2010). De maneira mais detalhada, pode dizer-se que os resultados da resistência média à compressão, de todos os provetes cúbicos, provenientes do betão pré-misturado Betomix, com idade de 7 dias, são sobrestimados quando determinados através da NP EN 1992-1-1 (2010). Por outro lado, os resultados da resistência média à compressão dos betões pré-misturados Betomix, com 56 dias de idade, são cerca de 4 MPa superiores aos valores estimados segundo a NP EN 1992-1-1 (2010).

Deste modo, os resultados mostraram que, embora a NP EN 1992-1-1 (2010) refira que para betões normais, a uma temperatura média de 20 °C e uma cura de acordo com a NP EN 12390-2 (2009), é possível estimar a tensão de rotura do betão à compressão numa idade t, através da resistência à compressão média aos 28 dias de idade, os valores indicados não se adequam ao

betão pré-misturado Betomix. Deste modo, para respeitar as expressões preconizadas pela NP EN 1992-1-1 (2010), de acordo com os valores experimentais obtidos, os valores da tensão de rotura à compressão indicados pela norma, deveriam ser diminuídos em cerca de 5 MPa para os betões com 7 dias de idade, enquanto para os 56 dias de idade, os valores deveriam ser aumentados em cerca de 4 MPa.

Por último, para uma análise mais pormenorizada, efetua-se uma análise comparativa entre o comportamento do betão Betomix e do betão pronto C30/37 de modo a averiguar se estes são semelhantes. Assim, através da análise dos valores médios obtidos nos ensaios, dos dois betões, o Betomix e o C30/37, verifica-se que existe um aumento da resistência à compressão ao longo da idade tanto para o Betomix como para o betão pronto C30/37. No entanto, observa-se resistências à compressão mais elevadas para o Betomix (0.0 h), comparativamente com o betão C30/37 que apresentou valores médios de 42.5 MPa. Esta diferença em cerca de 16% pode dever-se ao facto do betão Betomix (0.0 h) apresentar uma razão a/c ligeiramente inferior à do betão C30/37.

Por outro lado, observa-se que as resistências médias à compressão do Betomix (1.5 h) são muito semelhantes em todas as idades estudadas (7, 28 e 56 dias), às obtidas no betão C30/37. Contudo, nos restantes Betomix (3.0 h) e (4.5 h) nota-se que os valores médios de resistência à compressão obtidos no betão C30/37 são nitidamente superiores. Esta diferença pode dever-se ao facto de ter sido necessário adicionar uma quantidade de água superior, para manter níveis semelhantes de trabalhabilidade, conforme aumentou o tempo após a pré-mistura.

De referir ainda, que é natural que o Betomix (0.0 h) tenha apresentado uma resistência superior, já que era esperado que o Betomix (3.0 h) tivesse ainda características próximas do betão C30/37. Dado que, a única forma de o obter é ter um betão com melhor qualidade do que o betão de referência às 0.0 h.

Por fim, os resultados mostraram que existe uma redução significativa da resistência no Betomix, passada uma hora e meia de tempo após a execução da pré-mistura, em comparação com os valores de resistência obtidos no betão C30/37.

4.2. Quantidade de água adicionada

Tal como referido anteriormente, em cada amassadura de Betomix, com o passar do tempo após a realização da pré-mistura, foi adicionada uma determinada quantidade de água em função de um determinado abaixamento desejado para conseguir uma boa trabalhabilidade. Deste modo, a quantidade de água adicionada foi definida com base em sensibilidade visual até a obtenção de uma consistência apropriada. De referir ainda que não foi possível obter um abaixamento constante, como se poderia esperar, dados os naturais erros do ensaio e a variabilidade de um material como o betão. Portanto, foram reproduzidas as condições que são expectáveis em obra.

Na Figura 72 estão representadas as diversas quantidades de água totais adicionadas em cada uma das amassaduras Betomix, assim como os respectivos valores de abaixamento obtidos para cada betão.

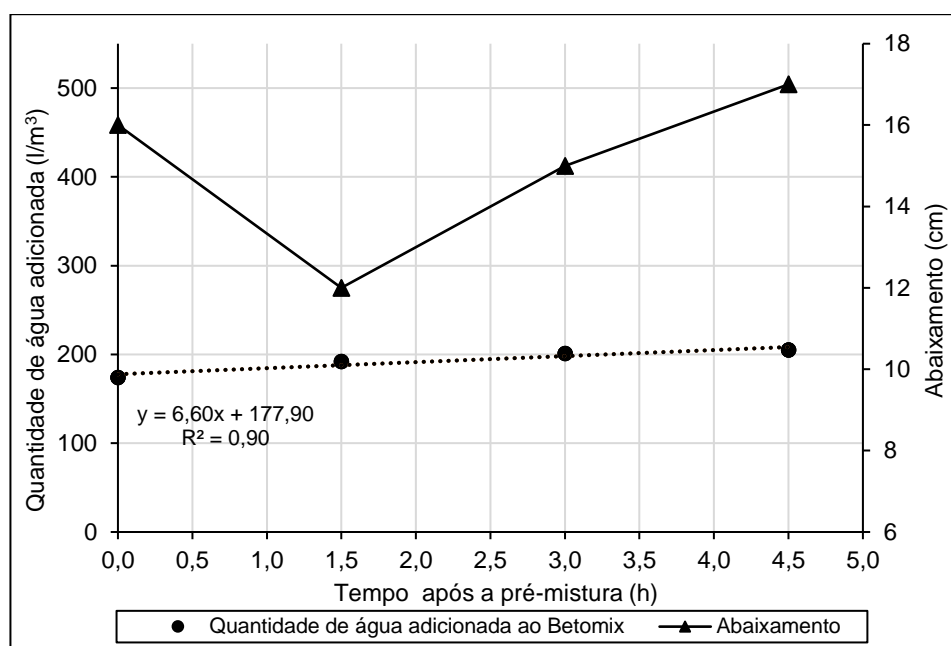


Figura 72 - Quantidade total de água adicionada em cada amassadura dos Betomix em estudo

Analisando a Figura 72, observa-se uma tendência crescente praticamente linear ($r=0.95$) da quantidade de água em função do tempo após a pré-mistura. Por outro lado, observa-se, como referido acima, que os valores de abaixamento não são constantes, apresentando um ponto discrepante em relação aos outros. Esse ponto corresponde ao Betomix (1.5 h) e apresenta um valor de abaixamento de 12 cm. Deste modo, constata-se que talvez devesse ter sido adicionada uma quantidade de água ligeiramente superior neste betão, para se obter o mesmo abaixamento que nos restantes betões. Relativamente aos restantes betões, esses apresentam valores de abaixamento mais próximos entre si, pelo que se deduz que a quantidade de água adicionada esteja dentro dos limites aceitáveis. No geral, e dado que se tratam de valores de abaixamentos de betão, tendo sido definido o valor objetivo de 15 cm, a obtenção de um valor máximo de 17 cm e de um valor mínimo de 12 cm é considerada adequada às condições naturais de uma obra, não comprometendo os objetivos traçados.

De referir ainda que, ao realizar uma análise comparativa entre a quantidade de água presente na amassadura do betão pronto C30/37, de valor 173 l/m³, e a quantidade de água adicionada ao Betomix, verifica-se que no Betomix (0.0 h) adicionaram-se quantidades muito semelhantes, pois neste Betomix ainda não se tinha verificado o efeito do tempo após a pré-mistura, nem a perda de trabalhabilidade. Por outro lado, no Betomix (3.0 h), cujo betão corresponde ao tempo máximo recomendado pelo produtor, utilizou-se uma quantidade de água muito superior comparativamente à utilizada no C30/37, para ser possível alcançar a trabalhabilidade desejada.

Deste modo, os resultados mostraram que é possível estimar uma equação que estipule a quantidade de água que deve ser adicionada em função do tempo após a pré-mistura, embora a

quantidade de água adicionada num dos Betomix provavelmente devesse ter sido ligeiramente superior. Deste modo, para os betões que foram ensaiados, nas condições que são representativas de uma realidade cuidada em obra, com os respetivos erros e as diversas variabilidades passíveis de ocorrerem, admite-se uma equação simples para ser aplicada em obra (equação (4.3)) na estimativa da quantidade de água a ser adicionada em função do tempo após a pré-mistura. De notar que esta equação é um primeiro resultado, de acordo com os ensaios experimentais realizados, devendo ser realizados mais ensaios experimentais que permitam justificar melhor a equação apresentada.

$$q = 6.60 t + 177.90 \quad (4.3)$$

onde,

q é a quantidade total de água adicionada na mistura de betão (l/m^3);

t é o tempo após a execução da pré-mistura (h).

4.3. Resistência à tração

Conforme descrito em 3.6.4, a resistência à tração dos betões produzidos, foi avaliada através de ensaios, realizados segundo a NP EN 12390-6 (2011), com recurso a três provetes cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de cada betão. Neste ensaio, utilizaram-se os mesmos provetes do ensaio do módulo de elasticidade. Para cada amassadura, avaliou-se a resistência à tração por compressão diametral aos 30 dias, em vez dos 28 dias previstos, devido a um atraso provocado por um problema técnico ocorrido no laboratório.

No entanto, de forma a realizar uma análise aos 28 dias, utilizou-se a expressão (4.4), preconizada na NP EN 1992-1-1 (2010), que estima a resistência à tração nas várias idades, $f_{ctm}(t)$, tal como acontece para a resistência à compressão, com recurso ao coeficiente de endurecimento exposto na expressão (4.2).

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t)^\alpha \times f_{ctm} \quad (4.4)$$

onde,

$f_{ctm}(t)$ é o valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples na idade t dias;

f_{ctm} é o valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples aos 28 dias;

α = 1 para $t < 28$; = 2/3 para $t \geq 28$.

Os resultados individuais da resistência à tração por compressão diametral dos betões Betomix (0.0 h), Betomix (1.5 h), Betomix (3.0 h) e Betomix (4.5 h) são apresentados no gráfico da Figura 73. Nesta figura, apresenta-se também uma curva de tendência, à qual corresponde o coeficiente de determinação (R^2) exibido.

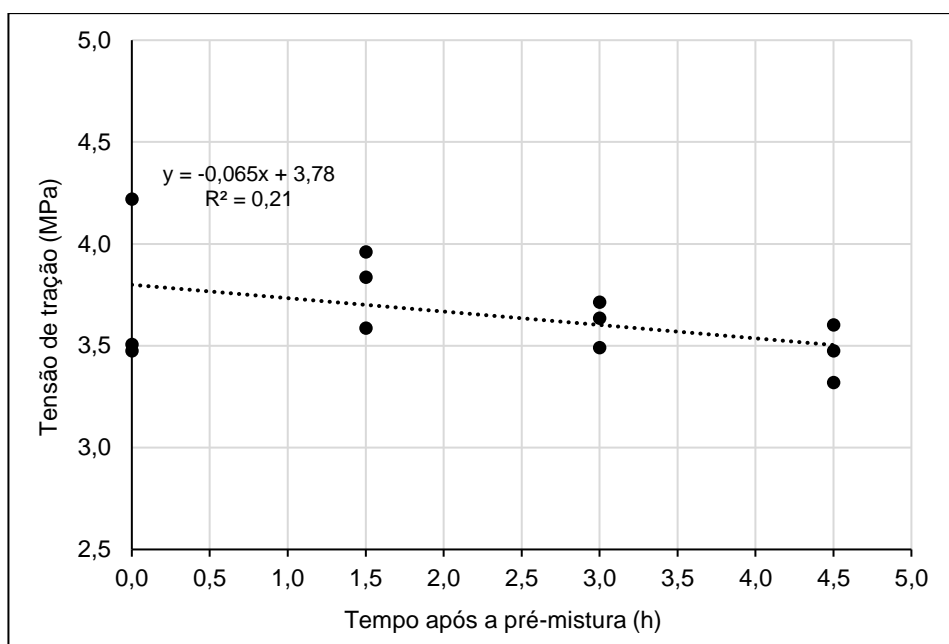


Figura 73 - Variação da resistência à tração por compressão diametral do Betomix com o tempo após a pré-mistura, aos 28 dias de idade

Através da análise da Figura 73, verifica-se que a relação entre os valores médios de resistência à tração, obtidos nos diversos betões, com os diferentes tempos após a pré-mistura, é aproximadamente linear, embora com um coeficiente de correlação moderado ($r=-0.46$), devido à existência de alguma variação dos resultados obtidos, assim como a baixa variação dos valores médios ao longo do tempo após a pré-mistura. Observa-se que no Betomix (0.0 h) o valor da resistência à tração aos 28 dias ronda os 3.7 MPa, embora exista um ponto discrepante num dos provetes, com valor de 4.2 MPa. O Betomix (4.5 h) apresenta o valor mais baixo de resistência à tração, cujo valor ronda os 3.5 MPa, deste modo sendo uma diferença pequena, a linha de tendência linear para a resistência à tração no Betomix é praticamente horizontal.

Assim, semelhantemente à resistência à compressão, observaram-se reduções de resistência à tração à medida que se aumentou o tempo após a pré-mistura. O facto de ter sido adicionada mais água conforme aumentou o tempo após a pré-mistura, parece ter afetado também a resistência à tração do betão, embora de forma menos evidente.

De referir ainda, que ao realizar uma análise comparativa entre a resistência à tração no betão pronto C30/37, cujo valor médio de resistência à tração alcançado foi de 4.1 MPa, e a resistência à tração obtida no Betomix, verifica-se que nos diversos tempos analisados após a pré-mistura obtiveram-se valores médios de resistência à tração ligeiramente inferiores. Relativamente ao Betomix (1.5 h), o betão expectavelmente mais próximo, em termos de comportamento, do C30/37, obteve-se um valor médio de resistência à tração inferior, embora com uma diferença relativamente pequena, razão pela qual não é possível tirar conclusões.

Na Figura 74 apresentam-se os valores médios da resistência à tração aos 28 dias, obtidos através dos ensaios, em função dos valores médios da resistência à compressão de cada Betomix. Nessa mesma figura são ainda representados os valores médios da resistência à tração aos 28

dias, estimados de acordo com a NP EN 1992-1-1 (2010) através das expressões (4.5) e (4.6). Estas expressões estimam a resistência média à tração em função da resistência média à compressão obtida através dos ensaios, assim, é possível verificar se as expressões preconizadas pela NP EN 1992-1-1 (2010) aplicam-se ao betão Betomix.

$$f_{ctm} = 0.30 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (4.5)$$

onde,

f_{ctm} é a tensão média de rotura do betão à tração simples;

f_{ck} é a tensão característica de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade;

com

$$f_{ck} = f_{cm} + 8 \quad (4.6)$$

onde,

f_{cm} é a tensão média de rotura do betão à compressão, obtida nos ensaios realizados.

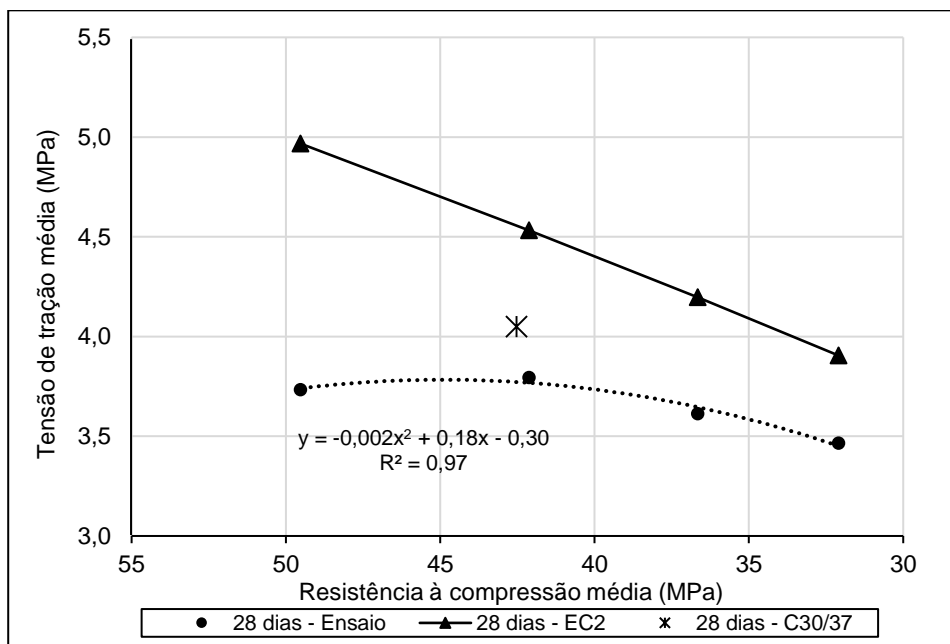


Figura 74 - Evolução da resistência média à tração aos 28 dias dos diversos betões, Betomix, com a resistência média à compressão, obtida de dois modos distintos: Eurocódigo 2, e ensaios realizados.

Analisando a Figura 74, observa-se que, como habitualmente, os valores de resistência à tração do betão obtidos a partir dos ensaios têm tendência a diminuir conforme ocorre uma redução da resistência à compressão do betão. No entanto, a linha de tendência que relaciona os valores de resistência à tração obtidos nos ensaios e a resistência à compressão não é linear. Verifica-se também que a variação da resistência à tração do betão com o decréscimo da resistência à compressão, conforme esperado, é notada, sendo influenciada pela resistência à compressão do

betão. No entanto, no Betomix (0.0 h), seria esperado um maior valor de resistência à tração devido ao seu valor de resistência à compressão ser o mais elevado.

Nessa figura, observa-se também que o valor de resistência média à tração do betão pronto C30/37, para o qual se obteve uma resistência média à compressão de 42 MPa, é superior ao do betão Betomix (1.5 h) que apresenta praticamente a mesma resistência média à compressão. Esta diferença pode indicar que a resistência média à tração do material Betomix relaciona-se com a resistência média à compressão de forma distinta comparativamente com o betão pronto C30/37.

De referir ainda que, através da análise da Figura 74, observa-se uma diferença significativa, para todos os betões Betomix, em relação ao valor da tensão de rotura à tração calculado segundo a NP EN 1992-1-1 (2010). De maneira mais detalhada, pode dizer-se que, os resultados da resistência média à tração, de todos os provetes cilíndricos, provenientes do betão pré-misturado Betomix, com idade aos 28 dias, são inferiores aos estimados, com diferenças que variam entre cerca de 0.5 MPa e cerca de 1.0 MPa. Para além disso, através da análise da mesma figura, verifica-se que, de forma semelhante ao que acontece, em geral, com os valores de resistência à tração obtidos nos ensaios, os valores estimados a partir da NP EN 1992-1-1 (2010), apresentam uma evolução crescente da resistência média à tração em função do aumento da resistência média à compressão, apesar dessa evolução ocorrer de forma distinta.

Deste modo, os resultados mostram que os valores indicados pela NP EN 1992-1-1 (2010) não se adequam ao Betomix. Observando a figura anterior, conclui-se que os resultados obtidos nos ensaios do betão Betomix, não evoluem da mesma forma.

4.4. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi obtido conforme descrito acima, e foi avaliado através de ensaios experimentais, realizados segundo a especificação E 397 (1993), com recurso a três provetes cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de cada betão. Para cada amassadura, avaliou-se o módulo de elasticidade aos 30 dias, em vez dos 28 dias, devido aos motivos anteriormente explicados.

No entanto, de forma a realizar uma análise aos 28 dias, utilizou-se a expressão (4.7), preconizada na NP EN 1992-1-1 (2010), que estima o módulo de elasticidade nas várias idades, $E_{cm}(t)$:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0.3} \times E_{cm} \quad (4.7)$$

onde,

- $E_{cm}(t)$ é o módulo de elasticidade na idade t dias;
- E_{cm} é o módulo de elasticidade aos 28 dias de idade;
- $f_{cm}(t)$ é a resistência média à compressão na idade t dias;

f_{cm} é a resistência média à compressão aos 28 dias

A Figura 75 apresenta os resultados do módulo de elasticidade obtidos em todos os provetes dos betões Betomix em estudo, assim como as quantidades totais de água adicionada em cada uma das amassaduras de Betomix.

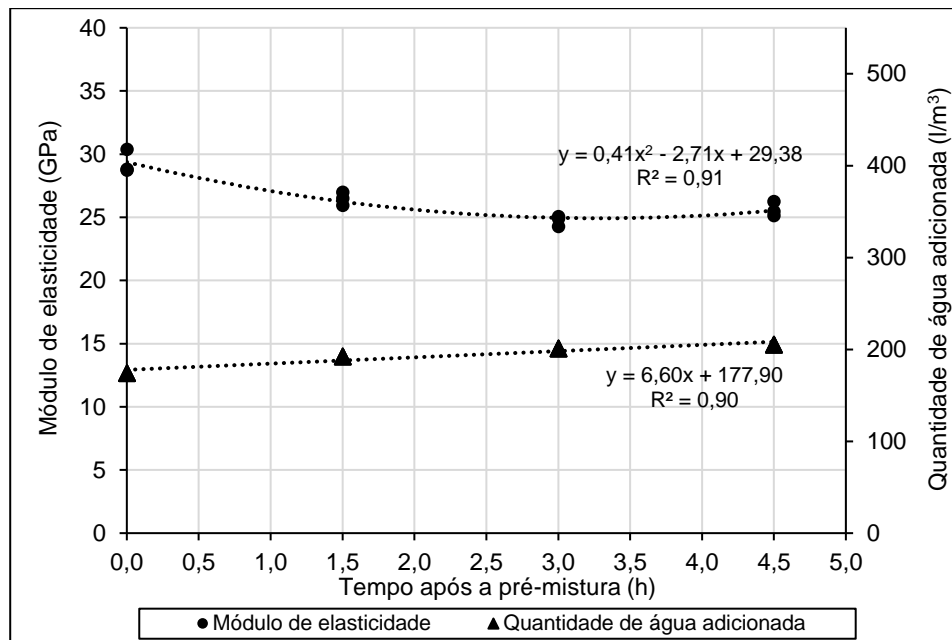


Figura 75 - Módulo de elasticidade dos betões Betomix aos 28 dias

Através da análise da Figura 75, constata-se que o Betomix (0.0 h) apresentou um valor médio aos 28 dias, de 29 GPa, o Betomix (1.5 h) apresentou um valor médio de 26 GPa, o Betomix (3.0 h) exibiu um valor médio de 24 GPa e o Betomix (4.5 h), de 25 GPa. Assim, observa-se uma tendência para a diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do tempo após a pré-mistura e com o aumento da quantidade total de água adicionada no betão. No entanto no Betomix (4.5 h) observa-se um aumento do módulo de elasticidade, sendo o seu valor ligeiramente superior ao do Betomix (3.0 h). Desta forma, seria esperado que no Betomix (4.5 h) resultasse o módulo de elasticidade mais baixo em comparação com os outros betões, visto ter uma maior quantidade de água adicionada, e uma maior razão a/c.

É de salientar ainda que o betão pronto C30/37 apresenta um valor médio do módulo de elasticidade de 29.5 GPa. Assim, verifica-se que este valor é muito próximo do obtido para o Betomix (0.0 h), que foi de 29.3 GPa. Seria esperado, que o valor obtido para o Betomix (0.0 h) fosse maior, dado que este tem uma relação a/c inferior à do betão C30/37, levando a um aumento do módulo de elasticidade. No entanto, os restantes Betomix, apresentam valores de módulo de elasticidade inferiores ao betão C30/37.

Na Figura 76, apresentam-se os valores médios do módulo de elasticidade secante do Betomix, aos 28 dias de idade, calculados segundo a NP EN 1992-1-1 (2010) para betões com agregados de quartzito (referência) e para betões com agregados de basalto. Apresentam-se

ainda, os valores médios do módulo de elasticidade secante do Betomix, obtidos na execução do ensaio, em provetes cilíndricos com 28 dias de idade.

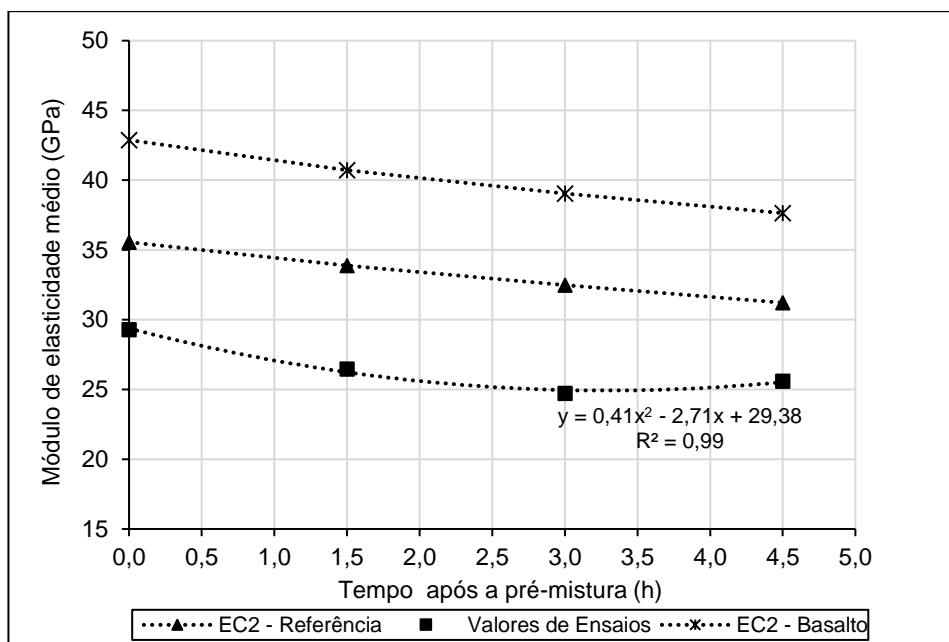


Figura 76 - Evolução do módulo de elasticidade dos diversos betões, Betomix, com idade aos 28 dias, obtida de dois modos distintos: NP EN 1992-1-1 (2010) e ensaios realizados

Como já foi abordado anteriormente, o módulo de elasticidade secante do betão para uma determinada classe de betão, calculado de acordo com a especificação E 397 (1993), relaciona-se com a resistência média à compressão através da equação (2.14). Deste modo, com o intuito de averiguar a coerência de valores obtidos na realização dos ensaios do Betomix, efetua-se uma comparação entre os valores determinados com essa equação, preconizada na NP EN 1992-1-1 (2010), com os valores médios obtidos nos ensaios experimentais. Para além disso, é referido na NP EN 1992-1-1 (2010) que o valor médio do módulo de elasticidade secante do betão deve ser aumentando em 20% para betões com agregados basálticos.

Desta forma, através da análise da Figura 76, observa-se uma diferença significativa, para todos os betões Betomix, em relação ao valor de referência calculado segundo a NP EN 1992-1-1 (2010) do módulo de elasticidade obtido. Pode dizer-se que os resultados do módulo de elasticidade, de todos os provetes cilíndricos, provenientes do betão pré-misturado Betomix, são significativamente inferiores aos definidos na NP EN 1992-1-1 (2010). Os resultados mostraram que, embora a NP EN 1992-1-1 (2010) refira que para betões normais é possível determinar o módulo de elasticidade através da resistência à compressão média, os valores indicados pela norma não se adequam ao betão pré-misturado Betomix. Observa-se que, em vez de aumentados 20%, estes deveriam ser diminuídos em cerca de 20%, em média, relativamente ao valor dos betões de referência (betões com agregados de quartzito).

De referir ainda que Caetano et al. (2012), efetuaram um estudo, cujo objetivo consistiu em avaliar a adequabilidade dos valores de módulo de elasticidade estimados segundo a NP EN 1992-1-1 (2010) para os betões produzidos na Ilha da Madeira. Nesse estudo, utilizaram-se seis

amostras de diversas classes de resistência, com agregados de origem basáltica, para determinação do módulo de elasticidade através do ensaio prescrito pela especificação E 397 (1993). Os resultados desse estudo mostraram que os valores dos módulos de elasticidade obtidos são significativamente inferiores aos valores esperados. Nos betões produzidos com agregados basálticos provenientes da Ilha da Madeira obtiveram-se valores do módulo de elasticidade cerca de 16% abaixo dos valores de referência da NP EN 1992-1-1 (2010). Deste modo, os autores concluíram que os betões comercializados na Ilha da Madeira são produzidos com agregados de baixo módulo de elasticidade, nomeadamente basaltos muito alterados.

Naturalmente, uma vez que os materiais utilizados são os mesmos, o Betomix segue o mesmo comportamento observado por aqueles autores para o betão pronto, apesar da diferença entre os valores do módulo de elasticidade obtidos no Betomix ser cerca de 20% abaixo dos valores de referência da NP EN 1992-1-1 (2010), em vez dos 16% obtidos no estudo. Dada a extensão da campanha experimental realizada, não é possível dizer que a diferença obtida se deva a outros fatores que não a variabilidade associada ao tipo de material e aos ensaios adotados.

No entanto, salienta-se que os valores de módulo de elasticidade estimados a partir da NP EN 1992-1-1 (2010), seguem uma tendência linear relativamente ao tempo após a pré-mistura, à semelhança das propriedades de resistência, contrariamente à tendência verificada pelos valores de módulo de elasticidade obtidos nos ensaios. Na Figura 77, observa-se que o módulo de elasticidade, obtido nos ensaios realizados, parece ter tendência para aumentar com o aumento da resistência à compressão, apesar de num dos pontos, correspondente ao Betomix (3.0 h), verificar-se uma redução do módulo de elasticidade com o aumento da resistência à compressão.

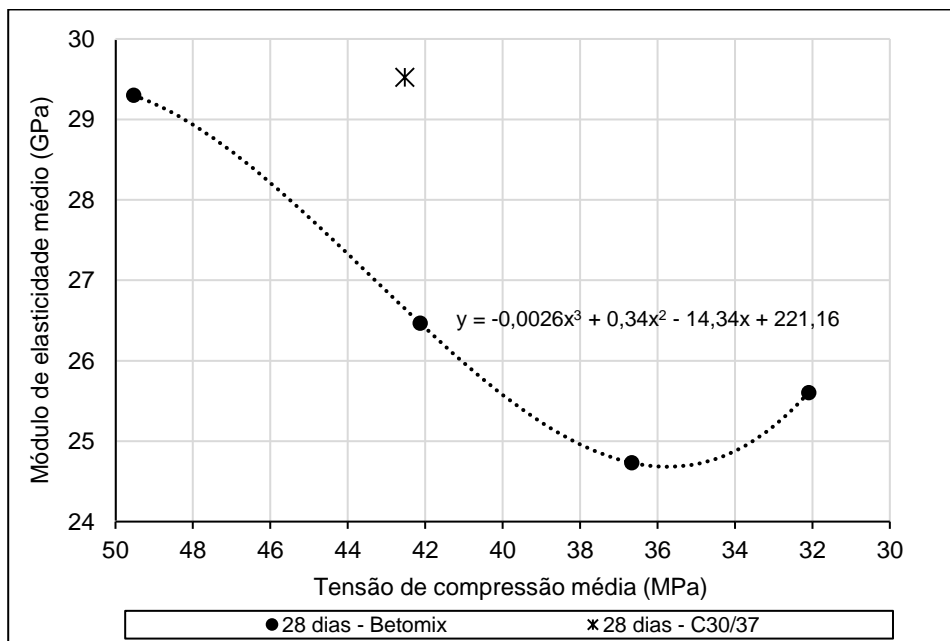


Figura 77 - Variação do módulo de elasticidade médio, com a resistência média à compressão dos betões Betomix e do betão C30/37 aos 28 dias

De referir ainda que o C30/37 apresenta um módulo de elasticidade médio de 29.5 GPa, para uma resistência média à compressão de 42.5 MPa. Assim, constata-se que o valor do módulo de

elasticidade do betão Betomix (1.5 h), que apresenta praticamente a mesma resistência à compressão, é claramente inferior ao do betão pronto C30/37. Essa diferença pode dever-se ao processo de produção, em que o betão inicia o processo de hidratação do cimento logo na pré-mistura, conduzindo a um comportamento diferente, no entanto deveriam ser realizados mais ensaios para avaliar este parâmetro.

Os resultados obtidos indicam que a determinação do valor do módulo de elasticidade deve considerar, o tempo após a pré-mistura. Assim, verifica-se que não é possível aplicar no Betomix, as expressões utilizadas pela NP EN 1992-1-1 (2010) para relacionar o módulo de elasticidade com a resistência à compressão.

4.5. Retração

Conforme descrito acima, a retração dos betões estudados foi avaliada através de ensaios segundo a especificação E 398 (1993), com recurso a três provetes prismáticos, com 50x50x200 mm³, de cada betão. Para cada amassadura, realizaram-se medições diárias até aos 8 dias, sendo estas reduzidas gradualmente até uma leitura por semana a partir de sensivelmente metade do período temporal de leitura, os 90 dias. Deste modo, obteve-se a variação de comprimento dos provetes para cada um dos 12 provetes ensaiados, expostos a determinadas condições de humidade relativa e temperatura. Os resultados da variação média de comprimento dos três provetes para cada uma das amassaduras de betão Betomix são ilustrados na Figura 78.

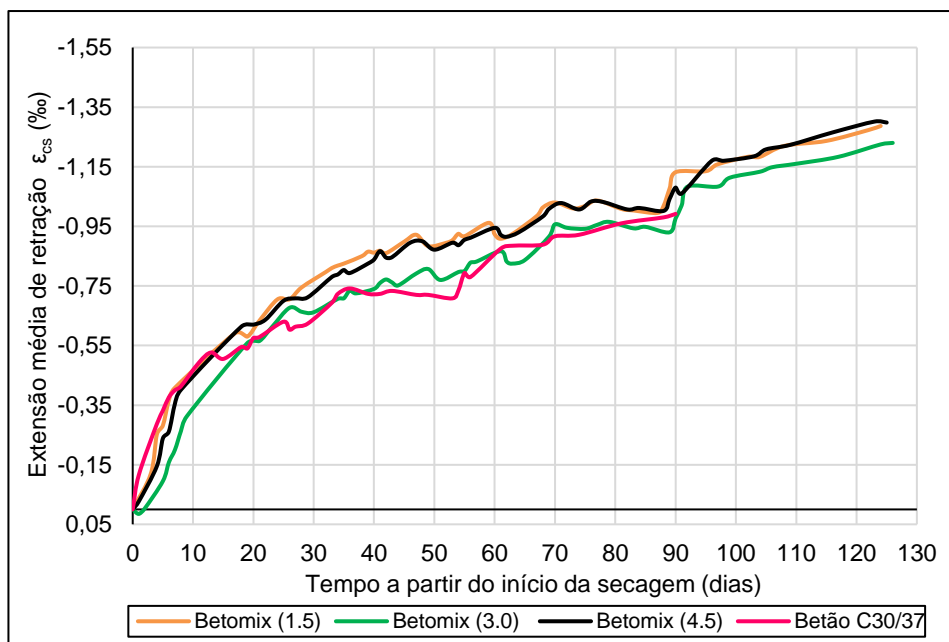


Figura 78 - Resultados da determinação do valor médio da retração para os provetes do Betomix e do C30/37

De referir ainda que, apesar do tempo previsto para o fim de ensaio ter sido inicialmente estabelecido aos 90 dias, para todos os prismas representativos das diversas composições do betão Betomix foi possível realizar leituras até aos 125 dias, aproximadamente. Este aumento do

período temporal de leituras deveu-se ao facto da permanência não prevista em laboratório, devida à repetição do betão pronto C30/37.

Analisando a Figura 78, constata-se que após 90 dias a partir do início da secagem do betão, a extensão de retração dos prismas Betomix (1.5 h) foi de $- 1.13 \times 10^{-3}$. No caso dos prismas do Betomix (3.0 h) a extensão de retração foi de $- 0.98 \times 10^{-3}$, e no Betomix (4.5 h) o valor obtido foi de $- 1.08 \times 10^{-3}$.

Sendo assim, observa-se uma tendência, no período correspondente aos primeiros 90 dias, para a extensão de retração do Betomix (1.5 h) ser ligeiramente superior à dos restantes Betomix. Para além disso, é também possível observar que o fenómeno de retração do betão em todos os Betomix evolui quase na mesma proporção, ou seja, as respostas seguem praticamente o mesmo andamento, com exceção do Betomix (3.0 h) que apresentou uma ligeira expansão de 0.02×10^{-3} no primeiro dia após a secagem.

Seria de esperar que ocorressem variações na retração de acordo com o aumento da quantidade de água presente no betão. No entanto, não se observou uma tendência para a retração obtida em função do aumento do tempo após a pré-mistura. As variações observadas não são significativas, nem podem ser atribuídas a outros fatores que não sejam a variabilidade do ensaio. É de realçar, também, que os valores obtidos no ensaio de retração são muito superiores aos valores habituais para betões produzidos em Portugal Continental, utilizando outro tipo de agregados.

Salienta-se que os resultados obtidos podem ter sido influenciados pelo facto dos provetes dos betões em estudo não terem sido armazenados a uma humidade relativa constante, como recomendado na especificação E 398 (1993), de $50 \pm 5\%$. No entanto, todos os betões foram sujeitos às mesmas variações de humidade relativa e temperatura. Os valores de humidade relativa e temperatura a que os provetes do betão Betomix (3.0 h) e betão pronto C30/37 foram sujeitos durante todo o ensaio, assim como os valores limite recomendados pela especificação E 398 (1993), são apresentados nas Figura 79 e Figura 80, respetivamente. Apesar das amassaduras dos Betomix, para realizar o ensaio de retração, terem sido executadas em dias diferentes, todos os Betomix foram sujeitos a condições de humidade relativa e temperatura semelhantes ao longo do tempo. Em particular, as condições de humidade relativa e temperatura ocorridas no segundo dia de secagem do Betomix (3.0 h) correspondem às condições do terceiro dia de secagem do Betomix (1.5 h), e ao primeiro dia de secagem do Betomix (4.5 h).

Efetuada uma análise à Figura 79, verifica-se que no Betomix (3.0 h), em praticamente metade do período temporal de leituras a humidade relativa esteve fora dos limites recomendados pela especificação; sendo que na maior parte deste tempo a humidade relativa foi superior aos 55%, valor esse que correspondeu à humidade relativa média. No betão pronto C30/37 observa-se que das 39 medições, dezasseis delas foram fora dos limites recomendados, estando praticamente todos os valores de humidade relativa acima dos 55%. O valor máximo de humidade relativa atingido, em todos os betões ensaiados foi de 69.8%. No entanto, salienta-se que os valores apresentados nas figuras foram registados apenas no momento da leitura, sendo que nas restantes

horas do dia poderão ter ocorrido variações na humidade relativa e na temperatura, devido à localização de armazenamento dos provetes

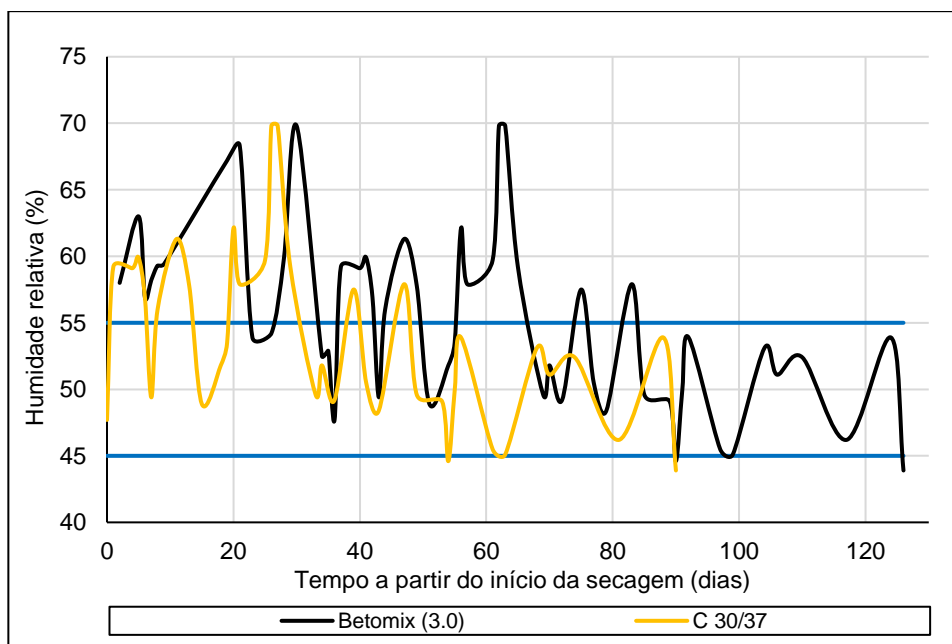


Figura 79 - Registo da humidade relativa (%) no local de armazenamento dos provetes prismáticos durante o período do ensaio de retração

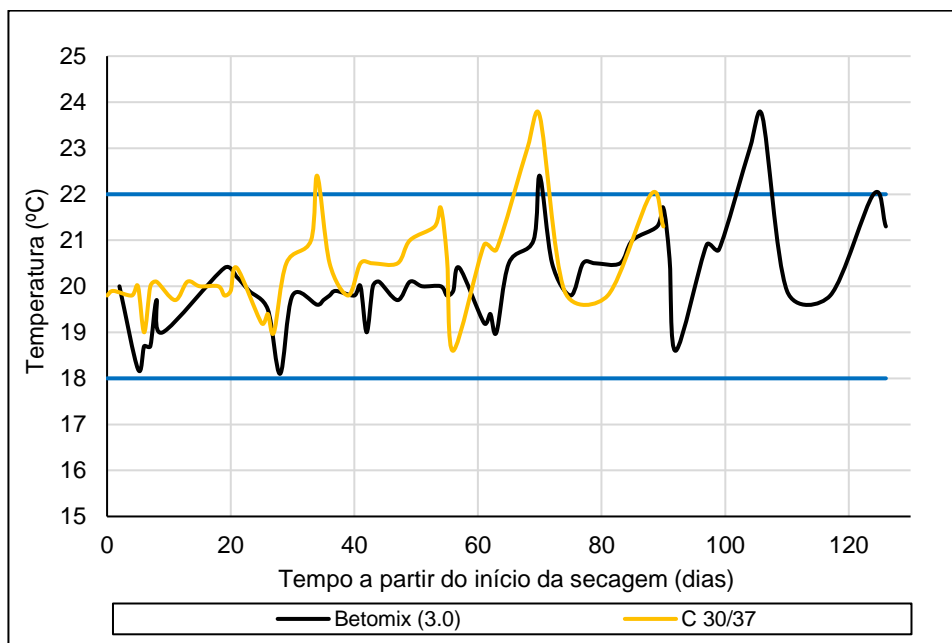


Figura 80 - Registo de temperatura (°C) no local de armazenamento dos provetes prismáticos durante o período do ensaio de retração

Segundo Santos (2005), quando os provetes são sujeitos a um ambiente cuja humidade relativa é variável, embora a uma temperatura constante, verifica-se que a evolução da retração do betão é influenciada por essa variação. Esta realizou um estudo, para apurar a influência das condições ambientais sobre provetes de betão, expondo provetes com a mesma composição em diversos ambientes. Em ambientes cuja temperatura é constante e humidade relativa variável, mas

com valor médio de cerca de 65%, verificou que a retração regride em fases que a humidade relativa correspondia a valores elevados como 80%. Analisando a Figura 78 e 79, verifica-se que nos betões Betomix em estudo nos maiores valores registados de humidade relativa, existe uma diminuição da evolução da retração.

Relativamente à temperatura, verificou-se que esta foi praticamente constante, saindo dos limites em apenas três leituras. A média da temperatura em todos os betões ensaiados rondou os 20 °C, e o valor máximo de temperatura atingido foi de 23.7 °C. Por isso, considera-se que a temperatura não terá tido influência significativa na evolução da retração dos provetes.

Por fim, de modo a verificar se o comportamento do Betomix é semelhante ao do betão C30/37, realiza-se uma análise comparativa entre estes dois betões. Através da análise da Figura 78, observa-se que o betão C30/37, com extensão de retração de $- 0.99 \times 10^{-3}$ aos 90 dias, apresenta em geral, valores ligeiramente inferiores aos obtidos nos Betomix (1.5 h) e (4.5 h). No entanto, verifica-se que neste período temporal de ensaio os betões C30/37 e Betomix (3.0 h) apresentam em geral, valores de extensão de retração semelhantes. De notar ainda que, nas primeiras idades a evolução da retração do betão pronto C30/37 foi maior do que nos Betomix, tendência que parece inverter-se para idades mais avançadas. Esta observação deverá ser confirmada através de um maior número de ensaios, desenvolvidos ao longo de períodos de tempo maiores.

5. Conclusões finais

5.1. Conclusões gerais

Esta dissertação teve por objetivo estudar o comportamento mecânico e reológico de um novo produto desenvolvido pelo Grupo Cimentos Madeira, denominado por Betomix. Este material consiste numa pré-mistura, preparada em central, de todos os materiais que constituem o betão, com exceção da água. A pré-mistura é posteriormente transportada para o local de aplicação, bastando apenas adicionar-se a quantidade de água recomendada para a sua utilização. O Betomix, é um produto pré-misturado a seco, concebido especialmente para obras de difícil acesso, para execução ou reparação de elementos de betão estrutural.

Para cumprimento dos objetivos propostos, foi programada uma campanha experimental para quatro tipos de betão Betomix, sendo que todos eles possuem a mesma quantidade de cimento, agregados, adjuvantes e adições, variando apenas a quantidade de água. A diferença entre os materiais cinge-se à quantidade de água total, fruto de diferentes intervalos de tempo entre a execução da pré-mistura e a mistura final, tendo sido escolhidos os seguintes intervalos: 0.0 h; 1.5 h; 3.0 h e 4.5 h. Para além do Betomix, analisou-se o betão pronto de classe de resistência C30/37, a servir como referência. É de salientar que experimentalmente tentou-se reproduzir as condições que se espera encontrar em obra.

Foram ensaiados 45 provetes cúbicos (9 de cada betão) para analisar a resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias, 15 provetes cilíndricos (3 de cada betão) para avaliar a resistência à tração e módulo de elasticidade aos 28 dias, e ainda 12 provetes prismáticos (3 de cada betão, com exceção do Betomix (0.0 h)) para analisar a retração. A maior parte dos ensaios foram executados no Laboratório Cimentos Madeira. No entanto, dois tipos de ensaio, nomeadamente para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade, foram efetuados no Laboratório Regional de Engenharia Civil da Região Autónoma da Madeira.

Os resultados obtidos permitiram analisar o comportamento do Betomix, considerando a variável “tempo após a pré-mistura da realização da mistura final” relativamente à resistência à compressão, à resistência à tração, ao módulo de elasticidade e à retração. Permitiram também analisar a influência do aumento da quantidade de água no Betomix e realizar uma comparação entre o comportamento mecânico do Betomix e o do betão pronto C30/37. Verificou-se ainda se as expressões preconizadas pela NP EN 1992-1-1 (2010) para determinação de diversas características mecânicas em função da resistência à compressão podem ser aplicáveis ao novo produto.

Os resultados mostraram que o aumento do tempo após a pré-mistura teve influência em três das propriedades estudadas no betão Betomix: a resistência à compressão, módulo de elasticidade e ainda resistência à tração. Observou-se que tanto a resistência à tração aos 28 dias como a resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias dos diversos Betomix diminuiu com o aumento do tempo entre a realização da pré-mistura e o início da realização da amassadura. No entanto, a

redução da resistência à tração não é tão evidente. A diminuição de resistência à tração, da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com o aumento do tempo após a pré-mistura deveu-se, também, ao facto de se aumentar a quantidade de água na mistura, de molde a contrariar a diminuição da trabalhabilidade provocada pelos produtos de hidratação do cimento, que ocorrem desde início, devido à presença da água contida nos agregados. Para além disso, a escolha da quantidade de água a ser adicionada deveu-se à opção de manter uma trabalhabilidade semelhante em todos os Betomix, critério considerado razoável, tendo em conta o que se pode esperar num ambiente de aplicação em obra.

Na retração, os resultados obtidos parecem indicar que esta não é influenciada de forma evidente pela quantidade de água adicionada ao Betomix, pois, apesar de existirem variações, os resultados obtidos não permitem concluir que as mesmas não se devem apenas à natural variabilidade do ensaio, não tendo sido possível relacioná-las com o aumento do tempo após a pré-mistura.

De realçar também que, nos resultados obtidos de resistência à compressão, foi possível observar que o Betomix (3.0 h) apresentou um valor médio aos 28 dias de 37 MPa, encontrando-se este no limite da resistência estabelecida. Por outro lado, quatro horas e meia após a pré-mistura, o Betomix obteve uma resistência média à compressão aos 28 dias de 32 MPa.

Através da análise comparativa entre o Betomix e o betão pronto C30/37, foi possível concluir que na resistência à tração verifica-se que nos diversos tempos analisados após a pré-mistura obtiveram-se valores ligeiramente inferiores aos do betão pronto C30/37. No entanto, essa diferença é relativamente pequena, não sendo deste modo possível efetuar conclusões. Na resistência à compressão, verificou-se que ambos os betões evoluem ao longo das idades estudadas (7, 28 e 56 dias). No entanto, observou-se que o Betomix (0.0 h) apresentou um valor médio de resistência à compressão aos 28 dias superior ao betão C30/37, verificando-se uma diferença na resistência ao longo das idades estudadas, em cerca de 16%. Esta diferença pode dever-se ao facto do Betomix (0.0 h) apresentar uma razão *a/c* ligeiramente inferior à do betão C30/37. Por outro lado, os Betomix (3.0 h) e (4.5 h) apresentaram valores de resistência à compressão nas diversas idades de estudo claramente inferiores aos do betão C30/37, possivelmente consequência da necessidade de aumentar a água na mistura para manter níveis semelhantes de trabalhabilidade. No entanto, o Betomix que mais se aproximou do valor de resistência à compressão do betão C30/37, foi o Betomix (1.5 h), apresentando valores muito semelhantes nas diversas datas de ensaio (7, 28 e 56 dias). Assim, os resultados mostraram que existiu uma redução significativa da resistência no Betomix, passada uma hora e meia de tempo após a execução da pré-mistura, em comparação com os valores de resistência obtidos no betão C30/37. Contudo, é natural que o Betomix (0.0 h) tenha apresentado uma resistência superior, já que era esperado que o Betomix (3.0 h) tivesse ainda características próximas do betão C30/37. Dado que, a única forma de o obter é ter um betão com melhor qualidade do que o betão de referência às 0.0 h.

Relativamente ao módulo de elasticidade, observou-se que o Betomix (0.0 h) obteve um valor muito próximo do betão C30/37, embora ligeiramente inferior. No entanto, seria esperado, que o valor obtido para o Betomix (0.0 h) fosse maior, dado que este tem uma relação a/c inferior à do betão C30/37, levando a um aumento do módulo de elasticidade. Os restantes Betomix, apresentaram valores de módulo de elasticidade inferiores aos do betão C30/37. Para além disso, observou-se que no Betomix que apresenta o valor médio de resistência à compressão semelhante ao do betão C30/37, o módulo de elasticidade desse Betomix é claramente inferior ao do C30/37. Essa diferença, que pode dever-se ao processo de produção, em que o betão inicia o processo de hidratação do cimento logo na pré-mistura, conduzindo a um comportamento diferente.

Nos resultados obtidos no ensaio de retração, analisando o período correspondendo aos primeiros 90 dias, observou-se que a extensão de retração obtida no betão C30/37 é, em geral, ligeiramente inferior aos valores obtidos nos Betomix (1.5 h) e (4.5 h). No entanto, os valores de extensão de retração do betão C30/37 e do Betomix (3.0 h) são, em geral, muito semelhantes. De notar que, ainda que nas primeiras idades a evolução da retração no betão pronto C30/37 tenha sido maior do que a do Betomix, essa tendência parece inverter-se em idades mais avançadas.

É importante salientar também que os valores obtidos no ensaio de retração, tanto para o Betomix como para o betão pronto C30/37, foram muito superiores aos valores habituais para betões produzidos em Portugal Continental, utilizando outro tipo de agregados.

Foi possível concluir ainda que as expressões preconizadas na NP EN 1992-1-1 (2010) para estimar a resistência à compressão numa determinada idade, a resistência à tração através da resistência à compressão e ainda o módulo de elasticidade através da resistência à compressão, apresentam diferenças significativas relativamente aos resultados experimentais obtidos.

Pode-se indicar que, de acordo as comparações efetuadas entre os valores experimentais obtidos e as expressões preconizadas pela NP EN 1992-1-1 (2010):

- os valores experimentais obtidos do módulo de elasticidade são, em média, cerca de 20% inferiores aos indicados pela norma para os betões de referência (betões com agregados de quartzo). Observou-se também, que a indicação dada pela norma em aumentar 20% o módulo de elasticidade secante para betões com agregados basálticos, não se adequa ao Betomix. Seguindo este o mesmo comportamento dos betões produzidos com agregados basálticos provenientes da Ilha da Madeira, estudados por Caetano et al (2012);
- na resistência à compressão obtiveram-se valores experimentais, em média, cerca de 5 MPa inferiores e cerca de 4 MPa superiores, aos 7 e 56 dias respetivamente, aos indicados pela norma;
- os resultados obtidos experimentalmente da resistência média à tração, aos 28 dias, são inferiores aos estimados, com diferenças que variam entre cerca de 0.5 MPa e cerca de 1.0 MPa.

Neste trabalho, apresentou-se também uma equação simples que poderá ser aplicada em obra, permitindo estimar a quantidade de água a ser adicionada, com objetivo de obter níveis semelhantes de trabalhabilidade em função do tempo após a pré-mistura. Para além disso, com base nos resultados obtidos, desenvolveram-se diversas curvas de tendência, resultando expressões que podem ser utilizadas para estimar a resistência à tração e o módulo de elasticidade em função da resistência média à compressão aos 28 dias, para além de equações apresentadas que refletem a evolução da resistência à compressão, da resistência à tração e do módulo de elasticidade, em função do tempo após a pré-mistura, observados.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Recomenda-se para trabalhos futuros a realização de mais ensaios experimentais que permitam justificar melhor a proposta de equações para estimar a quantidade de água a ser adicionada em função do tempo após a execução da pré-mistura do betão Betomix. Estas equações podem ser úteis para o aplicador, permitindo obter valores de referência.

Seria igualmente interessante realizar mais ensaios, de forma a confirmar, ou melhor fundamentar, as propostas de equações para a determinação do módulo de elasticidade e da resistência à tração em função da resistência média à compressão.

Por fim, seria também relevante avaliar novamente a retração, cumprindo integralmente as condições ambientais indicadas na especificação E 398 (1993), dado que tal não foi possível neste trabalho. Para além disso, poderiam ser realizados ensaios em maior número e por períodos de tempo mais longos, permitindo avaliar se a tendência observada do Betomix apresentar inicialmente valores mais baixos de extensão de retração do que o equivalente betão pronto C30/37, e maiores para idades mais avançadas, é efetiva.

Referências bibliográficas

- Abdullahi, M. (2012). *Effect of aggregate type on compressive strength of concrete*. Volume 2, Nº.3. International Journal of Civil and Structural Engineering.
- Almeida, E. S. (2005). *Avaliação do efeito de um adjuvante redutor de retração no betão auto-compactável*. (Tese de Mestrado). Universidade do Algarve Escola Superior de Tecnologia. Algarve: Portugal.
- Alves, H. I. S. (2015). *Formulação e caracterização mecânica de betões com baixa dosagem de cimento*. (Tese de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra: Portugal.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 116. (2000). *Cement and concrete terminology*, ACI 116R-00.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 212. (2010). *Report on chemical admixtures for concrete*, ACI 212.3R-10. Farmington Hills, MI.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 225. (1999). *Guide to the selection and use of hydraulic cements*, ACI 225R-99.
- American Concrete Institute (ACI) Committee E-107. (2013). *Chemical admixtures for concrete*, ACI Education Bulletin E4-12. Farmington Hills, MI.
- American Concrete Institute (ACI) Committee E-701. (2013). *Cementitious materials for concrete*, ACI Education Bulletin E3-13. Farmington Hills, MI.
- Antunes, M. J. (2013). *ECO-Betão com adição de resíduo da indústria petrolífera*. (Tese de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa: Portugal.
- APEB. (2008). Guia para a utilização da norma NP EN 206-1. A especificação do betão. Associação Portuguesa das empresas de betão pronto.
- Barbosa, M. V. C. (2013). *O betão: definição, caracterização e propriedades*. (Relatório de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa: Portugal.
- Benetti, J. K. (2012). *Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto*. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo: Brasil.
- Bento, S. (junho de 2016). Betomix. Cimentar. Nº. 63. pp.1-2. Consultado em http://www.cimentosmadeira.com/images/stories/cimentar/93_20160615.pdf
- Cachim, P. (n.d.). A especificação do betão segundo a NP EN 206-1. Universidade de Aveiro.
- Caetano, C., Maia, L., Hilário, L., Correia, M. (2012). Módulo de elasticidade em betões com agregados basálticos. Encontro Nacional Betão Estrutural.
- Carminho, F. J. T. H. (2012). *Resistência do betão à compressão em cubos VS cilindros*. (Tese de Mestrado). Universidade Nova de Lisboa. Lisboa: Portugal.

- Colen, F. I., Brito, J. (2003). *Execução de estruturas de betão armado*. Instituto Superior Técnico
- Conceição, M. I. A. L. (2011). *Reutilização de catalisador exausto da indústria petroquímica em materiais à base de cimento*. (Tese de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa: Portugal.
- Costa, A., Appleton, J. (2002). *Estruturas de betão I - Parte II - Materiais*. Instituto Superior Técnico.
- Coutinho, A. S. (1988a). *Fabrico e propriedades do betão* (2.^a ed.) (Vol. I). Lisboa. Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Coutinho, A. S. (1988b). *Fabrico e propriedades do betão* (2.^a ed.) (Vol. II). Lisboa. Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Coutinho, A. S. (1994). *Fabrico e propriedades do betão* (2.^a ed.) (Vol. III). Lisboa. Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Coutinho, J. S. (2002a). *Ciência de Materiais. Ligantes e agregados* (pp. 19). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cunha, P. J. P. (2011). *Conformidade da resistência à compressão do betão*. (Tese de Doutoramento). Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.
- Daniel, D. G. (2006). *Factors influencing concrete workability*. In Lamond, J. F., Pielert, J. H. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials* (pp. 59-72). Bridgeport, Nova Jersey. Estados Unidos.
- Day, K. W. (2006). *Concrete mix design, quality control and specification* (3.^a ed.). Abingdon, Inglaterra. Reino Unido. Taylor & Francis Group.
- Decreto-lei n.º 301/2007 de 23 de agosto. Diário da República 1.^a série, n.º 162 (2007). Ministério das obras públicas, transportes e comunicações.
- E 397. (1993). *Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 398. (1993). *Betões. Determinação da retracção e da expansão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 464. (2005). *Betões. Metodologia para a vida útil de projecto de 50 anos face às acções ambientais*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Faustino, R. G. (2011). *Produção de argamassas de cimento com incorporação de um resíduo da refinação de petróleo*. (Tese de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa: Portugal.
- Fernandes, P. A. L. (2005). *Vigas de grande vão prefabricadas em betão de alta resistência pré-esforçado*. (Tese de Mestrado). Universidade de Coimbra. Coimbra: Portugal.
- Ferreira, R. M. (2000). *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*. (Tese de Mestrado). Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.

- Fiorato, A. E. (2006). Uniformity of concrete-making materials. In Lamond, J. F., Pielert, J. H. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials* (pp. 30-37). Bridgeport, Nova Jersey. Estados Unidos.
- GangaRao, H. V. S., Taly, N., Vijay, P. V. (2007). *Reinforced concrete design with FRP composites*. Florida. Estados Unidos. Taylor & Francis Group.
- Gilbert, R. I., Ranzi, G. (2011). *Time-Dependent behaviour of concrete structures*. Nova Iorque. Estados Unidos. Taylor & Francis Group.
- Gomes, A., Pinto, A. P. F., Pinto, J. B. (2013). Cimento portland e adições. Instituto Superior Técnico.
- Goodwin, F. (2006). Volume Change. In Lamond, J. F., Pielert, J. H. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials* (pp. 2015-225). Bridgeport, Nova Jersey. Estados Unidos.
- Haranki, B. (2009). *Strength, modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete used in Florida*. University of Florida. Flórida: U.S.A.
- Hsu, T. T. C., Slate, F. O., Sturman, G. M., Winter, G. (1963). *Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve*. Journal of the American Concrete Institute.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. (2003). *Design and control of concrete mixtures* (14.^a ed.). Portland Cement Association. Estados Unidos.
- Krizova, K., Hela, R. (2014). *Selected technological factors influencing the modulus of elasticity of concrete*. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering.
- Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. Hoboken, Nova Jersey. Estados Unidos. John Wiley & Sons, Inc.
- Loureiro, P. M. B. (2013). *Otimização da quantidade de cinzas volantes em betões – benefício económico*. (Tese de Mestrado). Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.
- McCormac, J. C., Brown, R. H. (2006). *Design of reinforced concrete* (9.^a ed.). Estados Unidos. John Wiley & Sons, Inc.
- McNeely, D. J., Lash, S. D. (1963). *Tensile strength of concrete*. Journal of the American Concrete Institute.
- Meddah, M. S., Zitouni, S., Belâabes, S. (2010). *Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete*. Construction and Building Materials.
- Mehta P. K, Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete microstructure, properties, and materials* (3.^a ed.). Estados Unidos. McGraw-Hill.

- Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. (2006). *Concrete* (2.^a ed.). Estados Unidos. Pearson Education, Inc.
- Neto, A. A. M., Helene, P. R. L. (n.d.). *Módulo de elasticidade: Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos*. Instituto Brasileiro do Concreto.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5.^a ed.). Harlow, Inglaterra. Reino Unido. Pearson Education Limited.
- Neville, A. M., Brooks, J. J. (2010). *Concrete technology* (2.^a ed.). Harlow, Inglaterra. Reino Unido. Longman Group.
- Nilson, A. H., Darwin, D., Dolan, C. W. (2010). *Design of concrete structures* (14.^a ed.). Nova Iorque. Estados Unidos. McGraw-Hill.
- NP EN 1008 (Versão Portuguesa da EN 1008:2002). (2003). Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12350-2 (Versão Portuguesa da EN 12390-2:2009). (2009). Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12390-1 (Versão Portuguesa da EN 12390-1:2012). (2012). Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12390-2 (Versão Portuguesa da EN 12390-2:2009). (2009). Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12390-6 (Versão Portuguesa da EN 12390-6:2009). (2011). Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12620 (Versão Portuguesa de EN 12620:2002). (2004). Agregados para betão. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 197-1 (Versão Portuguesa de EN 197-1:2001). (2001). Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 1992-1-1 (Versão Portuguesa da EN 1992-1-1:2004). (2010). Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 206-1 (Versão Portuguesa de EN 206-1:2007). (2007). Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade.

- NP EN 934-2 (Versão Portuguesa da EN 934-2:2001+ EN 934-2:2001/A1:2004 + EN 934-2:2001/A2:2005). (2008). Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem.
- Oluokun, F. A., Burdette, E. G., Deatherage, J. H. (1991). *Splitting tensile strength and compressive strength relationship at early ages*. American Concrete Institute Materials Journal.
- Ozyildirim, C., Carino, N. J. (2006). Concrete strength testing. In Lamond, J. F., Pielert, J. H. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials* (pp. 125-140). Bridgeport, Nova Jersey. Estados Unidos.
- Pereira, R. (2014). *Controlo da qualidade de betões*. (Tese de Mestrado). Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.
- Pierce, S. J. (2006). Mixing and curing water for concrete. In Lamond, J. F., Pielert, J. H. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials* (pp. 462-466). Bridgeport, Nova Jersey. Estados Unidos.
- Poole, A. B., Sims, I. (2016). *Concrete petrography – A handbook of investigative techniques* (2.^a ed.). Florida. Estados Unidos. Taylor & Francis Group.
- Popovics, S. (1992). *Properties, specifications and testing* (2.^a ed.). Park Ridge. Nova Jersey. Estados Unidos.
- Qureshi, M. A., Aslam, M., Shah, S. N. R., Otho, S. H. (2015). *Influence of aggregate characteristics on the compressive strength of normal weight concrete*. Technical Journal, University of Engineering and Technology (UET) Taxila, Pakistan.
- Rocco, C., Guinea, G. V., Planas, J., Elices, M. (1999). *Mechanisms of rupture in splitting tests*. American Concrete Institute Materials Journal.
- Santos, T. O. (2007). *Retração do betão em pontes*. (Tese de Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa: Portugal.
- Sika (2017). Adjuvantes. Consultado em <http://prt.sika.com/pt/group/faq/adjuv.html>
- Silva, K. A. N. (2012). *Estudo de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados*. Universidade Federal de Alagoas. Maceió: Brasil.
- Silva, V. D. (2004) *Mecânica e Resistência dos Materiais* (3.^a ed.). Coimbra. Portugal. Gráfica de Coimbra.
- Simas, M. S. L. (2007). *Sistemas de proteção do betão face à carbonatação*. (Tese de Mestrado). Instituto Superior Técnico. Lisboa: Portugal.
- Souto, J. V. A. (2010). *Patologias na formulação de um betão na ilha da Madeira*. (Tese de Mestrado). Universidade da Madeira. Funchal: Portugal.
- Taylor, P. C. (2014). *Curing Concrete*. Florida. Estados Unidos. Taylor & Francis Group.

- Torgal, P. F., Jalali, S. (2011). *Betão ECO-eficiente: O futuro da indústria do betão pronto*. Revista nº 26 da APEB – Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, abril 2011. (pp 22-27).
- TPF Planege. (n.d.). Nova regulamentação. Betão. Consultado em www.tpfplanege.pt/files_tpfplanege/betao.ppt
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (1960). *Concrete manual* (2.^a ed.). Estados Unidos.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (1988). *Concrete manual* (8.^a ed.). Estados Unidos.
- Walker, S., Bloem, D. L. (1960). *Effects of aggregate size on properties of concrete*. Journal of the American Concrete Institute.
- Weerheijm, J. (2013). *Understanding the tensile properties of concrete* (p. 19). Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 48. Retirado de: <https://books.google.pt/books?id=8F1EAgAAQBAJ&pg=PA50&lpg=PA50&dq=Understanding+the+Tensile+Properties+of+Concrete&source=bl&ots=D2IYG-IFt4&sig=NrlxZeyvaNg3-LVjKBfgrazKQ7k&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiDpdr0iOvTAhUJtRQKHVgbC40Q6AEITzAG#v=onepage&q=Understanding%20the%20Tensile%20Properties%20of%20Concrete&f=false>
- Weiss, J. (2006). Elastic properties, creep, and relaxation. In Lamond, J. F., Pielert, J. H. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials* (pp. 194-206). Bridgeport, Nova Jersey. Estados Unidos.
- Yang, C., Yang, Y., Huang, R. (1997). *The effect of aggregate volume ratio on the elastic modulus and compressive strength of lightweight concrete*. Journal of Marine Science and Technology.
- Zhou, F. P., Lydon, F. D., Barr, B. I. G. (1995). *Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete*. Cement and Concrete Research.

ANEXOS

A. Folheto informativo referente ao produto betão Betomix

O folheto informativo apresentado abaixo está disponível em:
http://www.cimentosmadeira.com/images/stories/betomix/flyer_betomix.pdf



Produtos e serviços diferenciadores, ajustados às necessidades das obras, com todo o tipo de betões incluindo os autocompactáveis, os coloridos e muitos mais.



Cimentos com estabilidade de características e propriedades, adequados para todo o tipo de obras na Região.



Agregados com regularidade e estabilidade de propriedades, ideais para o fabrico dos betões.



Serviços laboratoriais de elevada competência técnica e vasta experiência nas obras da Região.

www.cimentosmadeira.com

Tel.: 291 740 680



BETÕES DIFERENCIADORES NA REGIÃO

BETOMIX

Simplex R20

Plex R30

Ultra R37





BETOMIX

O Betomix é um betão pré-doseado de granulometria máxima de 10 mm que contribui para uma excelente homogeneidade e proporciona um excelente desempenho ao nível da sua durabilidade.

Vantagens

- Obras de pequena e média dimensão sem acesso a autobetoneira;
- Fácil aplicação - basta juntar água;
- Facilmente transportável para qualquer local, ex. zonas históricas, veredas, levadas, caminhos agrícolas;
- Betão estrutural de qualidade garantida;
- Resistência mecânica:

Simplex R20	Plex R30	Ultra R37
>20MPa	>30MPa	>37MPa

- Elevada plasticidade;
- Elevada rapidez de execução em obra;
- Grande economia - sem desperdícios no final da obra.

Preparação

- Amassado num misturador tipo betoneira;
- Adicionar 1 balde de 10l de água por cada 2 baldes de 50l de Betomix, amassando por 3 minutos. A água tem de ser isenta de impurezas;
- O Betomix só deve ser utilizado até 3 horas após produção em central, tempo após o qual não são garantidas as suas características;
- Tem de ser protegido do sol, chuva ou vento.



B. Ficha técnica do Cimento Portland de Calcário CEM II/ A-L 42,5 R



CEM II/A-L 42,5R

CIMENTO PORTLAND DE
CALCÁRIO



Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0115 e 0856-CPD-0121.

O Cimento Portland de Calcário CEM II/A-L 42,5R é um produto de grande versatilidade, conjugando uma boa trabalhabilidade e elevadas resistências, características que permitem o seu uso em betões de várias classes de resistência na prefabricação ligeira ou pesada.

Locais de Produção
Fábrica Secil-Ouão
Fábrica Maceira-Liz

**Composição do Produto
(Núcleo Cimento)**
80% a 94% Clínquer Portland
6% a 20% Calcário
0% a 5% Outros Constituintes

Embalagem
Granel
Sacos de 40kg (pacotão plastificado)

Principais Aplicações

O cimento CEM II/A-L 42,5R é um produto especialmente formulado e adaptado para:

- betão pronto ou fabricado em obra de média a elevada resistência;
- betão pré-esforçado a idades correntes;
- betões projectados, betões leves e betões de regularização;
- prefabricação pesada com rotatividade normal ou prefabricação ligeira de grande rotatividade;
- reforço e reparação de betão estrutural.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com menor calor de hidratação e melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência. Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada). Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas.
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente ou muito frio.

Para obter a melhor performance em betões e argamassas:

- recomenda-se o estudo de composição;
- a melhor trabalhabilidade possibilita a redução da dosagem de água de amassadura, garantindo uma relação água/cimento compatível com as condições de aplicação.

É possível a adição de cinzas volantes, em condições específicas e desde que sejam cumpridas exigências de controlo de qualidade e de estudos prévios de composição.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada da informação de segurança consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloratos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

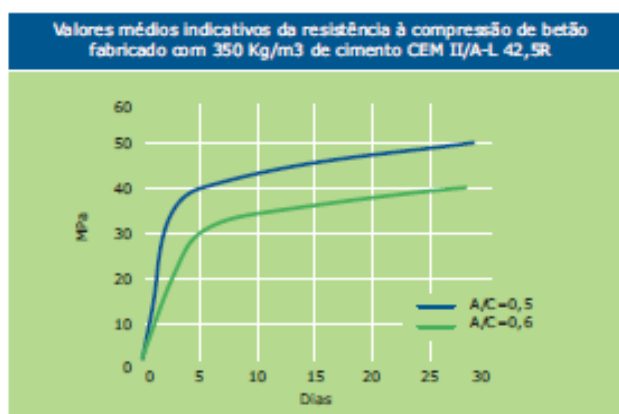
(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

Características Mecânicas

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

Características Físicas

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



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 Fax. 226 078 411

Vendas Centro
Tel. 244 779 500 Fax. 244 777 455

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 Fax. 212 198 229

E-mail - comercial@sedl.pt
Site - www.secil.pt

Cabeira de transporte cimento a granel, Fábrica Secil-Ovado.



Última atualização - Setembro 2004 - Versão 3

pag. 2|2

C. Resultados obtidos no ensaio de retração

Tabela A. 1 - Medições relativas ao ensaio à retração dos três provetes do betão Betomix (1.5 h)

Provetes B – Referentes ao Betomix (1.5 h)					
Nº da medição	Data da medição	Tempo de secagem (dias)	Medição provetes prismáticos (mm)		
			B1	B2	B3
1º	16-12-2016	0	1.120	1.262	1.235
2º	19-12-2016	3	1.096	1.239	1.210
3º	20-12-2016	4	1.077	1.220	1.169
4º	21-12-2016	5	1.070	1.211	1.167
5º	22-12-2016	6	1.054	1.193	1.150
6º	23-12-2016	7	1.049	1.184	1.139
7º	02-01-2017	17	1.011	1.147	1.104
8º	04-01-2017	19	1.018	1.146	1.105
9º	06-01-2017	21	1.002	1.142	1.093
10º	09-01-2017	24	0.988	1.123	1.083
11º	11-01-2017	26	0.988	1.123	1.083
12º	13-01-2017	28	0.989	1.096	1.085
13º	17-01-2017	32	0.977	1.086	1.076
14º	18-01-2017	33	0.976	1.084	1.071
15º	19-01-2017	34	0.975	1.083	1.068
16º	20-01-2017	35	0.972	1.081	1.069
17º	23-01-2017	38	0.967	1.074	1.066
18º	24-01-2017	39	0.962	1.074	1.062
19º	25-01-2017	40	0.961	1.074	1.065
20º	26-01-2017	41	0.958	1.075	1.063
21º	27-01-2017	42	0.960	1.077	1.064
22º	30-01-2017	45	0.951	1.071	1.056
23º	01-02-2017	47	0.947	1.067	1.050
24º	03-02-2017	49	0.954	1.074	1.059
25º	06-02-2017	52	0.952	1.072	1.056
26º	07-02-2017	53	0.949	1.071	1.055
27º	08-02-2017	54	0.944	1.067	1.051
28º	09-02-2017	55	0.943	1.071	1.053
29º	13-02-2017	59	0.933	1.061	1.046
30º	14-02-2017	60	0.942	1.069	1.052
31º	15-02-2017	61	0.946	1.073	1.053
32º	17-02-2017	63	0.941	1.069	1.052
33º	21-02-2017	67	0.928	1.058	1.040
34º	22-02-2017	68	0.921	1.055	1.033
35º	24-02-2017	70	0.920	1.050	1.029
36º	27-02-2017	73	0.922	1.054	1.035
37º	01-03-2017	75	0.923	1.054	1.029

Provetes B – Referentes ao Betomix (1.5 h)					
Nº da medição	Data da medição	Tempo de secagem (dias)	Medição provetes prismáticos (mm)		
			B1	B2	B3
38º	03-03-2017	77	0.920	1.050	1.025
39º	07-03-2017	81	0.926	1.056	1.030
40º	09-03-2017	83	0.925	1.056	1.034
41º	13-03-2017	87	0.929	1.057	1.034
42º	14-03-2017	88	0.921	1.054	1.031
43º	15-03-2017	89	0.913	1.043	1.015
44º	16-03-2017	90	0.903	1.031	1.004
45º	21-03-2017	95	0.901	1.032	1.003
46º	23-03-2017	97	0.894	1.031	0.997
47º	28-03-2017	102	0.894	1.023	0.990
48º	30-03-2017	104	0.891	1.024	0.992
49º	03-04-2017	108	0.886	1.017	0.982
50º	10-04-2017	115	0.882	1.013	0.980
51º	17-04-2017	122	0.875	1.006	0.972
52º	19-04-2017	124	0.873	1.002	0.970

Tabela A. 2 – Medições relativas ao ensaio à retração dos três provetes do betão Betomix (3.0 h)

Provetes C – Referentes ao Betomix (3.0 h)					
Nº da medição	Data da medição	Tempo de secagem (dias)	Medição provetes prismáticos (mm)		
			C1	C2	C3
1º	14-12-2016	0	1.815	1.905	1.751
2º	14-12-2016	0	1.796	1.892	1.639
3º	15-12-2016	1	1.798	1.893	1.645
4º	16-12-2016	2	1.795	1.890	1.640
5º	19-12-2016	5	1.771	1.876	1.623
6º	20-12-2016	6	1.762	1.861	1.609
7º	21-12-2016	7	1.751	1.854	1.602
8º	22-12-2016	8	1.741	1.840	1.588
9º	23-12-2016	9	1.730	1.829	1.580
10º	02-01-2017	19	1.699	1.792	1.501
11º	04-01-2017	21	1.701	1.792	1.495
12º	06-01-2017	23	1.692	1.786	1.483
13º	09-01-2017	26	1.681	1.768	1.472
14º	11-01-2017	28	1.681	1.774	1.474
15º	13-01-2017	30	1.683	1.774	1.473
16º	17-01-2017	34	1.674	1.765	1.464
17º	18-01-2017	35	1.673	1.765	1.464
18º	19-01-2017	36	1.669	1.759	1.458
19º	20-01-2017	37	1.671	1.762	1.459
20º	23-01-2017	40	1.666	1.761	1.456

Provetes C – Referentes ao Betomix (3.0 h)					
Nº da medição	Data da medição	Tempo de secagem (dias)	Medição provetes prismáticos (mm)		
			C1	C2	C3
21º	24-01-2017	41	1.664	1.755	1.452
22º	25-01-2017	42	1.661	1.754	1.449
23º	26-01-2017	43	1.663	1.756	1.451
24º	27-01-2017	44	1.665	1.758	1.453
25º	30-01-2017	47	1.657	1.748	1.447
26º	01-02-2017	49	1.655	1.747	1.441
27º	03-02-2017	51	1.662	1.754	1.449
28º	06-02-2017	54	1.658	1.749	1.442
29º	07-02-2017	55	1.658	1.749	1.440
30º	08-02-2017	56	1.653	1.745	1.432
31º	09-02-2017	57	1.655	1.743	1.430
32º	13-02-2017	61	1.645	1.738	1.424
33º	14-02-2017	62	1.653	1.745	1.430
34º	15-02-2017	63	1.652	1.748	1.432
35º	17-02-2017	65	1.651	1.745	1.429
36º	21-02-2017	69	1.640	1.731	1.407
37º	22-02-2017	70	1.632	1.719	1.402
38º	24-02-2017	72	1.632	1.719	1.409
39º	27-02-2017	75	1.633	1.723	1.406
40º	01-03-2017	77	1.633	1.720	1.401
41º	03-03-2017	79	1.630	1.717	1.401
42º	07-03-2017	83	1.635	1.723	1.403
43º	09-03-2017	85	1.632	1.723	1.403
44º	13-03-2017	89	1.637	1.727	1.405
45º	14-03-2017	90	1.628	1.719	1.394
46º	15-03-2017	91	1.621	1.713	1.381
47º	16-03-2017	92	1.608	1.699	1.370
48º	21-03-2017	97	1.608	1.700	1.369
49º	23-03-2017	99	1.602	1.695	1.362
50º	28-03-2017	104	1.600	1.688	1.359
51º	30-03-2017	106	1.596	1.683	1.359
52º	03-04-2017	110	1.596	1.682	1.353
53º	10-04-2017	117	1.592	1.676	1.349
54º	17-04-2017	124	1.583	1.670	1.339
55º	19-04-2017	126	1.582	1.669	1.338

Tabela A. 3 - Medições relativas ao ensaio à retração dos três provetes do betão Betomix (4.5 h)

Provetes D – Referentes ao Betomix (4.5 h)					
Nº da medição	Data da medição	Tempo de secagem (dias)	Medição provetes prismáticos (mm)		
			D1	D2	D3
1º	15-12-2016	0	1.212	1.270	1.146
2º	16-12-2016	1	1.204	1.268	1.140
3º	19-12-2016	4	1.185	1.255	1.101
4º	20-12-2016	5	1.159	1.240	1.086
5º	21-12-2016	6	1.158	1.238	1.075
6º	22-12-2016	7	1.144	1.213	1.058
7º	23-12-2016	8	1.136	1.203	1.048
8º	02-01-2017	18	1.099	1.153	1.008
9º	04-01-2017	20	1.100	1.152	1.004
10º	06-01-2017	22	1.090	1.152	1.004
11º	09-01-2017	25	1.079	1.138	0.991
12º	11-01-2017	27	1.077	1.138	0.988
13º	13-01-2017	29	1.079	1.130	0.992
14º	17-01-2017	33	1.057	1.123	0.980
15º	18-01-2017	34	1.056	1.121	0.978
16º	19-01-2017	35	1.053	1.117	0.976
17º	20-01-2017	36	1.053	1.118	0.981
18º	23-01-2017	39	1.048	1.112	0.973
19º	24-01-2017	40	1.041	1.113	0.971
20º	25-01-2017	41	1.035	1.107	0.966
21º	26-01-2017	42	1.040	1.112	0.969
22º	27-01-2017	43	1.040	1.112	0.968
23º	30-01-2017	46	1.032	1.104	0.955
24º	01-02-2017	48	1.030	1.101	0.957
25º	03-02-2017	50	1.037	1.109	0.959
26º	06-02-2017	53	1.032	1.104	0.955
27º	07-02-2017	54	1.032	1.104	0.960
28º	08-02-2017	55	1.029	1.098	0.958
29º	09-02-2017	56	1.026	1.101	0.954
30º	13-02-2017	60	1.017	1.093	0.951
31º	14-02-2017	61	1.025	1.099	0.951
32º	15-02-2017	62	1.022	1.101	0.956
33º	17-02-2017	64	1.022	1.096	0.952
34º	21-02-2017	68	1.011	1.085	0.942
35º	22-02-2017	69	1.007	1.080	0.936
36º	24-02-2017	71	1.000	1.079	0.932
37º	27-02-2017	74	1.005	1.081	0.938
38º	01-03-2017	76	1.000	1.076	0.932
39º	03-03-2017	78	1.001	1.076	0.932
40º	07-03-2017	82	1.007	1.080	0.937
41º	09-03-2017	84	1.007	1.081	0.933

Provetes D – Referentes ao Betomix (4.5 h)					
Nº da medição	Data da medição	Tempo de secagem (dias)	Medição provetes prismáticos (mm)		
			D1	D2	D3
42º	13-03-2017	88	1.011	1.080	0.936
43º	14-03-2017	89	1.007	1.064	0.932
44º	15-03-2017	90	0.997	1.056	0.927
45º	16-03-2017	91	1.001	1.063	0.928
46º	21-03-2017	96	0.980	1.041	0.905
47º	23-03-2017	98	0.979	1.040	0.907
48º	28-03-2017	103	0.974	1.038	0.905
49º	30-03-2017	105	0.971	1.030	0.902
50º	03-04-2017	109	0.968	1.029	0.897
51º	10-04-2017	116	0.962	1.014	0.893
52º	17-04-2017	123	0.956	1.010	0.881
53º	19-04-2017	125	0.957	1.009	0.883

Tabela A. 4 - Medições relativas ao ensaio à retração dos três provetes do betão C30/37

Provetes F – Referentes ao betão C30/37					
Nº da medição	Data da medição	Tempo de secagem (dias)	Medição provetes prismáticos (mm)		
			F1	F2	F3
1º	19-01-2017	0	1.770	1.953	1.645
2º	20-01-2017	1	1.731	1.937	1.631
3º	23-01-2017	4	1.694	1.906	1.596
4º	24-01-2017	5	1.681	1.899	1.589
5º	25-01-2017	6	1.670	1.892	1.580
6º	26-01-2017	7	1.666	1.886	1.576
7º	27-01-2017	8	1.664	1.885	1.571
8º	30-01-2017	11	1.646	1.869	1.557
9º	01-02-2017	13	1.640	1.861	1.551
10º	03-02-2017	15	1.648	1.862	1.555
11º	06-02-2017	18	1.639	1.852	1.550
12º	07-02-2017	19	1.638	1.854	1.552
13º	08-02-2017	20	1.628	1.849	1.546
14º	09-02-2017	21	1.630	1.848	1.543
15º	13-02-2017	25	1.611	1.840	1.539
16º	14-02-2017	26	1.619	1.847	1.540
17º	15-02-2017	27	1.620	1.844	1.536
18º	17-02-2017	29	1.618	1.844	1.532
19º	21-02-2017	33	1.604	1.827	1.521
20º	22-02-2017	34	1.596	1.822	1.516
21º	24-02-2017	36	1.591	1.822	1.510
22º	27-02-2017	39	1.593	1.825	1.516
23º	01-03-2017	41	1.595	1.825	1.514

Provetes F – Referentes ao betão C30/37					
Nº da medição	Data da medição	Tempo de secagem (dias)	Medição provetes prismáticos (mm)		
			F1	F2	F3
24º	03-03-2017	43	1.590	1.822	1.516
25º	07-03-2017	47	1.595	1.828	1.513
26º	09-03-2017	49	1.593	1.829	1.514
27º	13-03-2017	53	1.592	1.831	1.520
28º	14-03-2017	54	1.589	1.825	1.513
29º	15-03-2017	55	1.581	1.813	1.498
30º	16-03-2017	56	1.573	1.820	1.507
31º	21-03-2017	61	1.566	1.792	1.485
32º	23-03-2017	63	1.559	1.797	1.481
33º	28-03-2017	68	1.560	1.795	1.480
34º	30-03-2017	70	1.552	1.785	1.481
35º	03-04-2017	74	1.552	1.783	1.480
36º	10-04-2017	81	1.549	1.775	1.468
37º	17-04-2017	88	1.540	1.772	1.468
38º	19-04-2017	90	1.541	1.771	1.461

