



Patologias na formulação de um betão na ilha da Madeira

João Vitor Andrade Souto

Dissertação de mestrado em
Engenharia Civil

Júri

Presidente: Prof. Dra. Nelli Aleksandrova (Prof. auxiliar da Universidade da Madeira)

Vogal: Prof. Dr. Augusto Martins Gomes (Prof. Associado do Instituto Superior Técnico)

Vogal: Prof. Dr. Paulo França (Prof. auxiliar da Universidade da Madeira; orientador)

Novembro de 2010

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família e namorada, pelo acompanhamento e motivação, ao longo do curso e especialmente neste estudo.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo França, pelo facto de me ter possibilitado, um contacto muito próximo com o meio empresarial na área da engenharia civil, o que permitiu a realização de grande parte deste estudo e obtenção de alguma experiência no tema estudado. Este agradecimento, estende-se à sua orientação e incentivo motivacional, presente ao longo da execução do trabalho.

Quero agradecer também, ao Eng. Carlos Afonso pela sua preciosa ajuda na área de controlo de produção e qualidade dos agregados e betão, e pela sua prontidão e disponibilidade de aconselhamento geral para a realização do estudo. É também muito sentido, o agradecimento à Prebel, nomeadamente ao Eng. Henrique Ferreira, por ter possibilitado a realização de parte do estudo, disponibilizando todos os componentes necessários para efectuar as amassaduras e acesso a grande parte da bibliografia utilizada neste estudo.

Ao Grupo Cimentos Madeira, nomeadamente ao LCM (Laboratório Cimentos Madeira), em especial ao Dr. João Santos e ao Eng. Luís Saraiva, por ter disponibilizado todo o apoio possível. A todo o pessoal do laboratório, com especial destaque ao Sr. Miguel Guimarães, responsável máximo do mesmo, pela sua orientação em determinadas fases críticas do estudo e acompanhamento de alguns ensaios realizadas na referida empresa.

Ao LREC, principalmente ao Eng. Miguel Correia e Eng. Amílcar Gonçalves, pelos aconselhamentos fornecidos e também pelo fornecimento de alguns dados experimentais e realização de alguns ensaios.

Por fim, quero agradecer aos meus colegas pela amizade e troca de ideias no decorrer do curso e dissertação.

Resumo

Existem diversos métodos de formular a composição de um betão, dos quais, este estudo realça a metodologia aplicada às curvas de referência, nomeadamente a de Faury.

No âmbito desta dissertação, o estudo do betão foi focado nas propriedades da resistência à compressão e trabalhabilidade, e nos factores que as influenciam para a obtenção dos resultados pretendidos.

A dificuldade deste estudo surgiu na obtenção da trabalhabilidade desejada, derivada do tipo de agregados existentes na empresa e incertezas na quantificação da água de amassadura. Esta foi analisada, com especial destaque, para os parâmetros de absorção e humidade, em que o ensaio normativo da obtenção da capacidade de absorção dos agregados, poderá não ser o mais indicado para quantificar o valor real deste parâmetro. Notou-se que o método de Faury para determinar a água de amassadura, não era o mais indicado, por não ter em conta os parâmetros anteriormente referidos.

Foram realizados diversos ensaios de obtenção de parâmetros necessários para efectuar uma formulação acertada. Foram também realizadas diversas amassaduras, com composições distintas, de forma a analisar a sua influência nos resultados. Estes foram analisados através de critérios de conformidade, para classificação do betão em termos de resistência.

Foi possível concluir que os resultados da formulação da composição do betão, dependem muito da qualidade dos agregados utilizados, como a sua forma, porosidade e homogeneidade do material pétreo.

De acordo com os resultados experimentais, foi concluída a existência de uma insuficiência de finos nas composições criadas para o betão, sugerindo uma curva real granulometria de referência para potencializar a trabalhabilidade para o tipo de agregados utilizados neste estudo.

Abstract

There are various methods of concrete mix design, in which this study highlights one of those, the Faury method.

In this thesis, the study is centered on the proprieties of concrete and the factors that may influence on the desired results. The proprieties studied where the workability of fresh concrete and the compressive strength of hardened concrete.

The main difficulty in this study was related with obtaining the desired results in workability, due to the kind of aggregates existing on the enterprise and doubts in achieving the correct proportion of mixing water. This was analyzed with parameters of water absorption and moisture, in which the normative trial of obtaining the absorption, may not be the most accurate to quantify the real quantity of this parameter. It was establish that the Faury method for achieving the mixing water, wasn't the proper one, because it didn't involve the parameters previously mention.

Several trials were made to obtain the necessary parameters for an accurate concrete mix design. Different concrete mix designs were made, in order to analyze it's influence on the results. These were compared with quality/conformity criteria in order to classify the concrete in its compressive strength category.

It was possible to conclude, that the results of the different concrete mix design depend mainly on the sort of quality from the aggregates, such as shape, porosity and homogeneity of the rocky material.

According to the trials results, it was able to conclude that existed an insufficiency of fine aggregates in the mixes designs created, suggesting a preferred grading of the mixture of aggregates (graphic), to maximize the workability of the fresh concrete to the kind of aggregates used in this study.

Índice

1.Introdução	1
2. Propriedades do betão e formulações para a sua composição	5
2.1 Resistência à compressão	5
2.1.1 Controlo de conformidade da resistência à compressão	7
2.1.2 Processo de cura dos provetes de betão	8
2.1.3 Factores que influenciam a resistência à compressão no betão.....	9
2.1.3.1 Resistência da pasta de cimento	9
2.1.3.1 Resistência da ligação da pasta de cimento com os agregados.....	10
2.1.3.2 Resistência dos agregados.....	11
2.1.3.2 Direcção da aplicação da carga.....	12
2.1.3.3 Forma do provete	13
2.2 Trabalhabilidade	13
2.2.1 Ensaio de abaixamento do cone de Abrams (slump).....	14
2.2.3 Factores que afectam a trabalhabilidade	15
2.3 Classe de exposição ambiental	17
2.4. Classe do teor de cloretos.....	18
2.5 Formulação da composição do betão.....	18
2.5.1 Dados necessários dos agregados.....	19
2.5.1.1 Massa volúmica	20
2.5.1.2 Baridade e volume de vazios.....	20
2.5.1.3 Granulometria	21
2.5.1.4 Absorção	23
2.5.1.5 Humidade	24
2.5.2 Método das curvas de referência	25
2.5.2.1 Curva de Faury.....	25
2.5.2.2 Curva de Bolomey.....	27
2.5.2.3 Curva de Joisel	28
2.5.3 Análise das curvas de referência.....	29
2.5.4 Alteração da composição	33

3.Programa Experimental	35
3.1 Primeira Parte - Composições de betão	36
3.1.1 Ensaios preliminares aos agregados	37
3.1.1.1 Massa volúmica e absorção.....	38
3.1.1.2 Teor de Humidade	41
3.1.1.4 Granulometria	42
3.1.1 Quantificação da água de amassadura	44
3.1.3 Composições/Amassaduras de Betão C30/37	47
3.1.3.1 Amassadura 1	48
3.1.3.2 Amassadura 2	60
3.1.3.3 Amassadura 3	62
3.1.3.4 Amassadura 4	64
3.1.3.5 Amassadura 5	65
3.2 Análise das composições efectuadas.....	68
3.2.1 Método teórico de Faury	68
3.2.1.1 Formulação ajustada	70
3.2.1 Conformidade dos resultados de resistência	73
3.2.3 Qualidade da matéria-prima	76
3.2.4 Água de amassadura e efectiva	79
3.3 Segunda Parte – Estudo complementar aos agregados.....	82
3.3.1 Absorções de amostras com e sem fíler	82
4. Conclusões.....	87
Bibliografia.....	91
Anexo I- Fichas técnicas dos agregados	93
Anexo II- Resistência à compressão em basaltos da ilha da Madeira.....	98
Anexo III- Equações de NP EN 1097-6	99
Anexo IV- Formulações das Amassaduras.....	100
Anexo IV-A Formulação da Amassadura2.....	100
Anexo IV-B Formulação da Amassadura 3	103
Anexo IV-C Formulação da Amassadura 4.....	106
Anexo IV-D Formulação da Amassadura 5.....	109

Lista de Figuras

Figura 1-Representação gráfica do comportamento do betão (EN 1992-1, 2004).....	6
Figura 2-Processos de cura do betão (A- Em água; B- Numa câmara).....	8
Figura 3-Exsudação no betão (adaptado de (Mindess, et al., 1981)).....	13
Figura 4-Representação dos diversos estados de humidade dos agregados	25
Figura 5-Representação da curva de Joisel	29
Figura 6-Método gráfico para curvas granulométricas não sobrepostas	32
Figura 7-Método gráfico para curvas granulométricas descontínuas ou sobrepostas..	32
Figura 8- Metodologia de recolha das amostras de agregados 1:3:5	37
Figura 9-Disposição das partículas em armazenagem de agregados grossos (NP EN 933)	38
Figura 10- Representação do procedimento experimental relativo a EN NP 1097-6 (A- equipamento para o esquadramento da amostra; B- Amostra de brita; C-Imersão dos picnómetros; D-Picnómetro com material saturado)	39
Figura 11- Material utilizado para partículas entre 0.065 e 4 mm.....	40
Figura 12-Secagem dos agregados na estufa	42
Figura 13-Definição de funções relacionando V_v com D_{max}	46
Figura 14-Mistura utilizadas nas amassaduras.....	48
Figura 15-Processo de obtenção das massas dos agregados por cada m^3 de betão	49
Figura 16-Grafismo representativo das curvas granulométricas	50
Figura 17-Curvas granulométricas de Faury e dos agregados	52
Figura 18-Método gráfico	54
Figura 19-Curva granulométrica real e teóricas.....	57
Figura 20-Ensaio do cone de Abraams na amassadura 1.....	60
Figura 21-Ensaio do cone de Abraams na amassadura 2	61
Figura 22-Ensaio de resistência à compressão dos cubos resultantes da amassadura 2	62
Figura 23-Curva real e teórica da mistura granulométrica da Amassadura 5-A.....	65
Figura 24-Exemplos dos resultados deformados obtidos na Amassadura 5	66
Figura 25-Análise das diferenças entre a curva teórica e real de granulometria da mistura.....	69
Figura 26-Análise entre as curvas granulométricas dos agregados	70
Figura 27-Granulometria da mistura de agregados finos	72
Figura 28- Curvas de Faury com diferentes valores de A.....	72
Figura 29- Resistência à compressão do betão em relação a t dias (EC 2)	74
Figura 30-Amostras de material pétreo utilizado no EN NP 1097-6	77
Figura 31- Ilustração representativa da influência da forma dos agregados.....	79
Figura 32- Representação do grau de saturação de um agregado	80

Figura 33-Fénomeno de agrupamento de partículas (bulking) em agregados finos (Mindess, et al., 1981)	81
Figura 34-Relação entre acréscimo de volume e teor de humidade (Mindess, et al., 1981).....	82
Figura 35-Amostra de pó de pedra lavada (A) e não lavada (B).....	83
Figura 36-Determinação do estado das partículas (saturadas com superfície seca ou não) (A e B- Superfície húmida; C- Superfície seca)	84
Figura 37- Curva real granulométrica de referência	88
Figura 38-Ficha técnica do Pó de pedra	93
Figura 39-Ficha técnica da Brita 2	94
Figura 40-Ficha técnica de Brita 1	95
Figura 41-Ficha técnica de Sarrisca	96
Figura 42-Ficha técnica da Areia do mar	97
Figura 43-Registo fotográfico de alguns dos basaltos ensaiados no LREC.....	98
Figura 44-Curva real e teórica da composição da amassadura 2.....	102
Figura 45-Processo de determinação da água para amassadura 2.....	102
Figura 46-Curva granulométrica real e teórica da mistura para a amassadura 3.....	105
Figura 47- Curva granulométrica real e teórica da amassadura 4	108
Figura 48-Curva granulométrica real e teórica para a amassadura 5.....	111

Lista de Tabelas

Tabela 1-Classes de resistência mais usuais à compressão para betão de massa volúmica normal e para betão pesado (NP EN 206-1, 2007)	6
Tabela 2-Critérios de conformidade para a resistência do betão (NP EN 206-1, 2007) ..	7
Tabela 3-Resistência à compressão dos vários tipos de classe de resistência do cimento (NP EN 197-1)	10
Tabela 4-Classes de consistência relativas aos resultados do ensaio de abaixamento .	15
Tabela 5-Valores dos parâmetros A e B da curva de Faury (Coutinho, 2006)	26
Tabela 6- Classificação de trabalhabilidade de Faury consoante tipo de compactação (Coutinho, 2006).....	27
Tabela 7-Valores do parâmetro A da curva de Bolomey	28
Tabela 8-Resultados do EN NP 1097-6 LREC	41
Tabela 9- Resultados do EN NP 1097-5	42
Tabela 10-Análise de conformidade granulométrica da Brita 2	43
Tabela 11-Valores de Faury para parâmetros K e K'	45
Tabela 12-Tabela de Sousa Coutinho para volume de vazios	45
Tabela 13-Granulometria dos agregados	50
Tabela 14-Módulos de finura	51
Tabela 15-Ajuste para determinar curva de Faury s/ cimento	53
Tabela 16-Granulometria da curva de Faury s/ cimento	55
Tabela 17- Proporção para ajuste das percentagens.....	55
Tabela 18-Determinação da granulometria da curva real da mistura	56
Tabela 19-Quantidade de água presente nos agregados por metro cúbico de betão ..	58
Tabela 20-Quantidade de água absorvida pelos agregados por metro cúbico de betão	58
Tabela 21-Quantidades determinadas por metro cúbico de betão para partículas "húmidas"	59
Tabela 22-Quantidades utilizadas na amassadura 1 em quilogramas.....	59
Tabela 23-Quantidades adicionadas na amassadura 1 em gramas	60
Tabela 24-Quantidades utilizadas na amassadura 2 em quilogramas.....	61
Tabela 25-Quantidades adicionadas em gramas na amassadura 2	61
Tabela 26-Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão na Amassadura 2	62
Tabela 27-Quantidades utilizadas na Amassadura 3 em quilogramas.....	63
Tabela 28-Resultados dos ensaios de determinação à compressão na Amassadura 3 .	63
Tabela 29-Resultados dos ensaios da resistência à compressão da amassadura 3-B ...	64
Tabela 30-Quantidades utilizadas na Amassadura 4 em quilogramas.....	64
Tabela 31-Resultados dos ensaios de resistência à compressão na Amassadura 4	64
Tabela 32-Quantidades em quilogramas na Amassadura 5-A	65

Tabela 33-Mistura dos adjuvantes utilizados em gramas na Amassadura 5-B.....	67
Tabela 34-Resultados dos ensaios da resistência à compressão resultantes das	67
Tabela 35- Granulometria dos agregados finos da amassadura.....	71
Tabela 36- Granulometria da amassadura 5	73
Tabela 37-Desenvolvimento da resistência aos sete dias das amassaduras realizadas	75
Tabela 38-Análise de conformidade da resistência à compressão	76
Tabela 39- Absorções de diversos agregados finos com e sem fíler.....	84
Tabela 40-Resultados de ensaios à compressão de diferentes basaltos no LREC	98
Tabela 41-Ajuste para obtenção da curva de Faury s/ cimento da amassadura 2	100
Tabela 42-Granulometria da mistura obtida.....	101
Tabela 43-Quantidades dos componentes do betão para amassadura 2 para um metro cúbico.....	103
Tabela 44-Ajuste para obtenção da curva de Faury s/ cimento da amassadura 3	103
Tabela 45-Granulometria da mistura obtida para a amassadura 3	104
Tabela 46-Processo de determinação da água para amassadura 3.....	105
Tabela 47- Quantidades dos componentes do betão para a amassadura 3.....	106
Tabela 48-Ajuste para obtenção da curva de Faury s/ cimento da amassadura 4	106
Tabela 49-Granulometria da mistura obtida para a amassadura 4	107
Tabela 50-Processo de obtenção da água da amassadura 4	108
Tabela 51-Quantidades dos componentes do betão para a amassadura 4.....	109
Tabela 52- Ajuste para obtenção da curva de Faury s/ cimento da amassadura 5	109
Tabela 53-Granulometria da mistura obtida para a amassadura 5	110
Tabela 54-Processo de obtenção da água de amassadura 5	111
Tabela 55-Quantidades dos componentes do betão para a amassadura 5 por metro cúbico.....	112

1.Introdução

Este estudo insere-se no campo dos materiais de construção, nomeadamente o betão, aprofundando a compreensão dos seus constituintes e propriedades físicas, com principal incidência nos processos de formulação da composição.

Sendo o betão um material de construção amplamente utilizado em diferentes elementos estruturais, torna-se importante uma boa compreensão da sua formulação, composição, fabrico e aplicação em obra. Estes factores, conjuntamente com o surgimento de uma proposta de estudo da composição do betão de uma empresa da Região Autónoma da Madeira, com posição marcada na área de fabrico de betão, motivaram a elaboração deste trabalho.

A proposta efectuada pela empresa em questão, tinha como objectivo uma maior compreensão da composição e formulação do betão e de todos os aspectos inerentes ao fabrico do mesmo. Pretendia-se otimizar a produção, em termos de qualidade, relativamente às consideravelmente grandes oscilações registadas para betões da mesma composição, e eventualmente reduzir os custos.

Para obter uma melhor compreensão de todo o processo de fabrico, desde a sua origem, achou-se importante a realização de formulações de composições de um betão com características e desempenhos específicos. Este processo de criação de diversas amassaduras e análise dos resultados, proporcionariam o estudo de diversas patologias, que pudessem ser comuns às existentes na central de betonagem.

O betão é constituído por uma mistura de agregados de diferentes granulometrias, como a brita e areia, com um ligante hidráulico constituído por cimento, água e possivelmente adjuvantes. Na ilha da Madeira, a areia advém da extracção de camadas existentes nos leitos do mar. Sendo assim, devido à sua origem, estas contêm por vezes elevados níveis de cloretos, responsáveis pela corrosão das armaduras nos elementos estruturais.

Na ilha da Madeira, as maiores concentrações de edificações existentes, encontram-se ao longo da costa, não só por motivos históricos e económicos, mas também devido ao acentuado relevo existente nas zonas centrais da ilha. Deste modo, tendo em conta as normas portuguesas determinou-se que os betões mais adequados para serem estudados no âmbito deste trabalho seriam os de acordo com as classes de exposição ambiental XS1 ou XS3 definidas em NP EN 206-1. A primeira, é caracterizada por conter ar transportando sais marinhos mas sem contacto directo com água do mar, e a XS3 é em zonas de marés, de rebentação e de salpicos.

De acordo com a especificação LNEC 464 de 2007, relativa à norma NP EN 206-1, as classes de resistência mínimas para as classes de exposição ambiental anteriormente referidas seriam C 40/50 (XS1) e C50/60 (XS3), isto tendo em conta um cimento do tipo CEM II-A, como era o caso. Perante a possibilidade do trabalho se centrar em betões com resistências consideravelmente elevadas, foi decido em concordância com a empresa, que o betão pretendido seria da classe de resistência C30/37 e com uma classe de consistência S3. Esta opção, foi tomada tendo em conta uma perspectiva mais comercial e respeitando, de alguma forma, a crescente procura de betões com classe de resistência superior. Perante a opção da classe de resistência, a escolha da classe ambiental recaiu para a XC4 caracterizado por ser aplicado em ambiente ciclicamente húmido e seco.

A classe de consistência do betão definida, é considerada a melhor opção para a maioria dos casos na ilha, tendo em conta não só os factores de aplicação, como a utilização de bombas, mas também as distâncias percorridas entre o local de fabrico e a obra.

Neste estudo será explicado, com mais detalhe os parâmetros que influenciam a resistência à compressão, a trabalhabilidade e ainda alguns processos de formulação da composição do betão, que foram alvos de aprofundamento da parte experimental e respectiva análise. Este estudo não descurou a importância de outras características e desempenhos do betão, como por exemplo a permeabilidade do betão endurecido, entre outros, no entanto concentraram-se as atenções nos parâmetros referidos, por se tratarem de propriedades essenciais em ensaios iniciais de composições.

O objectivo principal para este estudo passa por obter uma composição de um betão com resistência adequada a pertencer à classe de C30/37 MPa e com consistência S3. Isto, respeitando os limites normativos para A/C e dosagem de cimento para a respectiva classe de exposição. A análise aos resultados das diferentes composições e amassaduras deverá ser executada numa perspectiva de optimização dos mesmos. Como objectivo secundário, surge a familiarização com as diversas normas existentes relativas ao fabrico de betão e os seus materiais constituintes e controlo de qualidade.

As análises e conclusões efectuadas neste estudo não deverão ser consideradas como factos aplicados à generalidade, mas sim, à particularidade de todas as condições envolventes neste estudo.

A dissertação está organizada em quatro capítulos cujo primeiro faz uma introdução ao tema da tese com a justificação para a realização da mesma e definição de objectivos. O segundo capítulo denominado de propriedades do betão e formulações para a sua composição, apresenta informação existente sobre o betão, nomeadamente os aspectos desenvolvidos e estudados na actividade experimental como a resistência à compressão, trabalhabilidade e formulação da composição do betão. O terceiro, descreve os trabalhos experimentais realizados no âmbito do presente trabalho, com introduções teóricas justificativas ou explicativas, apresentando os resultados e análises dos mesmos. Por fim, o quarto e último capítulo, refere as conclusões das actividades experimentais e apresenta recomendações para futuros estudos.

2. Propriedades do betão e formulações para a sua composição

O betão é um material de construção constantemente alvo de inovação, com aplicação de novos componentes. Isto de modo a otimizar o produto sob a forma de desempenhos mecânicos, redução de custos e propriedades físicas, como por exemplo o seu peso, e também facilitar a sua aplicação em obra através da autocompatibilidade do betão.

A escolha do tipo de betão é efectuada de acordo com a solução estrutural, mas também respeitando as normas existentes referentes às classes de exposição ambiental. O betão diferencia-se principalmente pela sua classe de resistência à compressão e também pela sua consistência, em que a última não é condicionante em termos estruturais, mas sim condicionante relativa à sua aplicação em obra. De acordo com as normas portuguesas, num projecto, o betão deverá ser classificado, da seguinte forma:

NP						
EN	;	Classe de	;	Classe de	;	Dimensão
206-1		resistência		exposição		máxima dos
				ambiental		agregados
				;		
				Classe de		
				cloretos		
				;		
				Classe de		
				consistência		
				;		

2.1 Resistência à compressão

O betão apresenta boa resistência à compressão e boa durabilidade, mas reduzida resistência à tracção com valores na gama dos 10% da compressão (Coutinho, et al., 1994). Esta capacidade à compressão faz com que em termos estruturais, seja potencializado esse desempenho, sendo importante a conjugação com materiais com bons desempenhos à tracção, como o aço. A rotura frágil do betão traduz-se numa má característica do mesmo. Na Figura 1 apresenta-se a relação constitutiva típica de um betão.

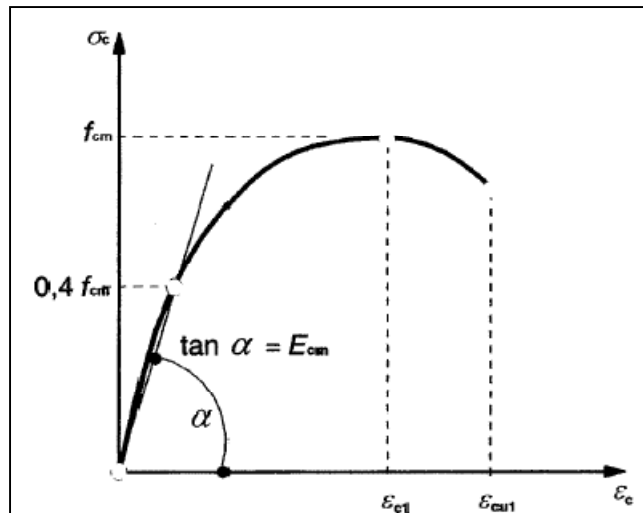


Figura 1-Representação gráfica do comportamento do betão (EN 1992-1, 2004).

Perante a importância da resistência à compressão do betão, este é classificado com base nas resistências características aos 28 dias, obtida a partir de provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura ou a partir de provetes cúbicos de 150 mm de aresta.

Consoante a massa volúmica do betão, este pode ser designado como leve (entre 800 e 2000 Kg/m³), normal (2000 a 2600 Kg/m³) e pesado (superior a 2600 Kg/m³). Contudo a sua classificação em termos de resistência à compressão, é distinta somente em dois tipos, o mais comum para betões normais ou pesados (C), e outra classificação exclusiva para betões leves (LC) (NP EN 206-1, 2007). Para betões normais ou pesados, estão indicadas na tabela seguinte as classes mais comuns de resistência à compressão, com valores característicos para provetes com as especificações anteriormente referidas.

Tabela 1-Classes de resistência mais usuais à compressão para betão de massa volúmica normal e para betão pesado (NP EN 206-1, 2007)

	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C30/37	C35/45	C 40/50	C45/55	C 50/60	
F_{ck,cyl}	16	20	25	30	35	40	45	50	MPa
F_{ck,cube}	20	25	30	37	45	50	55	60	MPa

A validação de um betão, em termos de resistência, é efectuada através dos provetes com um controlo da conformidade do betão.

2.1.1 Controlo de conformidade da resistência à compressão

O fabrico do betão numa central de betonagem requer um controlo dos resultados dos ensaios da resistência à compressão, de forma a garantir conformidade normativa (NP EN 206-1, 2007).

De uma forma geral, pode-se referir que existem critérios de aceitação do betão produzido. Esses critérios variam consoante o tipo de produção, número de resultados obtidos e especificações caso o betão seja pertencente a uma família de betões.

O critério 1 (Tabela 2) relativo à produção inicial é o critério de aceitação do betão em obra por parte de um cliente. Produção inicial é definida até se obterem pelo menos 35 resultados de ensaios num período que não exceda os 12 meses (NP EN 206-1, 2007). Após este período, é atingida produção contínua, em que a obtenção do desvio padrão presente no critério 1 para este tipo de produção, é determinado através do tratamento estatístico de pelo menos 15 resultados, após os 35 referidos.

Tabela 2-Critérios de conformidade para a resistência do betão (NP EN 206-1, 2007)

Produção	Nº de resultados de ensaios da resistência à compressão no grupo	Critério 1	Critério 2
		Média dos resultados (f_{cm}) MPa	Qualquer resultado individual de ensaio (f_{ci}) MPa
Inicial	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$
Contínua	≥ 15	$\geq f_{ck} + 1.48\sigma$	$\geq f_{ck} - 4$

Para o produtor a conformidade é obtida pelo cumprimento de todos os critérios referidos na Tabela 2 e caso o betão pertença a uma família de betões, o quadro 15 de NP EN 206-1 refere os critérios para esse tipo de caso. Analisando todos os critérios existentes referentes ao produtor, podemos afirmar que o critério condicionante será o critério 1.

É importante referir igualmente os critérios de aceitação dos ensaios iniciais de amassaduras. Para estes, devem ser feitas pelo menos três amassaduras com pelo menos três provetes de cada uma delas. A resistência de uma amassadura será a

média dos resultados dos respectivos provetes (f_{cm}). O valor obtido deverá exceder os da Tabela 1, com uma margem entre 6 e 12 MPa, consoante as condições das instalações de produção, dos materiais constituintes e da informação anterior relativa à variação dos resultados. (NP EN 206-1, 2007)

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 12 \quad (1)$$

2.1.2 Processo de cura dos provetes de betão

Para classificação do betão consoante a sua resistência (Tabela 1), o processo de cura do mesmo é executado de acordo com o indicado na NP EN 12390 parte 2, relativa à execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.

O provete deverá ficar pelo menos 16 horas, mas não mais de três dias, protegido contra choques vibrações e desidratação à temperatura de $20 \pm 5^\circ$, ou a $25 \pm 5^\circ$ em climas quentes. Após a remoção do molde, deve-se curar o provete, até imediatamente antes do ensaio, em água à temperatura de $20 \pm 2^\circ$ (Figura 2-A) ou em câmara a $20 \pm 2^\circ$ e a humidade relativa maior ou igual a 95% (Figura 2-B).

Em caso de litígio, a cura em água deverá ser o método de referência (NP EN 1097). A norma refere ainda a possibilidade de existência de outros métodos de cura do betão, desde que garantam as mesmas condições de temperatura e/ou humidade definidas.



Figura 2-Processos de cura do betão (A- Em água; B- Numa câmara)

A cura em água evita a falta de humedecimento da superfície dos provetes, que pode causar retracção plástica ou fendilhação do betão, provocando uma diminuição da resistência do mesmo. Em termos de composição do betão, uma das maneiras de evitar o surgimento destas ocorrências, é baixar a razão A/C, o que reduz a retracção de secagem e ter mais quantidade de agregados, ou seja menos cimento.

2.1.3 Factores que influenciam a resistência à compressão no betão

Existem diversos factores internos que poderão influenciar a resistência do betão como a resistência da pasta de cimento, a ligação da pasta de cimento com os agregados e a resistência dos agregados. Os factores externos são variados, dos quais se destacam os que estão relacionados com a direcção da aplicação da carga e a forma e tamanho do provete (Portland Cement Institute, 1986) .

2.1.3.1 Resistência da pasta de cimento

A resistência da pasta de cimento depende da porosidade, razão A/C, tamanho dos poros e idade (Portland Cement Institute, 1986) . Sendo o cimento um constituinte do betão, o seu tipo e características, também logicamente contribuem para uma boa resistência da pasta de cimento e conseqüentemente do betão também.

O cimento é classificado de acordo com a sua composição e requisitos mecânicos e físicos, como a resistência à compressão, tempo de início de presa e expansibilidade. De uma forma geral pode-se considerar que há vinte e sete produtos da família de cimentos correntes expressos em NP EN 197-1 (Quadro 1). A sua classificação, tal como o betão, referem capacidades de desempenho, da resistência à compressão.

A tabela seguinte indica as classes de resistência do cimento, para uma pasta formada conjuntamente com água e um A/C de 0.50. Através da mesma, podemos obter dados da influência do cimento na resistência aos 2, 7 e 28 dias. O resultado mínimo de

referência, ou seja, aos 28 dias, juntamente com o valor obtido aos 2 dias, permite designar a classificação do cimento, em termos de resistência.

Tabela 3-Resistência à compressão dos vários tipos de classe de resistência do cimento (NP EN 197-1)

Classe de resistência	Resistência à compressão em MPa			
	Nos primeiros dias		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	-		

Relativamente à escolha do cimento, este deverá possuir desempenhos que permitem potencializar a obtenção dos valores pretendidos ao longo do processo de cura do betão, quer em termos de referência como nos primeiros dias, em particular os dois primeiros dias, definidores do desenvolvimento da resistência (NP EN 206-1, 2007).

2.1.3.1 Resistência da ligação da pasta de cimento com os agregados

A interacção das partículas de agregados com a pasta de cimento causa uma redução da porosidade da mistura e introduz concentrações de tensões, devido à incompatibilidade entre o módulo elástico da pasta de cimento e dos agregados, introduz superfícies potencialmente fracas entre a pasta e os agregados. (Portland Cement Institute, 1986)

Sendo assim, uma boa resistência da ligação da pasta de cimento com os agregados torna-se importante. Esta depende da forma, da rugosidade, da porosidade e da absorção da superfície do agregado e da existência de partículas soltas e estranhas nessa superfície, bem como da resistência da pasta de cimento em si. (Coutinho, 2006)

No que se refere ao efeito da rugosidade, foram efectuados estudos por C. Perry e J.E. Gillott (Coutinho, 2006), que concluíram que a rugosidade superficial dos agregados, tem mais influência no início da propagação das fissuras do que na resistência final.

Por sua vez Mesnager (Coutinho, 2006), concluiu que pedras compactas com fraca absorção teriam uma resistência de ligação inferior a um quarto da resistência da pasta de cimento, realçando assim a importância da capacidade de absorção da superfície do agregado. Esta aderência, devido à absorção de água, que contém parte do ligante dissolvido, causa uma ligação entre o agregado e a pasta devido a uma cristalização simultânea em ambos (Coutinho, 2006) . Perante este facto, a introdução de agregados no estado seco aumentaria a absorção dos mesmos e assim também a ligação, pasta de cimento com agregado, seria mais forte, o que não é possível devido aos agregados se encontrarem num estado húmido. (Portland Cement Institute, 1986)

Para finalizar, os agregados deverão ser livres de impurezas como salitre, argila, material terroso e matéria orgânica, porque poderão encobrir as superfícies dos agregados afectando assim a ligação pasta de cimento com os mesmos. (Mindess, et al., 1981)

2.1.3.2 Resistência dos agregados

A resistência dos próprios agregados é uma propriedade muito importante, visto que estes compõem cerca de 70-80% do volume total do betão (Mindess, et al., 1981) , sendo os valores variáveis consoante a petrografia das rochas.

Na Ilha da Madeira o basalto é o material pétreo mais comum para produzir os agregados, constituintes do betão. A resistência deste tipo de rocha depende muito da sua “pureza”, ou seja, a presença de outros tipos de materiais pétreos, e também da sua porosidade. Devido aos factores anteriormente referidos, a amplitude de valores da resistência será considerável.

Segundo Bertolini e Peddefferi (1995), os valores da resistência à compressão do basalto variam entre 200 e 400 MPa (Coutinho, 1999). Foram analisados alguns

resultados de ensaios, efectuados no LREC, em basaltos oriundos de diversos locais da ilha da Madeira, para a determinação da resistência à compressão e módulos elásticos. Com os dados disponíveis, foi possível verificar que a resistência variava entre 62.6 MPa e 216.3 MPa (Anexo II). Os basaltos analisados, possuem valores superiores ao mínimo exigido em NP 1040, sendo esse 50 MPa para agregados grossos. Perante os dados obtidos e os valores de Bertolini e Pedefferi, pode-se constatar o grau de incerteza associado à definição da resistência à compressão dos basaltos.

Com estes valores de tensão de rotura a resistência do betão dependerá da resistência da pasta de cimento e da sua ligação com os agregados. De referir que o material pétreo que tiver tendência a fracturar sobre determinados planos pode limitar a resistência do betão.

2.1.3.2 Direcção da aplicação da carga

A formação de falhas, com forma laminar nas partes inferiores, ocorre principalmente nos agregados grossos. Isto acontece devido à retenção de água, que seria alvo de exsudação, aumentando assim a razão A/C nas partes referidas, tornando o betão anisotrópico em relação à sua resistência.

A exsudação traduz-se na tendência da água separar-se dos outros constituintes, por ser um material mais leve. Assim, a água, após a colocação do betão, tem tendência a subir até à superfície, formando uma película de água, sendo este processo um caso particular da segregação. (Coutinho, 2006) Esta retenção de água referida surge também nas superfícies inferiores das armaduras. Perante estas ocorrências, o betão tem por vezes a tendência de se comportar como um material composto por camadas horizontais com resistência à compressão inferior nesses planos (Portland Cement Institute, 1986) (Coutinho, 2006). Sendo assim, a aplicação da carga nesses planos horizontais referidos, poderá causar uma diminuição da resistência à compressão do betão (Figura 3).

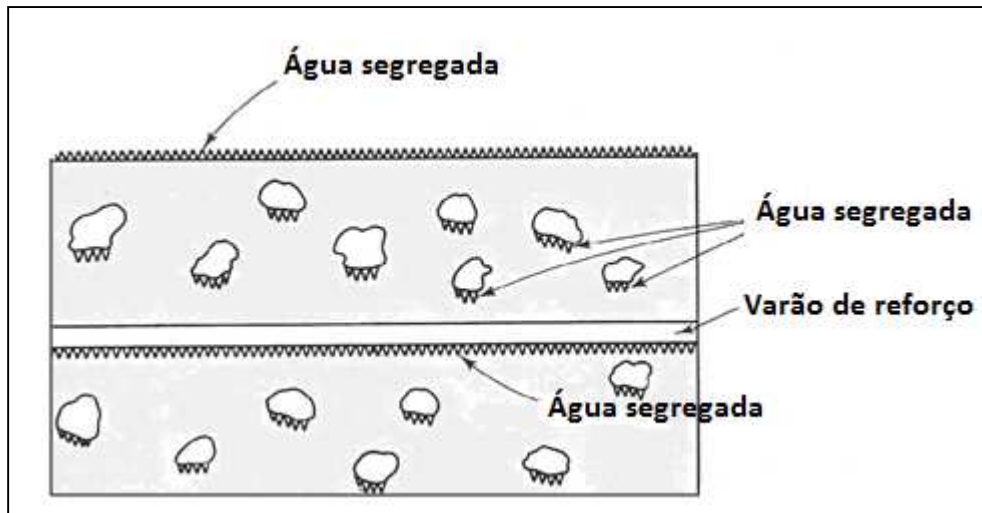


Figura 3-Exsudação no betão (adaptado de (Mindess, et al., 1981))

2.1.3.3 Forma do provete

Como foi possível verificar na Tabela 1, existe uma variação da resistência consoante a forma do provete a ensaiar. De uma forma muito simples, pode-se dizer que as placas que efectuam a compressão na máquina de ensaios, provocam um confinamento por atrito, em que quanto mais curto for o provete, maior será o valor obtido para a resistência. (Portland Cement Institute, 1986)

2.2 Trabalhabilidade

A maior ou menor facilidade com que o betão é transportado, colocado, compactado e acabado, e a maior ou menor facilidade com que se desagrega ou segrega durante estas operações é designado pelo termo genérico de trabalhabilidade (Coutinho, 2006). Associado a este conceito, existem outras designações como mobilidade, consistência e plasticidade:

- A terminologia de mobilidade é atribuída ao betão plástico, da mesma forma em que a fluidez é aplicada aos líquidos, ambos relacionados com a viscosidade. (Portland Cement Institute, 1986)

- A consistência do betão é mais associada ao facto da mistura ser mais ou menos seca, embora seja frequentemente usada como medida no ensaio de referência slump. (Portland Cement Institute, 1986)
- A plasticidade do betão é caracterizada pela capacidade de este manter a sua continuidade, ou seja sem rotura, durante o processo de moldagem. (Portland Cement Institute, 1986)

A obtenção da trabalhabilidade desejada é dificultada devido à existência de diversos factores. Assim, a sua medição não está restrita a um método, sendo o mais usado o ensaio de abaixamento. Em termos normativos (NP EN 206-1 2007), a trabalhabilidade é classificada de acordo com os resultados obtidos nos ensaios. A norma contempla classificação para os ensaios de abaixamento, Vêbê, compactação e espalhamento.

2.2.1 Ensaio de abaixamento do cone de Abrams (slump)

O procedimento deste ensaio consiste na colocação da amostra de betão no molde cónico em três fases. Em cada camada (terço do volume total do cone) é efectuada uma ligeira compactação através de apiloamento com um varão com 50 a 60 mm de comprimento e uma secção transversal de 2 a 3 cm².

A compactação é efectuada com 25 pancadas de forma espiral, ou seja, da periferia para o centro de uma maneira circular. Na segunda camada as pancadas deverão penetrar somente a camada em questão. Compactando a última camada o betão é nivelado até à altura máxima do cone.

A etapa final deste ensaio consiste na remoção do molde na vertical e sem torções, apurando a diferença da altura do molde e o centro do topo superior do betão deformado. O ensaio é válido se for obtido um abaixamento simétrico nos dois eixos, e caso isto não se verifique, é considerado com um assentamento deformado tornando assim necessário repetir o ensaio. Se por ventura houver dois ensaios consecutivos deformados pode-se concluir que este ensaio poderá não ser o mais indicado para definir a trabalhabilidade do betão em causa. (Coutinho, 2006)

A operação total de enchimento e retirada do molde não deve ultrapassar os 2 minutos e meio. Este ensaio é o mais utilizado devido à sua simples e rápida execução. Este procedimento é efectuado logo após a sua produção, na central de betonagem, e também é muito utilizado no acto de recepção do material no próprio local de obra a fim de garantir a conformidade e qualidade do produto requisitado. A amplitude dos resultados possíveis neste ensaio resulta na classificação de trabalhabilidade indicada na tabela seguinte.

Tabela 4-Classes de consistência relativas aos resultados do ensaio de abaixamento

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

A escolha da classe de consistência, vai depender de diversos factores 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.

Este ensaio apresenta algumas desvantagens por se tratar dum ensaio estático, cujos resultados são influenciados pela tixotropia (aumento aparente da viscosidade) do betão, também não é indicador da facilidade de transporte e efeitos de compactação por vibração (Rodolpho, 2007).

2.2.3 Factores que afectam a trabalhabilidade

Como referido anteriormente, existem diversos factores que poderão influenciar a obtenção da trabalhabilidade pretendida. Estes se baseiam essencialmente nas características dos agregados, como o tamanho, a forma, a rugosidade e a porosidade, e também na quantidade de água presente na mistura, principalmente na pasta de

cimento. As condições ambientais no qual é fabricado o betão também podem condicionar a trabalhabilidade.

Os agregados com formas cúbicas ou esféricas proporcionam melhores resultados do que as partículas laminares ou achatadas, sendo as últimas causadoras do fenómeno descrito na influência da direcção da carga na resistência do betão (Coutinho, 2006) (Portland Cement Institute, 1986) (Mindess, et al., 1981).

O grau de rugosidade da superfície da partícula influi igualmente na trabalhabilidade, tendo os agregados com superfície lisa melhores resultados dos que têm superfície rugosa, como é o caso dos agregados britados. A rugosidade é associada ao termo de ângulo de atrito interno. (Portland Cement Institute, 1986) (Coutinho, 2006) (Mindess, et al., 1981)

O teor de água existente numa mistura é importante para garantir alguma fluidez ao betão fresco. Sendo assim, a quantidade da pasta de cimento e sua razão A/C são condicionantes, pois deverá haver quantidade de pasta suficientemente hidratada para cobrir toda a superfície específica dos agregados. Um excesso de água poderá causar efeitos de segregação ou exsudação (Mindess, et al., 1981).

Uma mistura maioritariamente composta por agregados finos deverá necessitar duma maior quantidade de pasta de cimento devido à superfície específica dos agregados ser maior do que a dos agregados grossos. Contudo devido às areias possuírem comportamentos, normalmente comparados à fluidez, deverá existir uma percentagem mínima de areia ideal numa mistura, mas com a excepção desta não possuir uma granulometria extremamente fina (Portland Cement Institute, 1986) . Por outro lado um excesso de finos, tornará a mistura mais permeável, apesar do aumento da trabalhabilidade. A falta destes fará com que o betão fresco possua um aspecto áspero ou granular que poderá contribuir para o surgimento de efeitos de segregação e dificuldades de obtenção de bons acabamentos. A presença de outros materiais finos, como a silte e argila, fará que seja necessário um aumento da quantidade de água, e a presença de matéria orgânica poderá interferir com o processo de hidratação do cimento (Mindess, et al., 1981).

O aumento da proporção de agregados em relação à quantidade de cimento, em que a razão A/C se mantém constante, causará uma diminuição da trabalhabilidade desejada. (Mindess, et al., 1981)

Por outro lado, agregados demasiado grossos poderão provocar o caso denominado por interferência das partículas (particle interference). Isto ocorre quando a distância entre duas partículas maiores não é suficiente para permitir a passagem de partículas de menor dimensão entre elas. O arranjo das partículas grossas secas não é o melhor, surgindo assim mais vazios, devido à fricção das partículas em contacto. Se as partículas se encontrarem molhadas, estarão de alguma forma lubrificadas, possibilitando um melhor ajustamento das partículas entre si, mas a interferência das partículas continua a ser elevada devido aos diversos pontos de contacto entre as mesmas. Para ajudar a diminuir esta ocorrência é adequado aumentar a quantidade de pasta de cimento de forma a forçar um maior afastamento entre as partículas, aumentando assim a lubrificação dos agregados. (Portland Cement Institute, 1986)

A grande presença de porosidades, na sua quantidade ou tamanho, poderão influenciar na quantidade de água disponível para o ligante hidráulico visto que o volume de água alojado nos poros não produz efeito na trabalhabilidade. (Mindess, et al., 1981)

Finalmente as condições ambientais como a temperatura e humidade poderão influenciar no processo de presa do betão, provocando um decréscimo no tempo de presa no caso de altas temperaturas. A temperatura condicionará a taxa de evaporação e hidratação do betão (Mindess, et al., 1981) .

2.3 Classe de exposição ambiental

Com o objectivo, de não só garantir a segurança estrutural, mas também a durabilidade, o tempo de vida útil de uma estrutura está directamente relacionado com a capacidade de resistência da mesma aos factores ambientais envolventes. A escolha da classe de exposição ambiental é condicionante na definição das outras que ajudam a estabelecer o betão pretendido, como a classe de resistência à compressão.

Em termos de dimensionamento, as classes de exposição ambiental permitem definir recobrimentos mínimos consoante a perigosidade de degradação das armaduras e do betão.

Estas classes estão divididas em 6 grupos distintos, relativos ao tipo de deterioração existente, sendo as designações XC sujeitas a betão sob acção de dióxido de carbono, XS e XD por cloretos, XF por acção dos ciclos de gelo/degelo, XA para ataques químicos e X0 quando não existe risco de corrosão de metais ou ataque ao betão. Para cada designação previamente referida, existem especificações para cada condição ambiental onde será colocado o betão.

2.4. Classe do teor de cloretos

O teor de cloretos de um betão é determinado em percentagem de iões cloreto por massa de cimento usada, e é definido com classificação correspondente ao valor máximo permitido consoante a utilização do betão a ser empregue. Esta utilização é definida consoante a existência ou não de armaduras, e se estas são de aço ou de outros metais embebidos, ou ainda em aço de pré-esforço.

As armaduras ordinárias permitem máximos de 0.2 ou 0.4 % (NP EN 206-1, 2007), sendo as classes correspondentes, Cl 0.2 ou Cl 0.4, de acordo com o explicado anteriormente. Como já referido o betão armado poderá se deteriorar por acção dos cloretos proveniente do contacto com as envolventes ambientais, sendo assim extremamente importante reduzir o teor de cloretos presente no próprio compósito, o betão.

2.5 Formulação da composição do betão

Existem diversas maneiras de formular um betão, sempre referentes aos agregados, das quais existem métodos de proporções dos componentes, métodos que utilizam como referência a superfície específica dos agregados e outros, sendo a analisada neste trabalho, os métodos de curvas de referência. Para produzir o betão desejado é

necessário obter uma formulação ideal das percentagens de cada componente da mistura. Através das normas portuguesas existentes (LNEC 464-2005 relativa à norma NP EN 206-1), são estabelecidos os valores mínimos de quantidade de cimento por unidade de volume (m³) e limites da razão de água/cimento relativamente à classe de exposição escolhida. Para as classes de exposição, há uma classe de resistência mínima, onde se torna necessário determinar a quantidade de água de amassadura, propriedades granulométricas e físicas dos agregados, entre outras.

A formulação do betão permitirá estabelecer as percentagens (e massas) de cada agregado e de água de amassadura, que adicionando o cimento e eventualmente adjuvantes, constituirá a mistura denominada de betão.

Um parâmetro que é igualmente importante definir, é a dimensão máxima do agregado, cuja definição é fundamental tendo em conta a futura aplicação do betão em obra. Um dos exemplos dessa apreciação é adoptar uma máxima dimensão do agregado tendo em conta o espaçamento das armaduras (superiores). Um espaçamento mais reduzido que a máxima dimensão do agregado presente no betão, poderá criar um efeito de segregação, não garantindo a homogeneidade da mistura no betão, comprometendo assim o seu desempenho. O valor escolhido para este parâmetro deverá ser o correspondente ao peneiro máximo, que define a classe do agregado mais grosso da mistura.

2.5.1 Dados necessários dos agregados

Para que o processo de determinação das percentagens de cada agregado seja mais acertado, é necessário ter em conta certas propriedades dos diversos agregados que serão constituintes do betão. Essas propriedades ou características são a massa volúmica das partículas, a baridade e a granulometria (Mindess, et al., 1981) (Coutinho, 2006). Quanto à água de amassadura, os parâmetros de capacidade de absorção e teor de humidade presentes nos agregados contribuem para uma quantificação mais correcta.

2.5.1.1 Massa volúmica

É uma característica física do agregado que relaciona a sua massa com o volume. A análise deverá ser efectuada com partículas individuais e não a massa agregada em conjunto, evitando contabilizar assim os vazios existentes entre as partículas. Sendo assim a determinação do volume de uma partícula é definido por uma membrana correspondente a uma limitação da periferia, de forma a ter em conta a existência de porosidade que possibilita a penetração de água ou cimento. (Coutinho, 2006)

Para efeitos de composição do betão, o agregado não deverá ser analisado com uma partícula seca, mas sim saturada com água no interior. Isto evita que os poros em contacto com o exterior, absorvam a água da pasta de cimento, não contribuindo para as reacções de hidratação, que influenciaram a trabalhabilidade nos primeiros instantes. Sendo assim, o ideal será obter a massa volúmica correspondente às partículas saturadas mas com a superfície seca, evitando que haja excesso ou falta de água, relativamente à quantidade desejada de água de amassadura. (Coutinho, 2006)

O ensaio que determina as massas volúmicas dos agregados está normalizado NP EN 1097-6, e será explicado com algum detalhe em 3.1.1.

2.5.1.2 Baridade e volume de vazios

Como referido anteriormente a massa volúmica determinada é referente ao volume de uma partícula individual, e num conjunto de agregados, à soma dos volumes das partículas. (Coutinho, 2006)

Numa amostra de agregado, o volume total da mesma corresponde ao volume das partículas e dos vazios entre estas, devido ao facto de ser fisicamente impossível um arranjo das partículas de modo a não haver vazios. Sendo assim é denominado de baridade, a massa de uma amostra de agregado por volume total correspondente. (Coutinho, 2006)

De uma maneira intuitiva pode-se afirmar que o volume de vazios está associado ao grau de compactação possível, dependente da forma e tamanho dos agregados. Uma amostra de agregado que possua uma granulometria extensa facilitará a obtenção de uma boa compactação.

A determinação deste parâmetro é influenciada pelo facto da existência ou não de compactação por apiloamento, de forma a registar o volume para uma determinada massa. (Coutinho, 2006)

2.5.1.3 Granulometria

A granulometria dos agregados é extremamente importante na determinação das percentagens parciais do material sólido a compor a mistura de betão. Esta propriedade do agregado em conjunto com a resistência, são consideradas as mais importantes para poder efectuar uma composição do betão, pois permitem efectuar uma análise inicial, que servirá de base para ajustes tendo em conta as outras propriedades referidas. (Coutinho, 2006)

O processo de recolha da amostra para a qual será feita a granulometria que classificará o agregado, está normalizada para uma amostra inicial do local de armazenamento, e também através de esqueteamentos em laboratório até obter a quantidade desejada para realizar o ensaio. Isto tudo de forma a poder garantir a mesma granulometria que caracterizará e classificará o agregado.

Define-se por granulometria a distribuição das percentagens das partículas de determinadas dimensões que compõem o agregado (Coutinho, 2006). Essa distribuição é determinada com a utilização de uma série de peneiros com diferentes aberturas de malhas, em que através do material retido em cada um deles, é possível estabelecer a quantidade, em percentagem, das diversas dimensões das partículas existentes no agregado. Com esses valores percentuais correspondentes a cada peneiro, é possível obter a representação das curvas granulométricas.

A escolha da série de peneiros a utilizar é de acordo com o quadro 1 de EN 12620. Esta norma uniformiza as séries de peneiros em termos europeus, e inclui a série base, a

um e a dois, sendo possível utilizar em conjunto sempre a série base com a um ou a dois, e nunca juntas.

A obtenção das curvas granulométricas permitem averiguar a dimensão mínima e máxima do agregado que permitem uma classificação do mesmo, como por exemplo a brita 11-22. No caso, deste exemplo de classificação da brita, significa que esta possui valores granulométricos inferiores a 10 % no peneiro acima de 22 mm, e também, inferiores a 5% no peneiro abaixo do 11 mm. Outro parâmetro que a granulometria permite também obter, é o módulo de finura (2) que pode ser considerado como a dimensão média ponderada dos peneiros do grupo ao qual é retirado o material (Coutinho, 2006). Este tem uma aplicação muito útil no método das curvas de referência. O somatório do material retido é efectuado pela utilização dos valores dos peneiros com relação entre eles do dobro, ou seja, 0.063,0.125,0.250, 0.5 e assim sucessivamente.

$$m = \frac{\sum \% \text{ material retido acumulado}}{100} \quad (2)$$

O método de cálculo do módulo de finura pode diferenciar do indicado, existindo assim um processo mais detalhado e exacto de obter este parâmetro, que de alguma forma caracteriza os agregados.

Ao contrário da utilização somente dos valores dos peneiros com a relação indicada anteriormente, o LREC e as duas empresas consultadas para a realização deste estudo, utilizam um método que possibilita a utilização de todos os peneiros que foram utilizados para efectuar a granulometria dos agregados. É possível compreender que, quanto maior for o número de peneiros utilizados para definir a granulometria, mais acertada será a mesma. Sendo assim torna-se igualmente importante determinar o módulo de finura com todos os dados disponíveis, de forma a ser compatível com a granulometria apresentada.

Para isto é criado um parâmetro que indica a relação entre o peneiro de referência, o primeiro (0.063 mm), e todos os peneiros seguintes, através de um logaritmo de base 2 da razão dos peneiros (3). Com este parâmetro é possível determinar o módulo de

finura, relacionando com a percentagem de material retido não acumulado para cada peneiro correspondente (4).

$$i_n = \log_2 \frac{\text{Peneiro } n \text{ mm}}{0.063 \text{ mm}} \quad (3)$$

$$m = \frac{\sum(i_n \times \% \text{ retidos}_n)}{100} \quad (4)$$

Comparando os dois métodos de cálculo do módulo de finura, (2) e (4) anteriormente referidos, pode-se prever que se obterão valores superiores para o módulo de finura utilizando a (4), em que a utilização de todos os peneiros tem mais influência do facto de serem resultados não acumulados.

Apesar de infelizmente não ter sido encontrada referência bibliográfica que sustente a descrição do método anterior, achou-se importante a referência do mesmo neste estudo, por ser como já referido, amplamente usado em empresas privadas e públicas certificadas, como é o caso do LREC.

2.5.1.4 Absorção

A absorção está dependente da existência de porosidades nos agregados, que serão ocupadas por água (por absorção), ficando assim os poros saturados, ou seja, sem vazios no seu interior.

A importância da obtenção deste dado deve-se ao facto deste poder influenciar a resistência do betão, em particular na resistência da ligação da pasta de cimento com o agregado, e também a trabalhabilidade, por alterar a quantidade de água desejada no ligante hidráulico.

A perda da trabalhabilidade devido à absorção tem maior influência nos primeiros quinze minutos, devido a absorções instantâneas dependentes do grau de saturação em que os agregados se possam encontrar. Após este período a perda, torna-se menos

significante. Normalmente as rochas sedimentares poderão atingir absorções superiores a 5% e as eruptivas ou metamórficas 1 a 2 %. (Coutinho, 2006)

O ensaio que permite a obtenção dos valores de absorção, tem a mesma referência normativa do que o das massas volúmicas, ou seja, o NP EN 1907-6.

2.5.1.5 Teor de humidade

Este parâmetro é definido em percentagens relativamente a uma razão entre a massa do agregado no seu estado natural (húmido) e massa seca, e permite determinar a quantidade de água existente nos agregados devido a humidade. Este parâmetro varia muito, dependente por exemplo das condições de armazenamento associadas às meteorológicas. Por estas razões é aconselhado que seja determinado frequentemente.

Este parâmetro é extremamente importante para a quantificação da amassadura, principalmente em relação aos agregados finos como as areias, onde o teor de humidade é substancialmente superior ao volume de água retida no interior do agregado. O ensaio de determinação deste parâmetro está estabelecido em NP EN 1097-5.

Para uma melhor compreensão da relação entre a absorção e a humidade, figura seguinte representa quatro estados de humidade existentes. O primeiro estado referente à partícula seca em estufa, os seus poros encontram-se totalmente vazios, enquanto a secagem ao ar livre, possibilita a saturação dos poros. A saturação com superfície seca do agregado, representa que todos os poros estão cheios de água, situação idêntica ao último estado, em que a diferença reside na existência duma película de água na superfície. Os diferentes estados de humidade das partículas permitem quantificar a capacidades de absorções e teor de humidade das partículas.

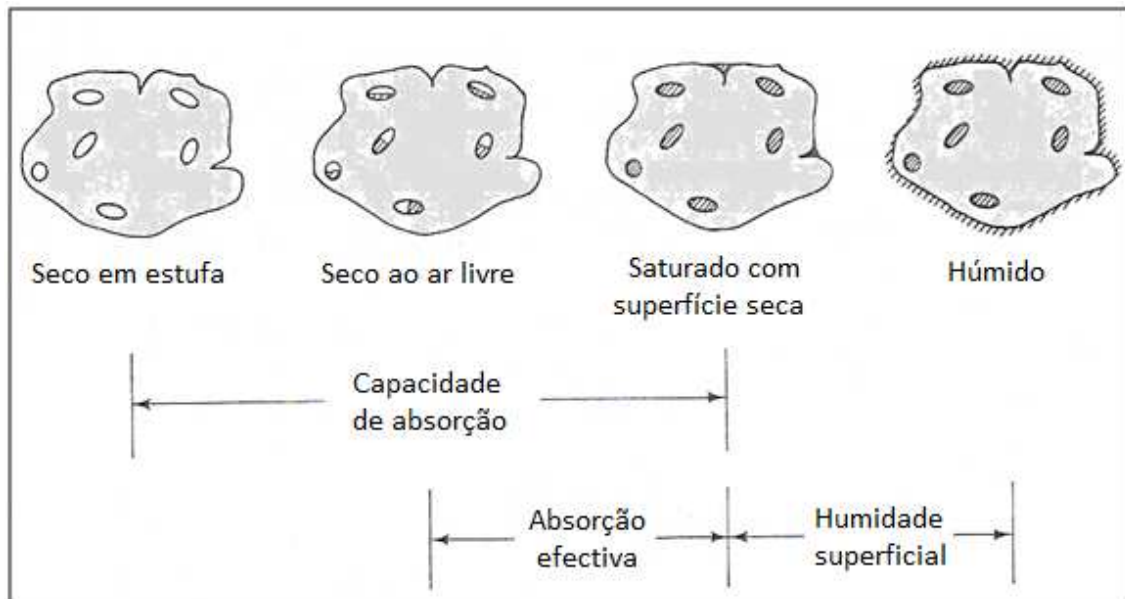


Figura 4-Representação dos diversos estados de humidade dos agregados

2.5.2 Método das curvas de referência

Este método tem como base uma análise das curvas granulométricas dos diferentes agregados que serão incorporados na mistura, através da criação de curvas de referência como a de Faury, Bolomey e Joisel. Estas curvas têm como objectivo principal garantir uma composição granulométrica extensa de forma a garantir o máximo de compactabilidade possível, reduzindo assim o índice de vazios existente. As curvas de referência também são definidas, tendo em conta a trabalhabilidade do betão, incluindo todos os componentes sólidos, ou seja, o cimento e os agregados.

2.5.2.1 Curva de Faury

Esta curva de referência é constituída pela determinação de três coordenadas, formando assim dois segmentos de recta. As ordenadas (percentagens) têm uma escala linear, e as abcissas são de acordo com uma escala proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas. As dimensões das partículas consideradas para a criação

desta curva deverão ser entre 0.0065 mm e a dimensão máxima do agregado. A determinação dessas três coordenadas é efectuada da seguinte forma:

- Na dimensão mínima do agregado é atribuída uma percentagem de material não retido de 0 %.
- Para a dimensão máxima do agregado é atribuído o valor de 100 %
- A percentagem correspondente à metade da dimensão máxima do agregado é determinada através da fórmula seguinte:

$$P_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D}-0.75} \quad (5)$$

Onde A e B são parâmetros relacionados com trabalhabilidade e a potência de compactação referidos na Tabela 5, R é o raio médio do molde, da peça ou da zona a betonar e D a dimensão máxima do agregado. A razão $\frac{R}{D}$ toma valor de 1, para efeitos de desprezo do efeito de parede. Este consiste no facto do volume de vazios entre uma superfície e as partículas compactadas contra a mesma, ser superior ao volume de vazios existente entre os agregados. (Coutinho, 2006)

Tabela 5-Valores dos parâmetros A e B da curva de Faury (Coutinho, 2006)

Trabalhabilidade	Valores de A			Valores De B	Medição do Abaixamento do cone de Abraams (mm)	Classe de consistência
	Areia rolada		Areia britada Grosso britado			
	Grosso rolado	Grosso britado				
Terra húmida	≤ 18	≤ 19	S1	1	-----	Não definido
Seca	20 a 21	21 a 22	S2/S3	1 a 1,5	-----	Não definido
Plástica	21 a 22	23 a 24	S4/S5	1,5	0 a 40	S1
Mole	28	30	32	2	40 a 150	S2/S3
Fluida	32	34	38	2	>150	S4/S5

Tabela 6- Classificação de trabalhabilidade de Faury consoante tipo de compactação
(Coutinho, 2006)

Trabalhabilidade	Metodologia Da Compactação
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)
Plástica	Vibração média
Mole	Apiloamento
Fluida	Espalhamento e compactação pelo próprio peso

2.5.2.2 Curva de Bolomey

Esta curva de referência pode ser utilizada em alternativa à curva de Faury, dependendo de menos parâmetros. Em semelhança com a curva anterior (Faury), o parâmetro D corresponde à dimensão máxima do inerte e o valor de A varia com a dosagem de cimento, forma do inerte e trabalhabilidade tabelados.

A percentagem do volume absoluto da totalidade do material sólido, ou seja agregados e cimento, é definida em relação a uma inferior à dimensão d. Esta curva poderá ser definida através de diversos valores de d, ao invés da curva de Faury, em que se obtém somente percentagens para D e D/2 (6)

$$p = A + (100 - A) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (6)$$

Tabela 7-Valores do parâmetro A da curva de Bolomey

Natureza do Agregado	Trabalhabilidade		
	Terra húmida e seca (Vêbê > 10)	Plástica e mole (Vêbê <10) (Abaixamento <15 cm)	Fluida (Abaixamento > 15 cm)
Rolado	6-8	10	12
Britado	8-10	12-14	14-16

2.5.2.3 Curva de Joisel

Para poder obter a curva de Joisel, é necessário obter a compacidade de cada agregado, para além das habituais curvas granulométricas. O nível de compacidade dependerá de diversas variáveis como o tipo (intensidade) de compactação utilizada, a forma das partículas, as dimensões máximas, entre outros. A compacidade, segundo Joisel, varia entre 0.52 e 0.70 e aplica sómente a partículas com dimensões superiores a 0.2 mm, o efeito parede anteriormente referido (Coutinho, 2006).

A elaboração da curva é mais complexa do que a de Faury ou Bolomey, sendo determinada em função da compacidade do agregado. O método consiste na determinação de comprimentos de segmentos de recta que compõem a escala das abcissas, ao contrário das anteriores em que as escalas são fixas e a recta é determinada através de pares de dados (Coutinho, 2006).

Explicando com mais detalhe, a escala das ordenadas é relativa à percentagem do volume absoluto do agregado na escala linear. Por outro lado, a escala das abcissas, como já referido, é composta por três segmentos de recta O-A, A-B'' e B''-C''. A determinação do comprimento destes segmentos é feita através da consulta de ábacos existentes. Para o segmento O-A, o ábaco depende da máxima dimensão do agregado e do produto da massa volúmica do cimento pela percentagem de água da pasta normal. Em seguida, na escala das abcissas, A-B'' depende da compacidade e dimensão das partículas em mm, e representa as abcissas entre o zero, ou seja a origem (A), e a

metade da dimensão máxima. Finalmente, o segmento de recta B''-C'' depende da compacidade do agregado primário e da relação entre o raio médio das partículas de maiores dimensões e o raio médio do molde, que origina na obtenção da razão B''C''/OB''. Conhecendo previamente OB'', obtêm-se o comprimento do segmento desejado, completando assim a escala das abcissas (Coutinho, 2006).

A Figura 5 possibilita uma melhor compreensão da elaboração da curva de Joisel com os segmentos de recta anteriormente referidos.

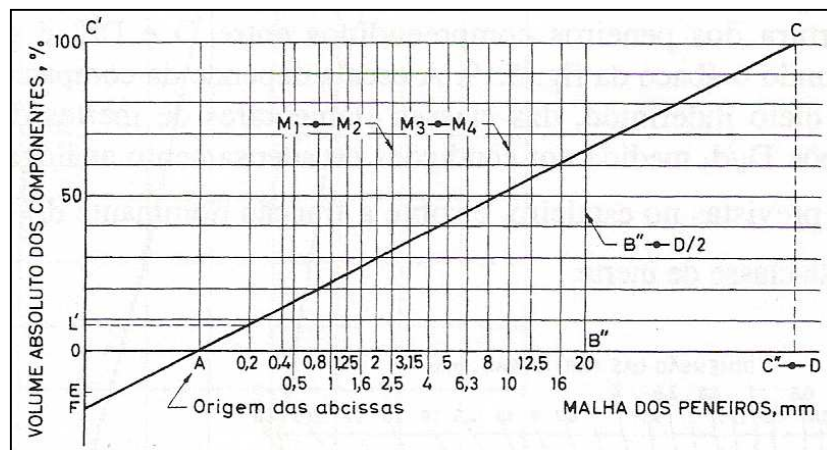


Figura 5-Representação da curva de Joisel

Este tipo de curva, tal como as anteriores, privilegia um afastamento ascendente de partículas finas, compensado com um decréscimo na zona das partículas grossas (Coutinho, 2006) (Portland Cement Institute, 1986).

2.5.3 Análise das curvas de referência

Com a curva de referência e as curvas granulométricas de cada agregado são estabelecidas as percentagens de cada agregado a serem utilizadas na mistura, e o cálculo do módulo de finura da mesma. São efectuados ajustes nas percentagens dos agregados a fim de igualar o módulo de finura da composição com o da curva de referência. Existem métodos gráficos ou analíticos para efectuar esses ajustes. Cada um destes tem em conta duas condições fundamentais, em que uma é relativa à soma das percentagens de cada agregado, mais a do cimento ser igual a 100 % (7), e

também que a soma dos produtos entre os módulos de finura de cada agregado com a percentagem do mesmo, tem de ser igual ao módulo de finura da curva real. (8)

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n + c = 1 = 100\% \quad (7)$$

$$m_1 p_1 + m_2 p_2 + \dots + m_n p_n = m_0 \quad (8)$$

1) Método por tentativas (analítico)

O método consiste na intersecção de segmentos de recta com a curva de referência escolhida. Os segmentos de recta são criados pela união das dimensões máximas e mínimas dos agregados (classe), que depois permitem obter as percentagens de cada agregado. Este método não é muito prático devido à existência de sobreposições ou omissões de dimensões nos peneiros, que implica a obtenção das percentagens como um processo mais difícil, em que partindo de proporções determinadas são efectuadas tentativas ou ajuste até se obter as percentagens mais correctas.

2) Método dos mínimos quadrados (analítico)

Este método consiste na criação dum sistema em equações (9), correspondente ao nº de peneiros utilizados na obtenção das curvas granulométricas dos agregados, com n incógnitas referentes ao número de diferentes agregados utilizados na composição do betão. O primeiro índice é referente ao agregado e o segundo ao peneiro utilizado. As últimas duas equações presentes no sistema indicado (9), tem origem numa majoração das equações (7) (8), por estas serem consideradas condições fundamentais, logo a sua importância transcende todas as outras. A majoração sugerida é de 1000 vezes maior que a equação original.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 n_1 = g_{11}p_1 + 100p_2 + \dots + 100p_n \\
 n_2 = g_{12}p_1 + g_{22}p_2 + \dots + 100p_n \\
 n_m = g_{1m}p_1 + g_{2m}p_2 + \dots + g_{nm}p_n \\
 1000 = 1000p_1 + 1000p_2 + \dots + 1000p_n \\
 1000 m_0 = 1000m_1p_1 + 1000m_2p_2 + \dots + 1000m_np_n
 \end{array} \right. \quad (9)$$

Por se tratar de uma resolução matemática dependente apenas dos dados iniciais e alguns cálculos intermédios como o do módulo de finura, é possível criar uma automatização em termos informáticos, ao invés de outros métodos mais “visuais” recorrendo à análise dos gráficos e ajustes. Com este processo matemático será obtido os valores de n_1, n_2, n_m correspondentes às percentagens de cada agregado.

3) Método gráfico

Este método é o de mais simples execução devido a não recorrer a cálculos, sendo apenas uma “construção” geométrica do gráfico obtido pela sobreposição de todas as curvas granulométricas, dos agregados e de referência. Neste método surgem três situações distintas entre curvas granulométrica, em que pode haver ou não continuidade e sobreposição.

A Figura 6 indica o caso da existência de continuidade de granulometria entre a dimensão máxima de um agregado e a mínima de outro, que é seguinte na escala de granulometria. As determinações das percentagens parciais são efectuadas tendo em conta esses dois pontos, como no caso de d_1 e D_2 da figura 6, que são coincidentes na abcissa (que corresponde à dimensão mínima do agregado 1 e a máxima do segundo respectivamente). A intersecção desta recta com a curva de referência define a percentagem do agregado 1.

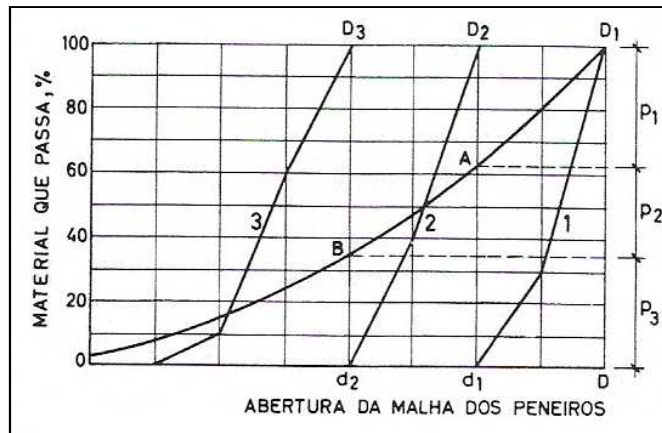


Figura 6-Método gráfico para curvas granulométricas não sobrepostas

A Figura 7 representa os casos da existência de descontinuidade ou sobreposição. Quando o valor da abcissa dos dois pontos não é igual, a construção geométrica terá de ser diferente. No caso da Figura 7 onde há sobreposição dos agregados 1 e 2, a recta paralela ao eixo das coordenadas deverá ser feita de modo a que a área *a* seja igual ao triângulo *b*. A outra possível situação ilustrada na Figura 7, é a descontinuidade existente entre D_3 e d_2 , sendo a recta traçada na abcissa corresponde à média geométrica das abcissas referidas, ou com pequeno erro, à média aritmética.

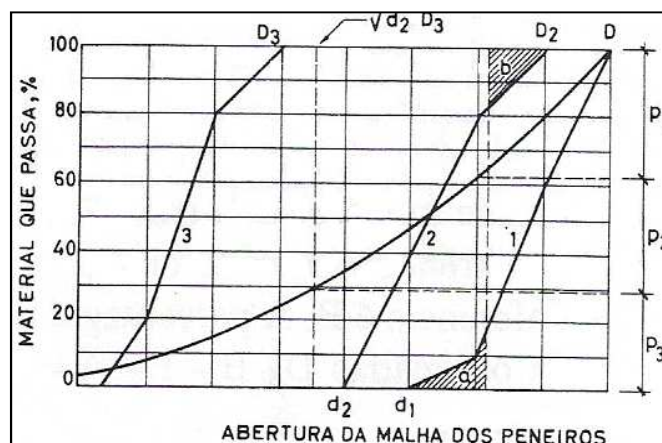


Figura 7-Método gráfico para curvas granulométricas descontínuas ou sobrepostas

O método gráfico, ao contrário do método dos mínimos quadrados, não relaciona os módulos de finura como na equação (3), para obter as percentagens. Sendo assim, *no*

final o módulo de finura da mistura obtida, poderá não coincidir com o da curva de referência. Por esse facto há necessidade de efectuar ajustes, de modo a obter o módulo de finura desejado. Estes ajustes nas percentagens de cada agregado poderão ser proporcionais à diferença entre os dois valores das finuras obtidas, ou modificar apenas os agregados de classes mais extremos.

2.5.4 Alteração da composição

Os métodos anteriormente referidos permitem obter uma composição “base” do betão. Como foi possível denotar, não há nenhum parâmetro directo que permita afirmar com exactidão o valor da resistência do betão, para o qual foi efectuada a composição.

A determinação da composição do betão é um processo iterativo, em que são efectuados ensaios de determinação de resistência à compressão e consistência. Perante comparação entre os resultados obtidos e os pretendidos, são efectuados ajustes até à obtenção dos desempenhos pretendidos. Estes ajustes à composição base formulada, podem ser a introdução de adjuvantes, alteração da dosagem de cimento e razão água/cimento, sempre tendo em consideração os limites máximos e mínimos definidos nas normas, e de acordo com a classe de exposição ambiental do betão pretendido.

Normalmente o aumento da dosagem de cimento, implica um conseqüente acréscimo da resistência do betão, devido a fortalecer o ligante hidráulico dos agregados. A optimização do betão, também passará por incorporar adjuvantes na composição do betão, com função de retardar a presa (relacionado com a consistência) ou também reduzir a quantidade de água, equilibrando a razão A/C, aumentando assim a resistência.

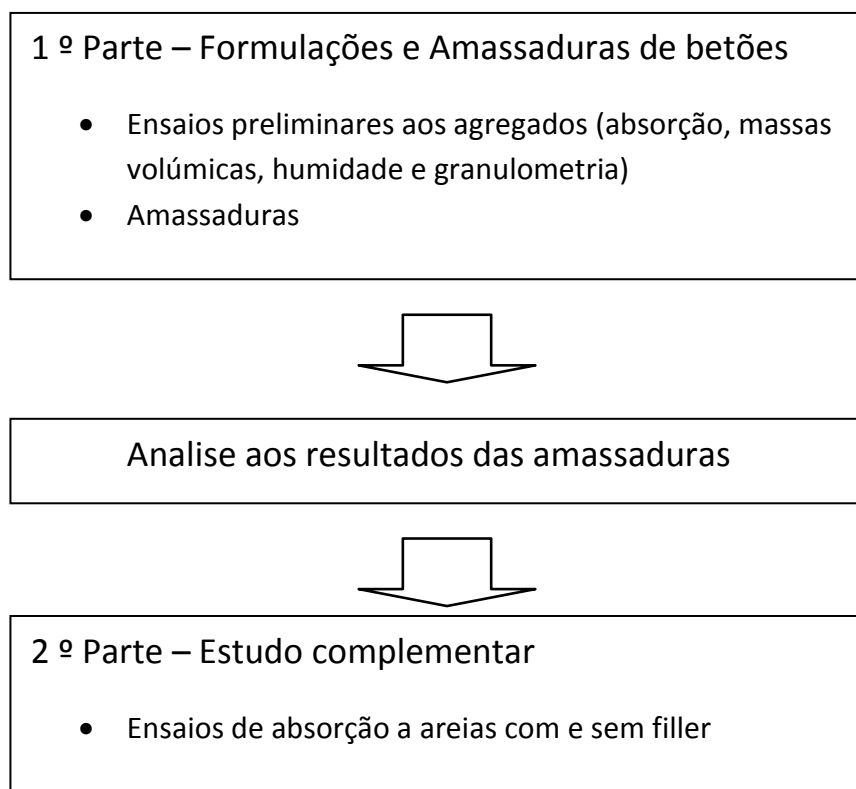
A quantidade de adjuvantes a utilizar também será iterativa, tendo como base de partida, as recomendações do fornecedor, a experiência e conhecimento de todos os elementos da composição e interacção entre eles.

A composição final escolhida para a produção e comercialização, de um betão com determinadas características, poderá ser feita com a criação de critérios de escolha, consoante os desempenhos do betão no estado fresco e endurecido, e também os custos das mesmas. A cada componente de avaliação referida será atribuída uma majoração, de acordo com os interesses pessoais, sendo obtida uma classificação que auxiliará na escolha final (Concrete Mix Design and Optimization, 1998).

3. Programa Experimental

Como anteriormente referido, o propósito deste estudo implicou a elaboração de várias actividades experimentais, relacionadas com a formulação do betão. A parte experimental do estudo, divide-se em duas fases resultantes das actividades exercidas em dois meios empresariais. Estas tiveram propósitos diferenciados, sempre relacionados com o tema em questão. Em cada parte experimental, os agregados utilizados foram os disponibilizados por cada empresa, indo assim ao encontro dos interesses das mesmas.

Para uma melhor compreensão do trabalho efectuado, é apresentado um esquema ilustrativo do programa experimental realizado.



A primeira parte dos trabalhos experimentais, teve como principal foco a criação de diversas amassaduras do betão pretendido, de forma a constatar possíveis diferenças de aplicabilidade entre os resultados dos métodos teóricos de formulação, e a prática. O principal intuito foi a obtenção da percepção, do que seria formular um betão para

possível comercialização desde a sua origem, analisando propriedades que o caracterizam, como a resistência à compressão e trabalhabilidade do betão fresco.

De uma maneira geral, o processo de elaboração das composições, teve como principais condicionantes os resultados das amassaduras, correspondentes às composições anteriores.

A segunda parte consistiu num estudo mais detalhado sobre os parâmetros de absorção de água por parte dos agregados, verificando diferenças dos resultados entre amostras com e sem fíler (material com dimensões inferiores a 0.065 mm).

A metodologia de apresentação dos trabalhos experimentais adoptada, foi a apresentação dos resultados, com breves introduções justificativas. No caso das amassaduras, é demonstrado o processo de determinação da composição da primeira amassadura, sendo o processo teórico comum a todas as outras. As restantes formulações, correspondentes às outras amassaduras realizadas, encontram-se em anexos (IV;V;VI;VII). Os ensaios com base em procedimentos normativos, são descritos de uma forma a possibilitar obter uma percepção geral da realização dos mesmos.

3.1 Primeira Parte - Composições de betão

A escolha dos materiais utilizados para constituir o betão, recaiu para agregados com origem de produção interna, através da central de britagem, com excepção para a areia do mar. Os restantes materiais como o cimento, adjuvantes e água foram iguais aos utilizados pela empresa.

Para criar as composições para as amassaduras, o método teórico adoptado foi o de Faury, com base nas curvas de referência, que requereu o conhecimento de dados sobre os agregados como a granulometria, as massas volúmicas, as absorções e os teores de humidade. Somente após a obtenção desses parâmetros dos agregados, foram elaboradas diversas composições. Sendo assim, é apresentado a elaboração dos ensaios correspondentes à obtenção dos parâmetros pretendidos, denominados neste estudo, como ensaios preliminares.

3.1.1 Ensaios preliminares aos agregados

Para poder efectuar os ensaios referidos e as amassaduras, foi efectuada uma recolha de amostras dos diferentes agregados, com as quantidades suficientes para realizar as actividades experimentais previstas.

A recolha das amostras foi de acordo com a NP EN 933, referente ao procedimento de obtenção de amostras, que representem a granulometria integral do agregado em questão. A metodologia pertencente a este processo refere duas possibilidades, a proporção 1:3:5 ou a 1:7:14, sendo a primeira referente a uma distribuição dos agregados numa pilha prismática e a segunda cónica. Devido às condições de armazenamento, foi escolhida a primeira (1:3:5) para a realização deste estudo, em semelhança com procedimentos efectuados pela empresa para a realização da recolha das suas amostras. O método está representado na Figura 8, com a referência da norma, e a aplicação numa pilha prismática de agregados.

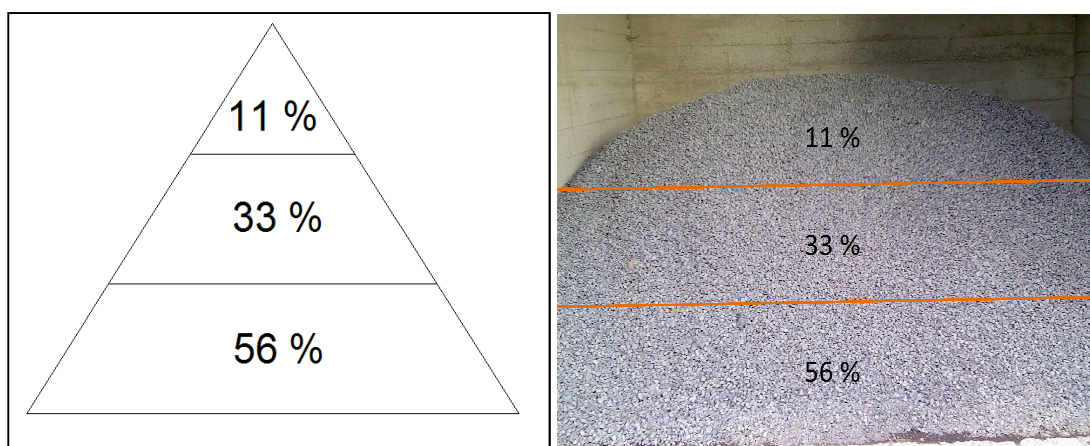


Figura 8- Metodologia de recolha das amostras de agregados 1:3:5

O método de amostragem foi comum a todo o tipo de agregados utilizados, finos ou grossos, com especial atenção para os agregados mais grossos, em que pode ocorrer segregação ao serem depositadas as partículas num amontoamento. A Figura 9 representa essa segregação em que as partículas mais grossas tendem a se depositar nas extremidades baixas do amontoamento dos agregados, e a dimensão das partículas diminui gradualmente no sentido e orientação do topo do amontoamento.

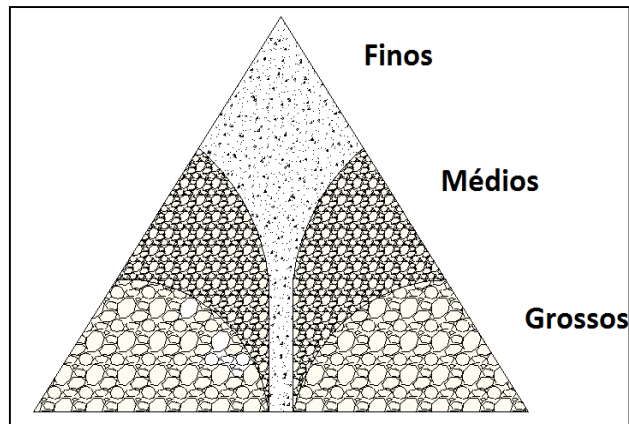


Figura 9-Disposição das partículas em armazenagem de agregados grossos (NP EN 933)

3.1.1.1 Massa volúmica e absorção

Esta actividade experimental foi realizada no LREC, de acordo com NP EN 1097-6, relativa à determinação das massas volúmicas e capacidade de absorção dos agregados.

A massa volúmica das partículas é calculada a partir da razão, entre a massa e o volume. A massa é determinada pela pesagem do provete, com as partículas saturadas e superfície seca, e também com a pesagem das partículas secas, após a secagem em estufa. O volume é determinado por pesagens, utilizando o método do picnómetro, a partir da massa de água deslocada (NP EN 1097).

O procedimento experimental utilizado, é representado na Figura 10 com algumas das operações efectuadas, descritas no procedimento experimental normativo, que ajudam a obter uma ideia geral dos processos de realização destes ensaios.

Essas operações representadas na Figura 10, são:

- O esquarteramento da amostra inicial (A), que consiste na redução da amostra inicial até à quantidade da amostra pretendida. Esta redução é efectuada para

que da amostra inicial resulte sempre duas amostras finais com iguais quantidades e granulometria igual à inicial.

- A identificação da amostra (B) é resultante do processo de esquarteramento e lavagem das partículas inferiores ao peneiro 0.063 mm. Isto é a passagem de toda a amostra resultante do esquarteramento pelo peneiro referido.
- A imersão dos picnómetros (C) durante 24 horas em água de temperatura controlada de $22 \pm 3^\circ \text{C}$.
- Secagem do picnómetro para pesagem, após o tempo de imersão referido (D)

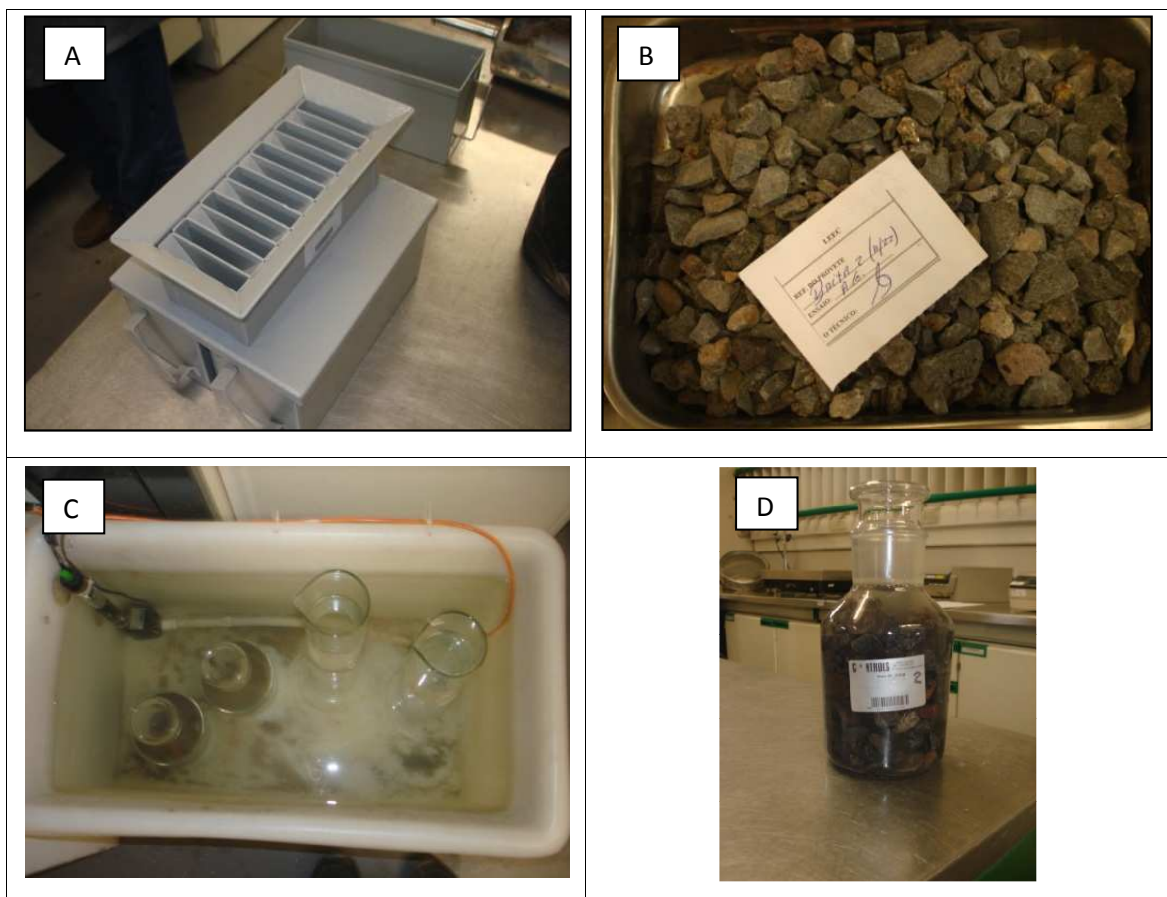


Figura 10- Representação do procedimento experimental relativo a EN NP 1097-6 (A- equipamento para o esquarteramento da amostra; B- Amostra de brita; C-Imersão dos picnómetros; D-Picnómetro com material saturado)

Neste ensaio experimental, é importante referir que o procedimento experimental, varia ligeiramente de acordo com as dimensões dos agregados a utilizar. Isto

relativamente à determinação da massa do agregado no estado saturado com superfície seca. Para agregados grossos com dimensões entre 4 mm e 31.5 mm, o procedimento descrito de uma maneira simples, consiste na remoção da água numa camada monogranular com um pano seco, até se obter um aspecto húmido sem películas visíveis de água. No caso de partículas entre 0.063 mm e 4 mm, a determinação do estado de humidade pretendido é efectuada com um molde tronco-cónico cuja disposição das partículas após apiloamento leve e “desmoldagem” refere o estado de humidade das partículas.



Figura 11- Material utilizado para partículas entre 0.065 e 4 mm

Para o caso da sarrisca com granulometria declarada de 2-5 mm, os resultados deste ensaio foram efectuados parcialmente, ou seja, uma parte da amostra foi ensaiada com procedimento para agregados finos, e a restante para grossos. Os valores finais apresentados surgiram de acordo com as percentagens de cada parte da amostra relativa à totalidade analisada. Os resultados obtidos para este ensaio experimental estão representados na Tabela 8, dos quais não foram disponibilizados os valores parciais que possibilitaram a obtenção dos mesmos, estando assim as várias equações referenciadas no anexo III.

Tabela 8-Resultados do EN NP 1097-6 LREC

Agregados	Massa volúmica das partículas Mg/m ³			% Absorção de água
	Impermeável	Secas em estufa	Saturadas com superfície seca	
Brita 2	3.00	2.82	2.88	2.1
Brita 1	3.04	2.81	2.88	2.7
Sarrisca	3.05	2.85	2.90	2.7
Areia do mar	3.05	2.81	2.89	2.8

3.1.1.2 Teor de Humidade

Para determinar o teor de humidade (w), presente nos agregados constituintes da composição do betão, foi realizado o ensaio descrito em NP EN 1097-5. A secagem em estufa permite obter uma medida da quantidade total de água livre presente num provete de m agregado. A água pode estar presente quer na superfície quer no interior ou nos poros das partículas de agregado.

O método consiste na secagem da amostra até massa constante. O teor de humidade é obtido através da diferença de massa entre a massa húmida e a massa seca. Inicialmente, a amostra foi reduzida de acordo com a EN 933-2, que refere o cálculo da massa mínima do provete.

No caso do diâmetro máximo do agregado ser maior ou igual a 1,0 mm, a massa mínima deverá ser de $0.2 \times D_{\text{máx}}$ em Kg, e se for menor a 1,0 mm, deverá ser 0.2 Kg. Após a redução do material húmido este foi pesado com o tabuleiro obtendo assim o valor para M_1 . Em seguida esse material foi colocado numa estufa a secar, a uma temperatura constante de 110 ± 5 ° C como está representado na Figura 12.



Figura 12-Secagem dos agregados na estufa

O tempo de secagem foi o suficiente até atingirmos a massa constante, que de acordo com a norma representaria variações da massa de valor igual ou inferior a 0,1 % da pesagem anterior decorrente do processo de secagem. Com o processo de secagem concluído, foi efectuada a pesagem final (M2). Com todos os dados necessários, foi determinado o teor de humidade através da equação (10), cujos resultados para os diversos agregados estão representados na Tabela 9.

Tabela 9- Resultados do EN NP 1097-5

Agregados	W (%)
Brita 2	2.5
Brita 1	2.3
Sarrisca	2.5
Areia do mar	15.1

$$\% w = \frac{M1-M2}{M2} \times 100 \quad (10)$$

3.1.1.4 Granulometria

A granulometria dos agregados utilizada para obter a composição do betão, foi a indicada nas fichas técnicas e certificadas dos agregados, como valores típicos. As mesmas, indicam os parâmetros de conformidade sob a forma de valores mínimos e máximos. Estes intervalos, são definidos igualmente através de recomendações normativas. A utilização da granulometria declarada surgiu com o intuito de utilizar as

mesmas condições das composições existentes da empresa, possibilitando a utilização de outras análises acompanhadas na empresa, como a verificação semanal da conformidade da granulometria. A granulometria apresentada nessas fichas é de acordo com a combinação de série de peneiros utilizada, a série base mais a série 1 (Quadro 1 de EN 12620:2002+A1:2008).

No fabrico do betão, o controle da qualidade do mesmo, ao longo do tempo, passa pelo controle das condições que originaram a formulação das mesmas, como a granulometria dos diversos agregados. A mesma, é validada em relação à referência existente, ou seja, os valores declarados nas fichas técnicas. Em situações em que a conformidade não é atingida, o lote em questão é rejeitado como constituinte do betão. No caso em que permaneça constante essa não conformidade, os agregados poderão ser alvos de uma nova classificação.

Para uma melhor compreensão das análises semanais referidas, é mostrado um exemplo de uma análise da conformidade de um agregado, com a denominação de Brita 2. Esta foi efectuada numa das semanas, em que foram realizadas as composições e amassaduras e está representada na Tabela 10.

Tabela 10-Análise de conformidade granulométrica da Brita 2

Abertura da Malha (mm)	% Material acumulado passado			
	Típicos	Mínimos	Máximos	Registado
0,063	0,8	0.0	4.0	1
0,125	1			1
0,25	1			1
0,5	1			1
1	1			1
2	1			1
4	1			2
5,6	1	0	5	3
8	2			6
11,2	8	0	20	17
16	47			62
22,4	97	85	100	95
31,5	100	98	100	100
41.5	100	100	100	100
63	100			100

Como é possível verificar, a conformidade deste agregado foi atingida, devido aos resultados do ensaio granulométrico efectuado, estarem dentro do intervalo de aceitação, constituído por valores máximo e mínimos, definidos em norma.

Com a utilização das fichas técnicas dos agregados, foi possível obter as classes granulométricas de cada agregado, diâmetro mínimo e máximo das partículas, que auxiliou na escolha dos agregados a utilizar.

3.1.1 Quantificação da água de amassadura

A água de amassadura pode ser considerada, como o somatório da água necessária para criar pasta de cimento, restrita a um A/C máximo, e a água suficiente para molhar o agregado, permitindo o estabelecimento da ligação agregado com a pasta referida (Coutinho, 2006).

Para este estudo, nomeadamente nas composições do betão, foram efectuados dois métodos de obtenção da água de amassadura, na fase inicial do estudo, para escolha posterior de aplicação nos trabalhos experimentais. O primeiro, consistiu na aplicação do método de Faury através da determinação de índice e volume de vazios, e o segundo através dos parâmetros de capacidade de absorção e teor de humidade dos agregados.

O primeiro método, o de Faury, permite determinar a água de amassadura pela diferença entre o índice de vazios e o volume de vazios. O índice de vazios é definido por ser o volume de água, juntamente com os vazios por unidade de volume de betão, logo após a colocação. Este foi determinado pela equação (11), no qual relaciona parâmetros tabelados por Faury (Tabela 11) , K e K' , relacionados com a trabalhabilidade pretendida do betão. A dimensão máxima do agregado e o raio do molde também são tidos em conta, sendo o último importante no já referenciado efeito parede.

Tabela 11-Valores de Faury para parâmetros K e K'

Consistência	Valores de K			Valores De K'	Classe
	Areia rolada		Areia britada Grosso		
	Grosso rolado	Grosso britado			
Terra húmida	0.24	0.25	0.27	0.002	-----
Seca	0.25 a 0.27	0.26 a 0.28	0.28 a 0.30	0.003	-----
Plástica	0.26 a 0.28	0.28 a 0.30	0.30 a 0.34	0.003	S1
Mole	0.34 a 0.36	0.36 a 0.38	0.38 a 0.40	0.003	S2/S3
Fluida	≥0.36	≥0.38	≥0.40	≥0.004	S4/S5

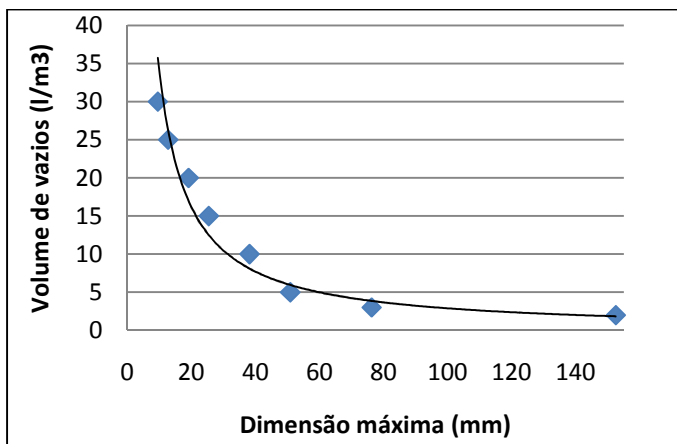
$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{R/D - 0.75} \quad (11)$$

A determinação do volume de vazios é experimental, havendo um conjunto de dados obtidos por Coutinho, na Tabela 12. Esta tabela está aplicada a dimensões de partículas, consoante as séries de peneiros antigas, não sendo assim directamente aplicáveis às novas séries de peneiros referidas em 3.1.1.3.

Tabela 12-Tabela de Sousa Coutinho para volume de vazios

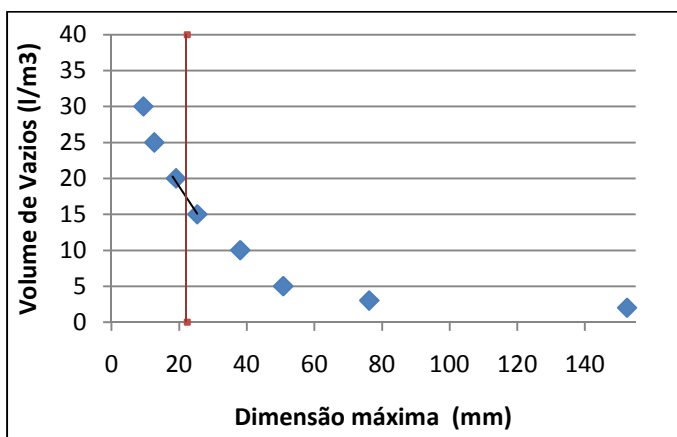
Máxima dimensão do inerte (mm)	Volume de vazios, Vv, (l/m3)
9.5	30
12.7	25
19.1	20
25.4	15
38.1	10
50.8	5
76.2	3
152.4	2

Assim a obtenção deste parâmetro poderia ser efectuada experimentalmente, em semelhança com o trabalho efectuado por Coutinho, ou um tratamento aos dados disponíveis de forma a se adequarem ao pretendido. A primeira função foi efectuada através dos métodos dos mínimos quadrados, envolvendo todos os pares de dados disponíveis, obtendo uma função potencial como a mais aproximada. Para as composições efectuadas com dimensão máxima de 22.4 mm correspondentes ao máximo (classe) do agregado mais grosso, a brita 2 (11-22), o valor obtido por esta função foi de 14.26 l/m³, claramente abaixo do esperado que seria de valores entre 15 e 20. Perante a situação referida, foi decido efectuar uma função afim, que caracterizasse o volume de vazios entre os valores de 19.1 mm e 25.4 mm, e aplicável somente a este intervalo de dados. Para esta função obteve-se o valor de 17.2 litros de vazios em cada metro cúbico de agregados, sendo totalmente aceitável por estar dentro do intervalo esperado. A figura seguinte representa as funções anteriormente referidas.



A-Função Potencial
($R^2=0.967$)

$$V_v = 397.2 \times D_{max}^{-1.07}$$



B-Função Afim
(19.1mm < D_{max} < 25.4mm)

$$V_v = -0.79D_{max} + 35.16$$

Figura 13-Definição de funções relacionando Vv com Dmax

De acordo com os objectivos, era pretendido uma trabalhabilidade S3, correspondente à definição mole das tabelas de Faury, no qual, com os parâmetros de índice de vazios e volume de vazios (função afim), foi obtido o valor de 196.4 litros de água por cada metro cúbico de betão a ser produzido.

Analisando este método, foi considerado que este não seria o mais adequado, por não contemplar a influência das absorções dos agregados e teor de humidade. Principalmente devido ao facto de os valores de absorção dos agregados ser superior a 1 %, em que segundo Coutinho, é o valor máximo para se poder desprezar a influência deste parâmetro nos agregados naturais.

O segundo método de obtenção da água de amassadura, relacionou estes dois parâmetros como se fossem definidores da água de molhagem, necessária para saturar os agregados. Os agregados para ficarem saturados têm uma determinada capacidade de absorção de água (W_{A24}) que terá de ser adicionada à água efectiva. No sentido inverso, é preciso contabilizar a água existente nos agregados sob a forma de humidade (W), que será descontada do valor total de água de amassadura a adicionar. A referência inicial da quantidade de água para estas adições ou subtracções, provem de A/C máximo (0.6) de onde definido a quantidade de cimento obtêm-se o volume de água correspondente. Onde A/C é um valor pré-definido como limite máximo.

$$\text{Água de amassadura} = C \times \frac{A}{C} + W_{A24} \times M_{seca} - W \times M_{seca} \quad (12)$$

3.1.3 Composições/Amassaduras de Betão C30/37

Os agregados utilizados nas amassaduras, provieram do mesmo lote ao qual foram realizados os ensaios preliminares e foram guardados em quantidades suficientes para realizar todas as amassaduras, de forma a reduzir hipóteses de alternância dos parâmetros determinados como a absorção, teor de humidade e massas volúmicas.

Assim foi possibilitado a realização de diversas composições com a mesma referência dos valores dos ensaios preliminares.

As amassaduras foram realizadas com o tipo de mistura representado na Figura 14 com um tempo aproximado de 5 minutos. Os componentes sólidos foram primeiramente introduzidos na mistura, com o cimento a ser o último. A parte líquida da mistura, foi somente adicionada quando já se tinha garantido uma homogeneização de toda a parte a sólida.



Figura 14-Mistura utilizadas nas amassaduras

Nesta parte experimental do estudo foram realizadas diversas composições das quais algumas foram convertidas em amassaduras. Em seguida são apresentadas, cinco amassaduras e respectivas formulações e resultados.

3.1.3.1 Amassadura 1

Procedeu-se à determinação da composição do betão, através do método das curvas de referência, particularmente a curva de Faury, no qual é apresentado o seu processo de cálculo, numa forma sequencial de como foi estabelecido.

As características do betão pretendidas, de acordo com os objectivos definidos inicialmente, eram: classe de consistência **S2/S3**; classe de resistência **C30/37** e classe de exposição ambiental **XC4**.

Os materiais utilizados no betão foram brita 2, brita 1, sarrisca, areia, cimento e água, do qual realçamos que os agregados se encontravam num estado húmido, não saturado. Ainda relativo aos materiais de referir que o tipo de cimento utilizado foi o II/A-L, 42.5-R com valor de massa volúmica de 3100 kg/m₃ e a água utilizada nas amassaduras é proveniente de um sistema de reciclagem existente no local de fabrico.

Massa volúmica das partículas secas em estufa (NP EN 1097-6)		Teor de humidade dos agregados (NP EN 1097-5)	
Agregados	γ (kg/m ³)	Agregads	%
Brita 2	2820	Brita 2	2.3
Brita 1	2810	Brita 1	2.5
Sarrisca	2850	Sarrisca	2.5
Areia do mar	2810	Areia do mar	15.1

Massa volúmica dos agregados húmidos (seco+humidade)	
Agegados	Kg/m ³
Brita 2	2862
Brita 1	2869
Sarrisca	2930
Areia do mar	3130

Figura 15- Massas volúmicas dos agregados húmidos por cada m³ de betão

Na Figura 15 é representado o raciocínio utilizado para obter as massas volúmicas dos agregados, mais aproximado ao real possível. Isto é, este valor de massa volúmica obtido permitiu no final do processo da formulação, obter as quantidades adequadas dos agregados, visto que estes continham massa de água na sua constituição.

Com todos os dados necessários para poder iniciar a formulação, foram obtidos as granulometrias dos agregados pelas técnicas dos mesmos, presentes na tabela 13 e figura 16.

Tabela 13-Granulometria dos agregados

Abertura da Malha (mm)	Material que passa através do peneiro %			
	Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia
0,063	0,8	1,3	2,1	1,5
0,125	1	2	3	17
0,25	1	2	3	68
0,5	1	2	3	91
1	1	2	3	98
2	1	2	6	100
4	1	5	55	100
5,6	1	14	91	100
8	2	43	100	100
11,2	8	90	100	100
16	47	100	100	100
22,4	97	100	100	100
31,5	100	100	100	100

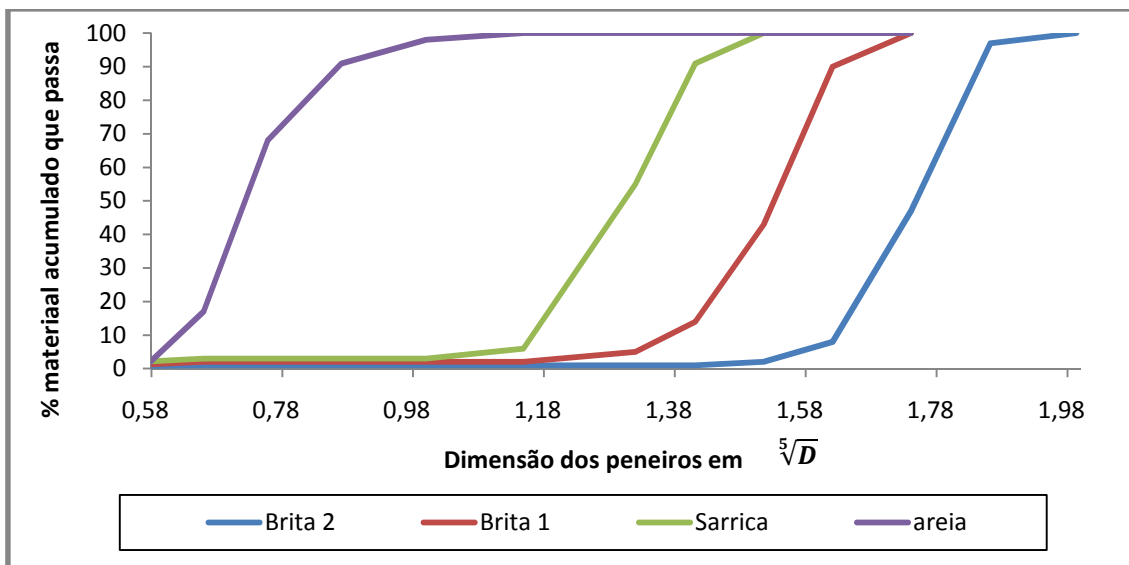


Figura 16-Gráfico representativo das curvas granulométricas

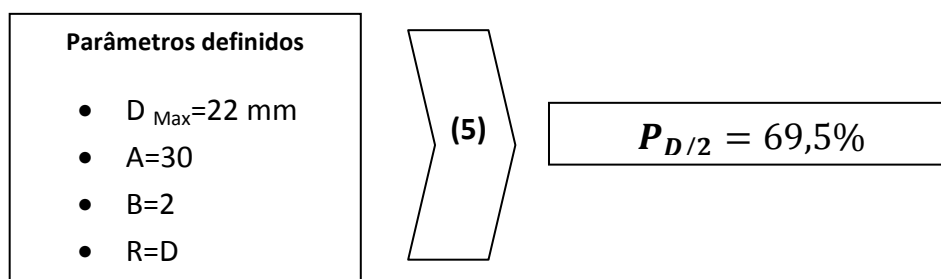
Torna-se importante mencionar, que a escolha da escala relativa aos peneiros foi a indicada pelo método de Faury, ou seja a raiz quinta da dimensão da abertura da malha do peneiro, e não a escala usual, para representar a granulometria dos agregados, que seria uma escala logarítmica. Isto de forma a compatibilizar todas as curva dos agregados e Faury num só gráfico.

Através da granulometria dos agregados, foi calculado os módulos de finura através do método normalizado, cuja definição e importância foi referida no capítulo anterior. A escolha do método normalizado (2), em detrimento do outro apresentado (4), teve como principal motivo, a ausência de referência bibliográfica justificativa.

Tabela 14-Módulos de finura

Agregados	M.F
Brita 2	7.45
Brita 1	6.42
Sarrisca	5.27
Areia	1.26

De seguida foi determinada a curva de Faury, para o qual foi definido a dimensão máxima dos agregados presentes na mistura, com o valor de 22mm, e escolhidos os parâmetros A e B da Tabela 5, de acordo com a trabalhabilidade desejada. Recorrendo à classificação antiga, foi escolhida a mole, com consistência nos intervalos de definição S2/S3. Foi desprezado o efeito parede logo o parâmetro foi o mesmo da dimensão máxima.



Com esta percentagem de material que passa acumulado, calculada para metade da dimensão máxima, e sabendo que para 22 mm é de cem por cento, foi traçada a curva representada no gráfico seguinte em conjunto com as outras curvas granulométricas (Figura 17).

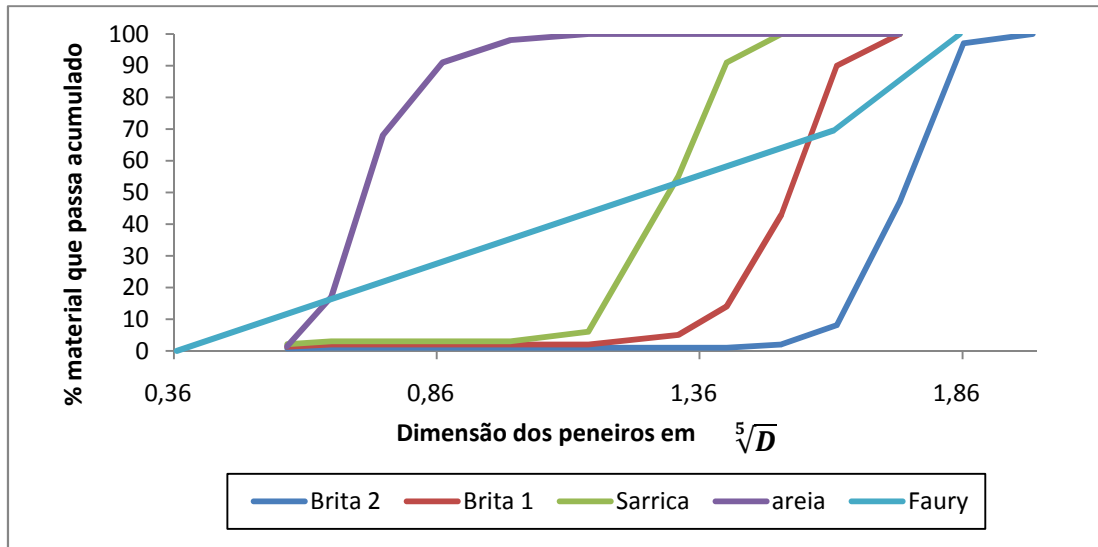
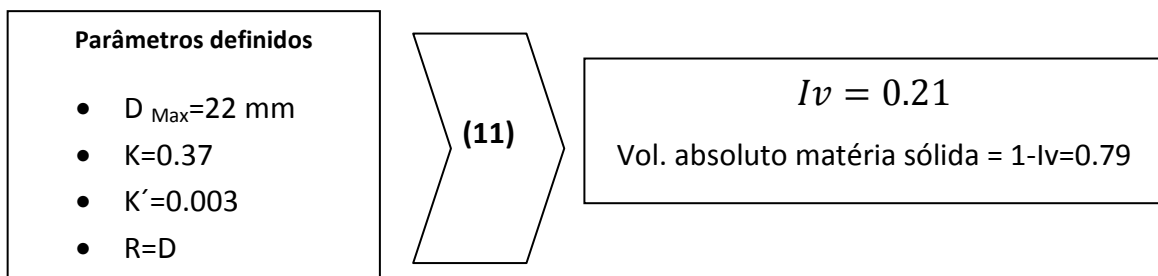


Figura 17-Curvas granulométricas de Faury e dos agregados

Com a curva de Faury obtida, tornou-se necessário retirar a quantidade de cimento do problema. Para isso era preciso ter o conhecimento do volumes absolutos de matéria sólida, para ser possível determinar a percentagem de cimento correspondente, sendo necessário determinar o índice de vazios.



A dosagem de cimento escolhida para esta primeira composição foi de 300 kg, que excedia em 20 kg relativamente a dosagem mínima em NP EN 206-1 quadro 6, para um betão C30/37, com classe de exposição ambiental XC4 e tipo de cimento II-A.

$$\text{Volume absoluto de cimento} = \frac{\text{dosagem de cimento em Kg}}{\text{Massa volúmica em kg/m}^3} = 0.097 \text{ m}_3/\text{m}_3$$

$$\% \text{ Cimento na mistura} = \frac{\text{volume absoluto de cimento}}{\text{volume absoluto em matéria sólida}} = 12.27$$

Volume absoluto dos inertes=0.692 m₃/m₃

Com estes dados foi possível criar uma nova curva, denominada de Faury sem cimento. Esta etapa da formulação foi importante, porque permite uma fixação da quantidade de cimento, tendo estas partículas muito pequenas, não havendo sobreposição com a areia do mar. A dedução da percentagem do cimento, foi também efectuada tendo em conta o ajuste final, envolvendo os módulos de finura dos agregados. Para criar a nova curva foi efectuado um ajuste representado na tabela seguinte.

Tabela 15-Ajuste para determinar curva de Faury s/ cimento

	mm	%	(-) % Cimento	Ajuste
D	22,400	100,0	87,7	100,0
D/2	11,200	69,5	57,3	65,3
di	0,125	16,4	4,1	4,7

Perante a existência de diversas metodologias de determinação das percentagens dos agregados no betão foi escolhida o método gráfico devido à sua maior simplicidade quando comparando, por exemplo, com o método dos mínimos quadrados.

A elaboração do método gráfico consistiu em estabelecer três rectas auxiliares (a, b e c) em valores de ordenadas que possibilitassem desempenhar o método correctamente. Como é sabido este é um método muito visual, logo sujeito a resultados não exactos mas aproximados ao pretendido. Isto apesar de ter sido feitos cálculos áreas com figuras geométricas que se assemelhassem às áreas obtidas.

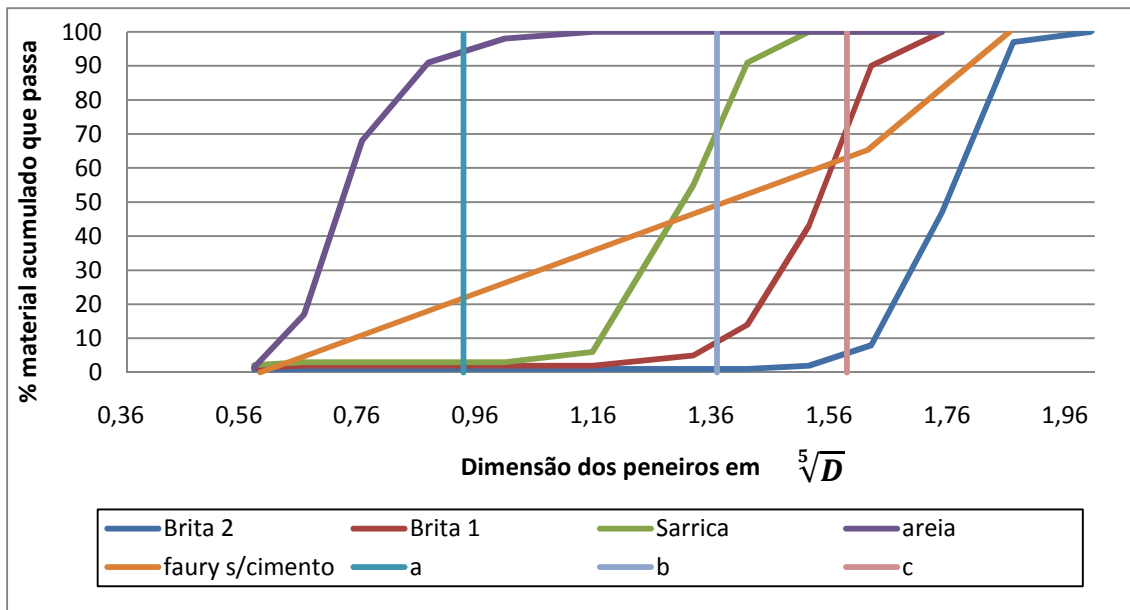


Figura 18-Método gráfico

Através do método gráfico representado na figura anterior forma obtidos os seguintes resultados:

- Areia do Mar - 21.0%
- Sarrisca - 28.0%
- Brita 1 - 14.0%
- Brita 2 - 37.0%

Relembrando que estes valores percentuais eram relativos ao volume absoluto de agregados, ou seja não contabilizando a quantidade de cimento que neste caso era 12.3% do volume absoluto da matéria sólida. Com esta mistura de agregados foi obtido um módulo de finura de 5.40. De forma a sabermos se estes resultados eram os correctos, faltava comparar o módulo de finura desta mistura com o módulo de finura da curva de referência, que era a curva de Faury sem cimento, verificando se existia igualdade de valores. Este passo da formulação é muito importante porque contrariamente ao método dos mínimos quadrados, que realça esta condição com uma majoração da mesma, o método gráfico não possibilita a determinação das percentagens tendo em conta o facto referido. Sendo assim foi determinada a sua granulometria (Tabela 16) com as mesma serie de peneiros que tinha sido usada para

os agregados, para ser acertada a comparação entre os valores de módulos de finura. Para o mesmo ser válido a metodologia de cálculo do M.F. também se manteve.

Tabela 16-Granulometria da curva de Faury s/ cimento

Faury s/cimento Abertura da Malha (mm)	Resíduos acumulados	
	% Passado	% Retido
0,063	0,00	100,00
0,125	4,69	95,31
0,25	10,91	89,09
0,5	18,05	81,95
1	26,26	73,74
2	35,69	64,31
4	46,52	53,48
5,6	52,35	47,65
8	58,96	41,04
11,2	66,13	33,87
16	83,45	16,55
22,4	100,00	0,00
31,5	100,00	0,00

Obteve-se o valor de 5.15 para o módulo de finura de referência que diferenciava do valor obtido da mistura resultante do método gráfico (5.40). Sendo necessário reduzir a percentagem dos agregados com módulo de finura superiores ao da referência, e aumentar os que tinham módulo de finuras inferiores. Sendo assim foi efectuado um ajuste às percentagens utilizando um método representado na tabela seguinte.

Tabela 17- Proporção para ajuste das percentagens

Agregados	M. Finura	Diferença	Razão	Negativos	Positivos
Brita 2	7,45	-2,28	0,63	-2,28	0,00
Brita 1	6,42	-1,25	0,34	-1,25	0,00
Sarrisca	5,27	-0,10	0,03	-0,10	0,00
Areia	1,26	3,91	1,00	0,00	3,91
Total				-3,63	3,91

O ajuste das percentagens foi efectuado de acordo com as proporções indicadas na tabela anterior, originou nos seguintes resultados:

- Areia do Mar - 25.3% (+4.3)
- Sarrisca - 27.9% (-0.1)
- Brita 1 - 12.5% (-1.5)
- Brita 2 - 34.3% (-2.7)

Com um ajuste à mistura indicado, foi obtida o módulo de finura igual ao de referência. Perante isto foi determinada a curva real da granulometria da mistura (Tabela 18) de forma a poder obter uma comparação gráfica (Figura 19) entre a curva teórica e a real, ou seja, a obtida através da mistura efectuada com os quatro agregados escolhidos.

Tabela 18-Determinação da granulometria da curva real da mistura

Abertura Peneiro (mm)	Brita 2		Brita 1		Sarrisca		Areia do Mar		Curva Mistura Granulo.	Curva Teórica
	%	0,351	%	0,130	%	0,269	%	0,250		
0,063	0,8	0,3	1,3	0,2	2,1	0,6	1,5	0,4	1,4	0,0
0,125	1,0	0,4	2,0	0,3	3,0	0,8	17,0	4,3	5,7	4,6
0,25	1,0	0,4	2,0	0,3	3,0	0,8	68,0	17,0	18,4	10,8
0,5	1,0	0,4	2,0	0,3	3,0	0,8	91,0	22,8	24,2	18,0
1	1,0	0,4	2,0	0,3	3,0	0,8	98,0	24,5	25,9	26,2
2	1,0	0,4	2,0	0,3	6,0	1,6	100,0	25,0	27,2	35,5
4	1,0	0,4	5,0	0,6	55,0	14,8	100,0	25,0	40,8	46,3
5,6	1,0	0,4	14,0	1,8	91,0	24,5	100,0	25,0	51,7	52,2
8	2,0	0,7	43,0	5,6	100,0	26,9	100,0	25,0	58,2	58,7
11,2	8,0	2,8	100,0	13,0	100,0	26,9	100,0	25,0	67,7	65,4
16	47,0	16,5	100,0	13,0	100,0	26,9	100,0	25,0	81,4	82,6
22,4	97,0	34,1	100,0	13,0	100,0	26,9	100,0	25,0	98,9	100,0
31,5	100,0	35,1	100,0	13,0	100,0	26,9	100,0	25,0	100,0	100,0

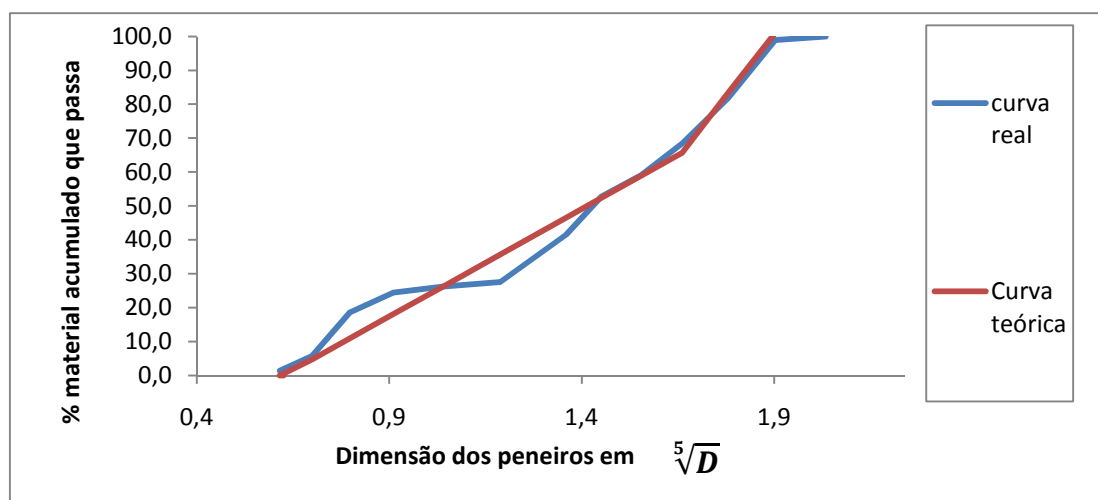


Figura 19-Curva granulométrica real e teóricas

Com as percentagens de cada agregado definidas, para poder realizar a amassadura foram estabelecidas as quantidades de cada agregado, criando uma relação entre as percentagens, massas volúmicas e volume de massa sólida. Como é sabido este método pressupõem que as partículas se encontrem saturadas com superfície seca, situação diferente da existente com já referida na Figura 15. Isto devido aos métodos de armazenagem (stock) do material existente na empresa. Sendo assim tornou-se vital introduzir os parâmetros de absorção e humidade, não só para poder determinar as quantidades exactas, mas também um ajuste à quantidade de água a ser adicionada.

Através dos teores de humidade dos agregados foi possível contabilizar a quantidade de água presente nos mesmos como indica a Tabela 19. Com os valores da absorção dos agregados foi possível determinar a quantidade de água que seria absorvida, ou seja, volume de água que não seria contabilizada na relação água/cimento (Tabela 20). Para a determinação desses volumes foi utilizada a quantidade de massa dos agregados no estado seco, de forma a estabelecer uma relação com a massa volúmica das partículas secas. Isto devido às variáveis existentes na equação de determinação da capacidade de absorção.

Tabela 19-Quantidade de água presente nos agregados por metro cúbico de betão

	Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia
Teor de humidade (%)	2,5	2,3	2,5	15,1
Massa seca (kg/m ₃)	670,0	243,7	549,4	491,0
Volume de água (litros/m ₃)	16,7	5,6	13,7	74,1
			Soma	110,2

Tabela 20-Quantidade de água absorvida pelos agregados por metro cúbico de betão

	Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia
Absorção de água (%)	2,1	2,7	2,7	2,8
Massa seca (kg/m ₃)	670,0	243,7	549,4	491,0
Volume água absorvida (litros/m ₃)	14,1	6,6	14,8	13,7
			Soma	49,2

Efectuando uma diferença entre os valores obtidos nas tabelas anteriores, obtemos o valor de 61.0 litros, correspondente à quantidade de água livre já presente na mistura que fará parte da água de amassadura, logo também do ligante hidráulico. Como era pretendido a razão máxima A/C de 0.6, com 300 kg de cimento, o máximo possível de água a ser adicionada seria 180 litros. Perante este valor, foi determinado para água de amassadura 119 litros/m₃.

O adjuvante utilizado para esta amassadura foi um plastificante designado por Pozzolith 390 FG, cuja recomendação do fornecedor indicava entre 0.3 a 1 litro de adjuvante por cada 100 Kg de cimento utilizado, que poderia reduzir até 15% de água. Sendo a primeira amassadura e com desconhecimento do efeito do produto optou-se por utilizar a dosagem máxima, que correspondia a 3 litros ou 2.54 Kg (massa volúmica de 1.18 Kg/dm₃). Este valor representa cerca de 8.4 g/kg de cimento, respeitando a NP EN 206-1 5.2.6 que limita a 50 g/kg, e indica que para valores superiores a 2 g/kg parte do adjuvante seja disperso na água de amassadura, que coincide com a recomendação do fornecedor indicando que o adjuvante só será adicionado após a adição de cerca de 50-70% da água, sendo a restante misturada com o adjuvante ao ser adicionado na mistura. De referir que como o total de adjuvantes líquidos não excede os 3 l/m₃, o seu

valor de água não terá de ser considerado no cálculo da razão água/cimento, respeitando assim as recomendações normativas em NP EN 206-1.

Com a formulação da composição do betão para a primeira amassadura concluída são indicados os valores finais de todos os constituintes, sólidos ou líquidos, que formaram a mistura (Tabela 21).

Tabela 21-Quantidades determinadas por metro cúbico de betão para partículas "húmidas"

Componentes	Qt.	Un.
Brita 2	687	kg/m ³
Brita 1	249	kg/m ³
Sarrisca	563	kg/m ³
Areia do mar	565	kg/m ³
Água	119	l/m ³
Cimento	300	kg/m ³

Com a primeira composição determinada procedeu-se a realização da primeira amassadura experimental, optando-se um volume de 30 litros a ser produzido laboratorialmente. A tabela seguinte representa as quantidades para uma amassadura com o volume desejado.

Tabela 22-Quantidades utilizadas na amassadura 1 em quilogramas

Agregados húmidos				Cimento	Água	Pozzolith 390 N
Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia do Mar			
20.602	7.479	16.895	16.954	9.000	3.570	0.076

No decorrer do processo da amassadura foi efectuada uma avaliação visual, no qual reparou-se um aspecto extremamente seco, que por sua vez não resultaria nos resultados pretendidos. Sendo assim foram efectuadas correcções na composição do betão

Tabela 23-Quantidades adicionadas na amassadura 1 em gramas

Água	Cimento
412	412

As correcções indicadas na tabela anterior, foram efectuadas com objectivo de aumentar a quantidade de água na mistura, compensando com o mesmo valor de cimento adicionado, de forma a manter o valor da razão A/C (água/cimento).



Figura 20-Ensaio do cone de Abraams na amassadura 1

O ensaio foi validado com o resultado de 0 (zero) mm de abaixamento, podendo ser classificada como consistência de S1. Devido aos resultados da consistência serem longe dos pretendidos e por ser um betão inutilizável na construção, optou-se por não efectuar ensaios de compressão á amassadura efectuada.

3.1.3.2 Amassadura 2

Nesta composição optou-se, em sequência dos resultados anteriores, por aumentar a quantidade de cimento, de forma a poder adicionar mais água, mantendo a razão de água e cimento. A quantidade escolhida de cimento, 360 quilogramas, foi com base no conhecimento dos valores utilizados pela empresa, podendo ser possível, caso desejável, efectuar um estudo comparativo entre a composição existente e a criada.

Com base na experiência da empresa em fabrico de betão e conhecimento dos agregados utilizados, o valor da absorção de água por parte da areia do mar, foi duplicado para 5.6 %.

Em concordância com a empresa, foi optado por reduzir o volume da amassadura dos trinta litros para os dez, de forma a poder ser possível efectuar mais amassaduras sem incrementar o custo do estudo.

Tabela 24-Quantidades utilizadas na amassadura 2 em quilogramas

Agregados húmidos						
Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia do Mar	Cimento	Água	Pozzolith 390 N
6.920	2.480	5.840	4.590	3.600	1.775	0.03051

Tabela 25-Quantidades adicionadas em gramas na amassadura 2

Água	Pozzolith 390 N
172.0	22.0

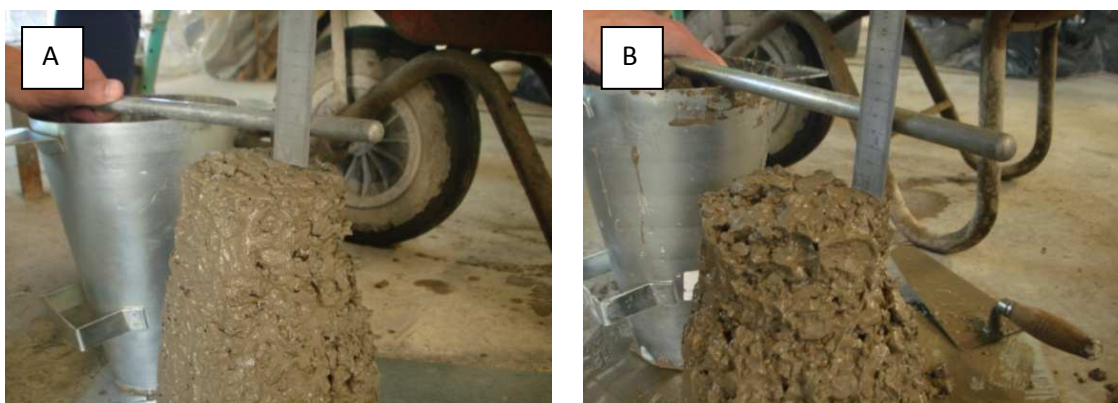


Figura 21-Ensaio do cone de Abraams na amassadura 2

Para averiguar a consistência do betão obtido, foi efectuada o ensaio do cone de Abrams, com a mistura inicial a ter um abaixamento de 20 mm (Figura 21-A). Com as correcções efectuadas, no âmbito de acréscimo da quantidade de água e adjuvante (Tabela 25), os resultados de abaixamento foram 40 mm (Figura 21-B). Estes ficaram assim, no limite inferior do intervalo dos resultados que seriam esperados de 40 a 150 mm, consistência mole S2/S3, de acordo com a formulação teórica de Faury.



Figura 22-Ensaio de resistência à compressão dos cubos resultantes da amassadura 2

Devido a quantidade da amassadura, foram feitos dois cubos, um para ser ensaiado uma semana depois, e o outro 28 dias depois, correspondentes ao tempo de cura do betão, como é representado na tabela seguinte.

Tabela 26-Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão na Amassadura 2

Nº de dias	Dimensões (mm)			Massa (g)	Massa volúmica (Kg/m ³)	Força Rotura (KN)	Tensão Rotura (MPa)
	a1	a2	h				
7	150	150	150	8560	2540	815.5	36.0
28	150	150	150	8580	2540	1078.5	48.0

3.1.3.3 Amassadura 3

Com os resultados da resistência à compressão da amassadura anterior, que continha 360 Kg de cimento por cada metro cúbico de betão, achou-se interessante e útil, formular uma composição com 380 Kg de cimento, a fim de averiguar o acréscimo da resistência e possível melhoria de trabalhabilidade.

A metodologia teórica utilizada foi de acordo com a anterior, mantendo a mesma relação água/cimento (0.6), utilizando a variação de vinte quilos de cimento com um acréscimo igual de água, verificando os seus efeitos na consistência do betão.

Tabela 27-Quantidades utilizadas na Amassadura 3 em quilogramas

Agregados húmidos						
Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia do Mar	Cimento	Água	Pozzolith 390 N
6.542	2.871	5.997	4.301	3.800	1.892	0.04830

Efectuando a determinação da consistência do betão fresco, o resultado do ensaio do cone foi de 50 mm, representando um acréscimo de 10 mm relativamente à amassadura anterior.

Tabela 28-Resultados dos ensaios de determinação à compressão na Amassadura 3

Nº de dias	Dimensões (mm)			Massa (g)	Massa volúmica (Kg/m ³)	Força Rotura (KN)	Tensão Rotura (MPa)
	a1	a2	h				
7	150	150	150	8480	2510	832.0	37.0
28	150	150	150	8540	2530	1097.3	49.0

Podemos verificar com os resultados representados na Tabela 28, que o acréscimo de resistência à compressão aos 28 dias foi de 1 MPa, quando comparando com a amassadura anterior.

Aproveitando a combinação de agregados da Tabela 28, foi feita outra amassadura com variação na quantidade de cimento. Esta nova amassadura, designada 3-B, teve na sua composição 3,6 Kg de cimento. A redução de 0.2 Kg de cimento provocou um aumento da razão A/C de 0.60 para 0.63. Este método de obter relações entre A/C e valores de resistência à compressão, não é o mais indicado, porque não é compatível com os princípios adoptados no método teórico para uma composição com 380 Kg de cimento por metro cúbico de betão, visto que a curva de referência é a de Faury s/cimento, logo a percentagem deste influencia o restante cálculo, como por exemplo módulo de finura e volume absoluto de inertes.

Apesar de esta formulação não ser correcta teoricamente, achou-se por bem, como curiosidade, apresentar os resultados de consistência e resistência, tendo como justificação o argumento de que o método teórico seja uma base de referência. O ensaio de abaixamento do cone de Abraams para esta amassadura foi de 50 mm,

sendo classificado com S2. Como esperado os resultados indicados na Tabela 29 foram superiores à amassadura 3.

Tabela 29-Resultados dos ensaios da resistência à compressão da amassadura 3-B

Nº de dias	Dimensões (mm)			Massa (g)	Massa volúmica (Kg/m ³)	Força Rotura (KN)	Tensão Rotura (MPa)
	a1	a2	h				
7	150	150	150	8620	2550	852.8	38.0
28	150	150	150	8600	2550	1123.6	50.0

3.1.3.4 Amassadura 4

A quarta composição teve como objectivo, analisar uma formulação composta por três agregados, reduzindo também a dimensão máxima do agregado de 22 mm para 11 mm. Desta forma seria possível verificar alguma abrangência do método de Faury relativamente à quantidade de agregados, e verificar pressupostos teóricos relativos à redução da resistência à compressão devido à inferior dimensão máxima do agregado em relação às amassaduras anteriores. O pressuposto teórico residia no facto que o aumento da superfície específica dos agregados em contacto com o ligante hidráulico provocaria uma redução da resistência. Sendo assim para efeitos comparativos foi mantida a quantidade de água adicionada, adjuvante e cimento.

Tabela 30-Quantidades utilizadas na Amassadura 4 em quilogramas

Agregados húmidos					
Brita 1	Sarrisca	Areia do Mar	Água	Cimento	Pozzolith 390 N
7.640	6.380	4.930	1.760	3.600	0.031

O ensaio de abaixamento do cone de Abraams para esta amassadura foi de 40 mm, sendo classificado com S1.

Tabela 31-Resultados dos ensaios de resistência à compressão na Amassadura 4

Nº de dias	Dimensões (mm)			Massa (g)	Massa volúmica (Kg/m ³)	Força Rotura (KN)	Tensão Rotura (MPa)
	a1	a2	h				
28	150	150	150	8620	2560	1016.2	45.0
28	150	150	150	8580	2540	1009.4	45.0

3.1.3.5 Amassadura 5

Esta etapa experimental foi dividida em duas amassaduras, com composições iguais relativamente aos constituintes sólidos presentes na mistura, denominadas de 5-A e 5-B. A amassadura 5-A teve como objectivo principal, a determinação da quantidade de água necessária para obter uma classe de consistência S2-S3. Inicialmente, água de amassadura foi determinada pela mesma metodologia das composições anteriores, ou seja, relacionando parâmetros como o A/C, absorções e teores de humidade.

As composições para amassaduras 5-A e 5-B, tiveram cinco tipos de agregados diferentes, ou seja, mais um do que as anteriores, para D_{max} de 22 mm. A adição de mais um agregado, surgiu com o objectivo de aproximar a curva real da curva teórica da mistura de agregados, representada na Figura 23, cuja explicação se encontra mais detalhada nas análises das composições efectuadas

O cálculo teórico com cinco agregados e para 360 Kg de cimento, determinou as seguintes quantidades expressas na tabela seguinte, para uma amassadura de 10 litros.

Tabela 32-Quantidades em quilogramas na Amassadura 5-A

Agregados húmidos							
Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia do Mar	Pó de Pedra	Cimento	Água	Pozzolith 390 N
5.550	3.050	4.200	4.100	1.560	3.600	1.654	0.036

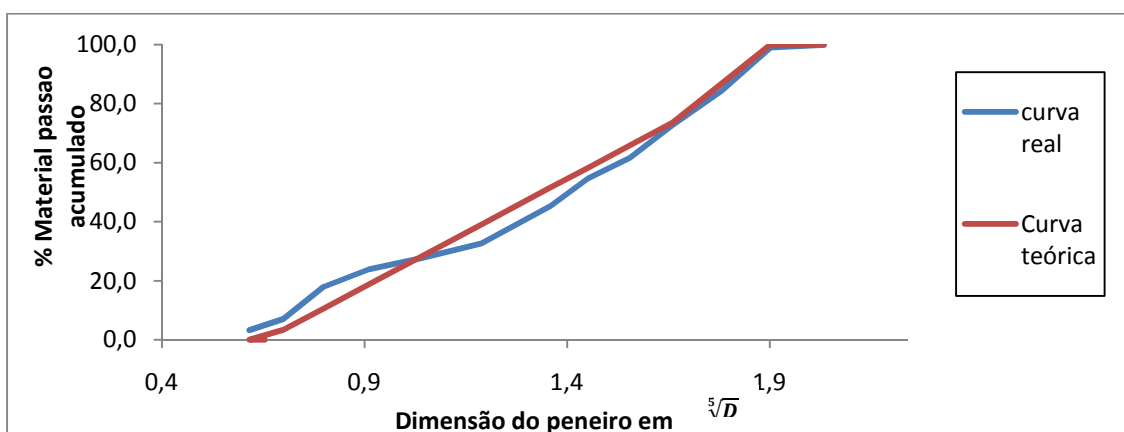


Figura 23-Curva real e teórica da mistura granulométrica da Amassadura 5-A

A mistura efectuada apresentou uma consistência do tipo classe S1, cuja determinação foi puramente visual, ou seja, sem ensaio do cone. Sendo assim, foi decido adicionar mais água, de uma forma controlada, quantificada e gradual, até ter sido obtido a consistência pretendida. O total adicionado de água foi 0,366 kg (ou litros), tornando o total da mesma na amassadura, de 2,004 litros. Para poder realizar este procedimento, foi muito útil a experiencia adquirida nas amassaduras anteriores.

A classe de consistência determinada foi S3, apesar de terem sido efectuados três ensaios de abaixamento com resultados deformados (Figura 24), não de acordo com a norma. Para o primeiro slump, foi obtido 120 mm, no segundo 130 mm e no terceiro 110 mm. Para fins de registo do tipo de consistência e o facto de os resultados não apresentarem grandes variações entre os mesmos, foi efectuada uma média destes três valores, sendo o valor atribuído de 120 mm, classe S3. Apesar da deformação dos resultados, notou-se uma grande capacidade do betão se ajustar a uma nova posição das partículas, dando claros sinais de boa consistência.



Figura 24-Exemplos dos resultados deformados obtidos na Amassadura 5

Na segunda etapa desta actividade experimental foi realizado outra amassadura com as mesmas quantidades da Tabela 32-Quantidades em quilogramas na Amassadura 5-A, mas ao invés da adição de 0.366 kg de água, utilizou-se uma combinação de adjuvantes composta por um plastificante e um super-plastificante, muito comum em

composições comerciais (de acordo com a empresa Cimentos Madeira). Esta combinação é muito utilizada porque o plastificante tem um efeito mais imediato, enquanto o super-plastificante, mais caro, possibilita um maior espaço de tempo de acção de efeito. A combinação surge então, também por razões económicas, e nas percentagens relativamente à quantidade de cimento indicadas na tabela seguinte.

Tabela 33-Mistura dos adjuvantes utilizados em gramas na Amassadura 5-B

Pozzolith 390 N (Plastificante)	Glenium Sky 511 (super-plastificante)
18.0	21.6
0.5% de kg cimento	0.6% de kg de cimento

Os resultados da determinação da consistência foram novamente deformados, ou seja, não válidos, em que de acordo com o critério anterior, foi obtido uma média de 100 mm de abaixamento no ensaio do cone de Abrams. O registo da consistência foi validado, apesar de as variações neste caso, serem superiores entre os três ensaios realizados.

Tabela 34-Resultados dos ensaios da resistência à compressão resultantes das Amassaduras 5

Amassadura	Nº de dias	Dimensões (mm)			Massa (g)	Massa Volúmica (Kg/m ³)	Força Rotura (KN)	Tensão Rotura (MPa)
		a1	a2	h				
Adição de água	7	150	150	150	8580	2540	793.4	35.5
	28	150	150	150	8660	2570	1039.2	46.0
Combinação de adjuvantes	7	150	150	150	8560	2540	862.4	38.5
	28	150	150	150	8600	2550	1169.8	52.0

Na primeira amassadura obteve-se o total de 252,4 litros por m₃ de betão, contando com a água livre (52.0 litros/m₃), originária da diferença entre a água da humidade existente nos agregados e a água que será absorvida. Sendo assim, a relação água/cimento para esta mistura foi de aproximadamente 0.7. Com este valor, obteve-se o valor de 46 MPa aos 28 dias de cura, como foi representado na Tabela 34.

Com semelhante resultado em termos de consistência, a segunda amassadura com a combinação de adjuvantes, proporcionou um acréscimo considerável da resistência à compressão sendo o valor obtido de 52 MPa. Este facto justifica-se pela redução da relação A/C de 0.7 para 0.6, que era o máximo pretendido e também pelo efeito do super-plastificante em termos de “fortalecimento” do ligante hidráulico. A redução do A/C de 0.7 para 0.6, representou neste caso uma diminuição de cerca de 18% da quantidade de água.

Comparando os resultados, podemos concluir que a utilização de um super-plastificante, neste caso o Glenium Sky 511, contribui de uma forma muito significativa para a redução de água na amassadura, contribuindo também para o aumento da resistência à compressão, e mantendo semelhantes desempenhos de trabalhabilidade.

3.2 Análise das composições efectuadas

Com a parte experimental referente às amassaduras concluída, foram efectuadas diversas análises aos resultados obtidos de resistência à compressão e consistência, e ao processo geral da formulação que foi realizado.

Foi realizada uma análise ao método teórico utilizado, à conformidade dos resultados da resistência, à qualidade da matéria-prima e também à água de amassadura e efectiva.

3.2.1 Método teórico de Faury

Relembrando que a aplicação deste método de determinação da composição foi efectuada com a utilização dos valores padrão tabelados para os diferentes parâmetros, foi possível averiguar a pouca aplicabilidade dos mesmos.

Os parâmetros A, B, K e K' foram inicialmente definidos para uma trabalhabilidade mole, correspondendo a um medição da mesma, através do abaixamento do cone de

Abraams, em valores entre 40 a 150 mm, que por sua vez são classificados na abrangência de S2 e S3. Com a definição desses parâmetros, concretamente A e B, com os valores de 30 e de 2 respectivamente, foi constantemente obtido uma divergência considerável, entre a curva teórica e a real.

A Figura 25 é relativa à composição do betão criado na amassadura 2. A oscilação destacada nesta figura, pela designação A, é justificada pela diferença granulométrica, representada por B, entre a areia do mar e sarrisca representada na Figura 26. Esta diferença é referida em relação às outras curvas granulométricas, representadas por C e D. Um grande afastamento entre curvas no gráfico, indica uma fraca continuidade granulométrica entre agregados, para a mistura do betão.

Também possivelmente devido ao método de ajuste das percentagens utilizado, que provocou um acréscimo de areia, reduzindo a quantidade de todos os outros agregados proporcionalmente. O intervalo granulométrico A, delimita as partículas finas (4 mm) das grossas, na mistura de agregados do betão. Sendo assim, pode-se verificar alguma insuficiência de finos na mistura, ou noutra perspectiva, um excesso de agregados grossos. Este facto foi perceptível na realização das amassaduras, em que o betão fresco apresentou um aspecto granular.

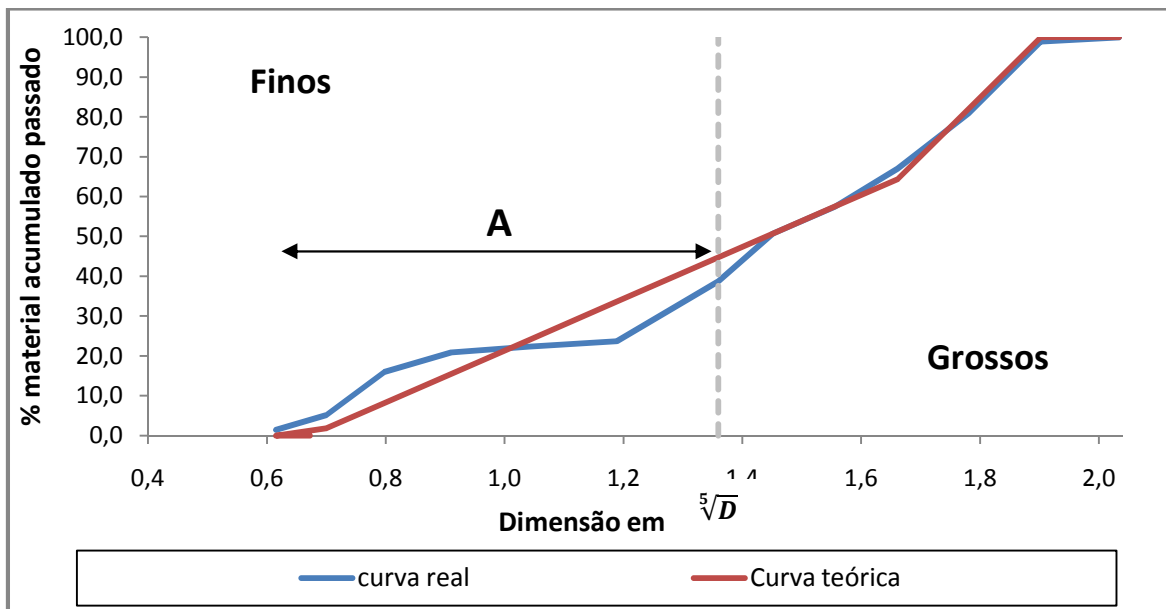


Figura 25-Análise das diferenças entre a curva teórica e real de granulometria da mistura

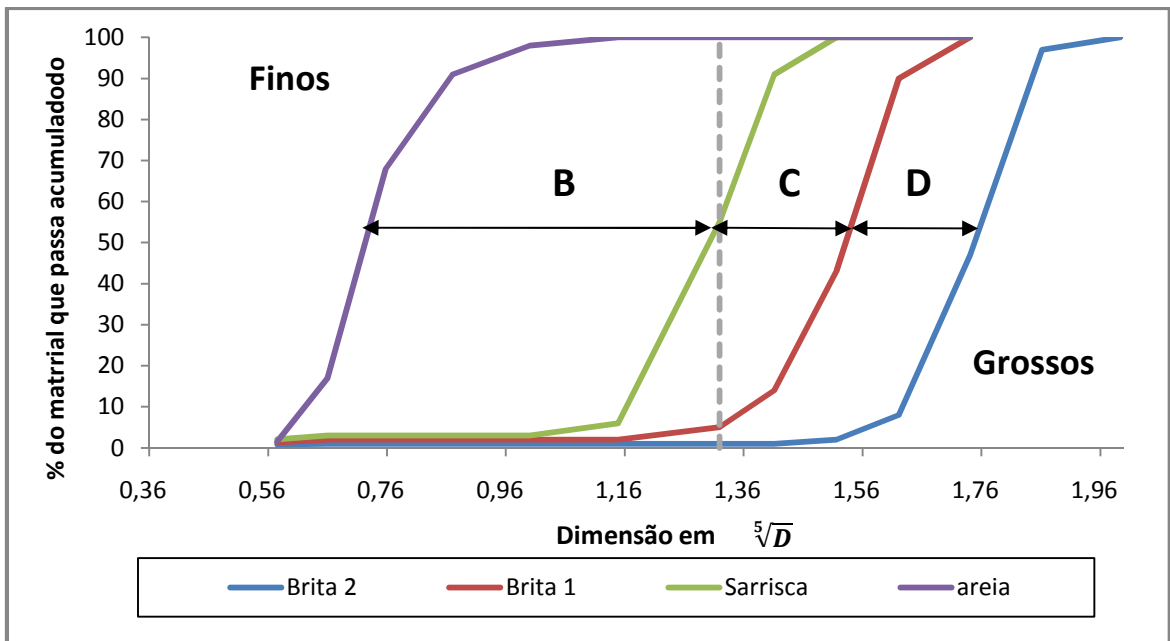


Figura 26-Análise entre as curvas granulométricas dos agregados

De acordo com esta análise foi realizada uma alteração na formulação teórica, em relação aos materiais utilizados e dos parâmetros utilizados no método de Faury, que resultou nas composições das amassaduras 5-A e 5-B.

3.2.1.1 Formulação ajustada

Para reduzir as diferenças granulométricas foi escolhido, de acordo com o tipo de agregados disponíveis, o pó de pedra, por possuir uma granulometria intermédia entre a areia do mar e a sarrisca.

Inicialmente foi efectuado uma troca directa entre o pó de pedra e a sarrisca, cujos resultados das curvas reais continuaram a não ser satisfatórios. Sendo assim, apesar de em termos de fabrico industrial, a empresa estar limitada à utilização máxima de quatro agregados, foi decida a utilização de cinco agregados, em termos experimentais.

Esta introdução de um novo material, e sua determinação não foi em concordância com a metodologia aplicada para todas as outras amassaduras anteriores. Como representado na Tabela 35, houve uma restrição imposta prévia, à aplicação do método de Faury, de forma a limitar a quantidade de material que passa no peneiro de 0.063 mm, denominado fíler.

A denominada mistura de finos (Mix) foi assim limitada a 60 % de areia do mar e 40 % de pó de pedra, e a curva granulométrica resultante é a representada no Figura 27. A curva Mix ficou com uma granulometria ligeiramente mais extensa do que a da areia do mar, aproximando-se assim da granulometria da sarrisca.

Esta limitação, em termos de formulação, podia ter sido efectuada em relação a um valor máximo de teor de cloretos, visto que todos os agregados, a areia do mar possuía teoricamente um valor mais alto para esse parâmetro.

Tabela 35- Granulometria dos agregados finos da amassadura

Abertura da malha (mm)	Material que passa através do peneiro %		
	Pó pedra	Areia	Mix
0,063	16	1,5	7,3
0,125	19	17	17,8
0,25	27	68	51,6
0,5	39	91	70,2
1	58	98	82
2	89	100	95,6
4	100	100	100
5,6	100	100	100
8	100	100	100
11,2	100	100	100
16	100	100	100
22,4	100	100	100
31,5	100	100	100

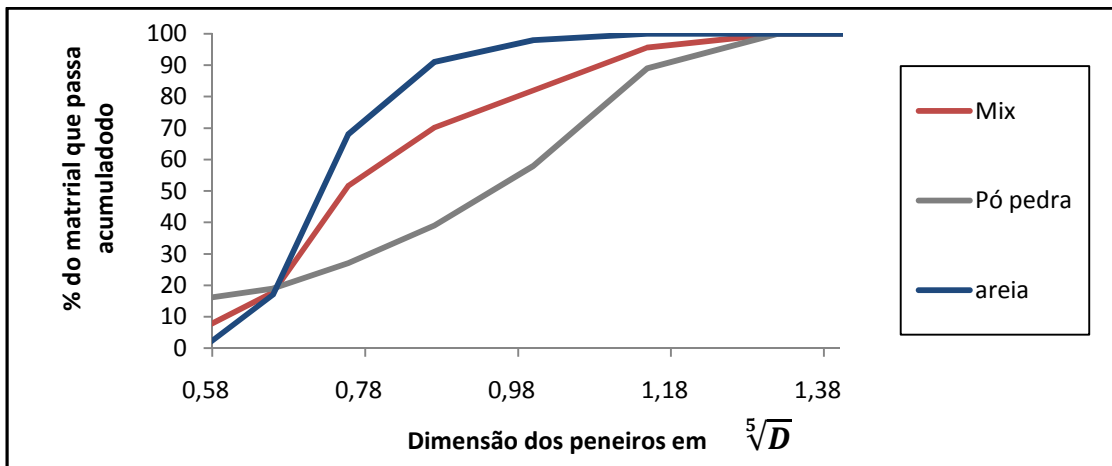


Figura 27-Granulometria da mistura de agregados finos

A escolha dos parâmetros tabelados, para os valores de A e B, foi para uma trabalhabilidade fluida. Como estes valores tabelados para a trabalhabilidade, dependem de diversos factores, como a forma do agregado, achou-se por bem, optar por um nível de trabalhabilidade tabelada superior ao pretendido, de forma a adaptar os parâmetros, para o caso dos agregados usados nas amassaduras.

O valor atribuído para A foi de 38 e para o B foi de 2, o que resultou no valor 77,7% para metade da dimensão máxima na curva de Faury, enquanto que com os parâmetros anteriores, o valor era de 69,7%, como representa o gráfico seguinte.

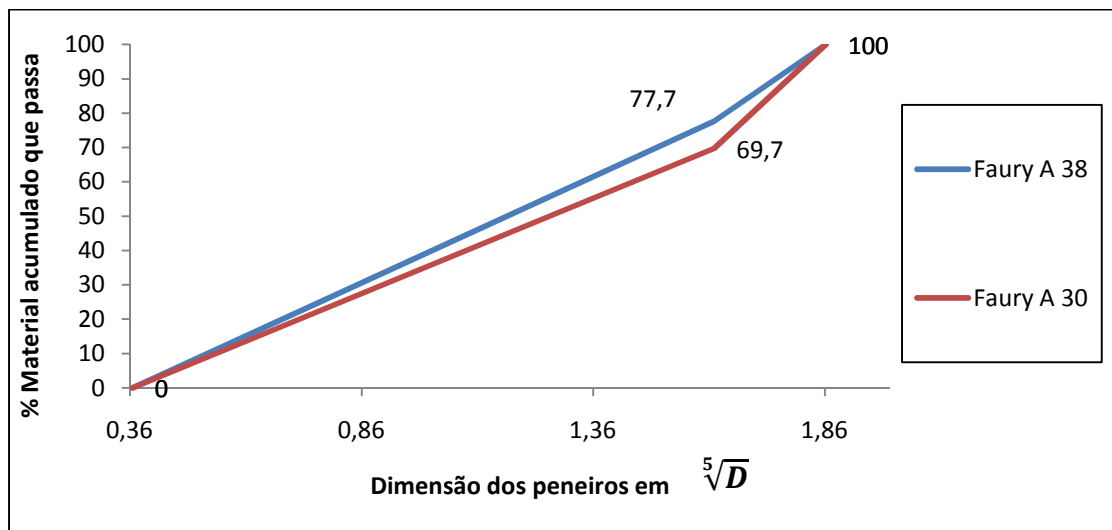


Figura 28- Curvas de Faury com diferentes valores de A

Com esta nova curva de referência Faury A 38, o restante processo foi o mesmo, determinando a curva de Faury A 38 sem cimento, método gráfico e ajustes para obtenção do mesmo módulo de finura, resultando na determinação da granulometria da mistura.

Tabela 36- Granulometria da amassadura 5

Abertura Peneiro (mm)	Brita 2		Brita 1		Sarrisca		Mix		Curva mist. Gran.	Curva Teórica
	%	0,295	%	0,163	%	0,220	%	0,321		
0,063	0,8	0,2	1,3	0,2	2,1	0,5	7,3	2,3	3,3	0,0
0,125	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,7	17,8	5,7	7,0	3,4
0,25	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,7	51,6	16,6	17,8	10,6
0,5	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,7	70,2	22,5	23,8	18,8
1	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,7	82,0	26,3	27,6	28,2
2	1,0	0,3	2,0	0,3	6,0	1,3	95,6	30,7	32,6	39,1
4	1,0	0,3	5,0	0,8	55,0	12,1	100,0	32,1	45,3	51,6
5,6	1,0	0,3	14,0	2,3	91,0	20,0	100,0	32,1	54,7	58,3
8	2,0	0,6	43,0	7,0	100,0	22,0	100,0	32,1	61,7	65,9
11,2	8,0	2,4	100,0	16,3	100,0	22,0	100,0	32,1	72,8	73,6
16	47,0	13,9	100,0	16,3	100,0	22,0	100,0	32,1	84,3	86,7
22,4	97,0	28,6	100,0	16,3	100,0	22,0	100,0	32,1	99,1	100,0
31,5	100,0	29,5	100,0	16,3	100,0	22,0	100,0	32,1	99,9	100,0

Com esta amassadura realizada, o objectivo de aproximar a curva real de granulometria da mistura com a curva teórica de Faury, foi alcançado (Figura 23).

Realizadas as amassaduras com este tipo de formulação, apesar de um aumento de trabalhabilidade do betão fresco, não foi possível considerar os resultados como inteiramente conclusivos, devido à deformação nos resultados do ensaio de cone de Abraams.

3.2.1 Conformidade dos resultados de resistência

Para fins representativos, não exactos e nem conclusivos, foi analisada a conformidade dos resultados da resistência à compressão, relativamente aos valores pretendidos e cumprimento dos critérios.

No âmbito de análise aos resultados de resistência, foi elaborado uma análise comparativa entre os resultados aos sete dias das amassaduras realizadas e os obtidos através do EC 2.

A Figura 29 representa a evolução da resistência, relativamente a duas variantes, o número de dias (t) e um factor dependente do tipo de cimento (s), que para o caso deste estudo, toma o valor 0.2 segundo o EC2.

Como não foram obtidos valores para a resistência de amassaduras aos 2 dias, que resultariam numa classificação útil e necessária no momento da entrega do betão em obra, foi efectuada uma análise com os dados disponíveis, ou seja aos 7 e 28 dias.

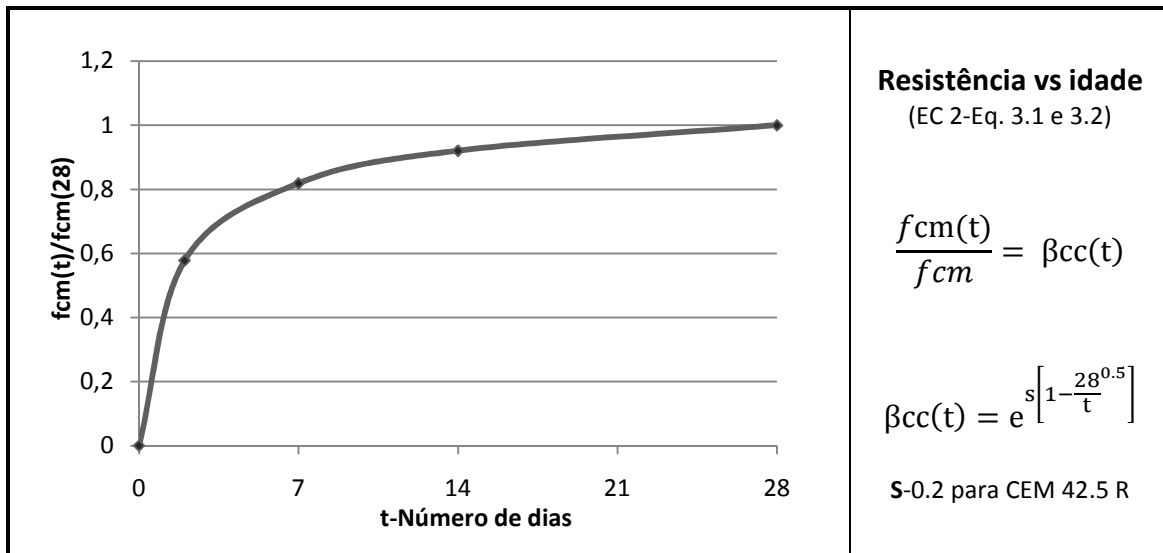


Figura 29- Resistência à compressão do betão em relação a t dias (EC 2)

Os resultados de resistência da amassadura 3 foram ajustados porque o ensaio de determinação da resistência à compressão do betão ocorreu 31 dias após o fabrico dos mesmos e não aos 28 dias como era desejado. Através do $\beta_{cc}(31)$ do EC 2, foi possível estabelecer uma relação de 1.01 relativamente ao resultado aos 28 dias, passando a ser atribuído o valor de 48.5 MPa para o fck da amassadura 3. Com os todos os valores necessários foi obtido os resultados expressos na tabela seguinte.

Tabela 37-Desenvolvimento da resistência aos sete dias das amassaduras realizadas

Amassadura	$\beta_{cc}(7)$ (EC 2)	$f_{ck}(7)/f_{ck}(28)$ (Amassaduras)
2	0.82	0.75
3		0.76
3-B		0.76
5		0.77
5-B		0.74

Na Tabela 37, podemos constatar que o crescimento da resistência no período referido, para as diferentes amassaduras realizadas, fica aquém da referência de endurecimento presente no EC 2. Este facto, não representa nenhuma insatisfação perante os resultados, devido aos valores de $\beta_{cc}(t)$ serem somente representativos e não exactos. Estes dependem somente de dois factores, como a idade e o tipo de cimento, descurando outros factores como A/C, adjuvantes ou tipo de agregados. Podemos denotar uma baixa variação entre os resultados das amassaduras, possivelmente justificada pela constância da maioria dos factores que influenciam a resistência do betão.

Para examinar a conformidade da resistência, foram seleccionados os critérios mais adequados a este estudo. Esta análise não é exacta, devido a não se ter vários resultados para a mesma amassadura, de forma a obter um valor médio (fcm), cujo número mínimo de resultados foi referido em 2.1.1.

Apesar deste facto, achou-se interessante proceder com a análise, de forma a elucidar, como seria determinada a conformidade das amassaduras, em termos de resistência à compressão.

Devido às condicionantes já referidas, adoptou-se o resultado de cada ensaio como o valor alvo de análise de cada amassadura, com a excepção da quinta, em que foram utilizados dois provetes aos 28 dias, sendo o fcm, a média desses resultados.

Tabela 38-Análise de conformidade da resistência à compressão

Amassadura	Fck,cub (MPa)	Resultados (MPa)	Ensaio iniciais fcm ≥ fck+12	Ensaio individual fcm ≥ fck - 4
2	37	48	Não conforme	Conforme
3		48.5	Não conforme	
3-B		50	Conforme	
4		45	Não conforme	
5		46	Não conforme	
5-B		52	Conforme	

Com os condicionalismos anteriormente referidos para esta análise, podemos concluir que de acordo com os dados disponíveis, somente a composição 3-B e 5-B estariam em conformidade com os critérios escolhidos. Isto sabendo que esta análise de conformidade, representa o caso mais gravoso de oscilação entre ensaios experimentais e fabrico numa central de betonagem, com o valor de 12, num intervalo de 6 a 12 MPa.

3.2.3 Qualidade da matéria-prima

Como é sabido, em toda a actividade económica de produção, a qualidade da matéria-prima é uns dos factores que influenciam o resultado do produto final em si, independentemente do processo de fabrico do mesmo. Partindo deste pressuposto, uma boa escolha dos materiais pétreos, que serão transformados através do processo de britagem, torna-se extremamente importante. Entende-se com uma boa escolha de uma forma geral, um material pétreo que terá nas suas características um bom comportamento, como no caso da resistência à compressão.

No processo de fabrico do betão da empresa, surgem para a mesma composição, amplitudes nos resultados de resistência e consistência, havendo diversas fontes possíveis para justificar o referido.

A maximização da homogeneidade do material pétreo, permitirá um melhor controlo, porque assim torna o mais constante possível, as características do material pétreo

presentes nos agregados, como a brita. Esta optimização permitirá a possibilidade de manutenção da qualidade do produto final.

No caso particular da ilha da Madeira, a existência de uma grande heterogeneidade de material pétreo e terroso, torna a pré-selecção dos materiais uma condição importante. No caso da empresa envolvente no estudo, como possui uma central de britagem, esta selecção é possível antes do inicio do processo de britagem. Em situações de agregados adquiridos a outras empresas, a escolha deverá recair para agregados que garantam a qualidade referida e que se “associem” melhor com os outros.

Na Figura 30 é possível visualizar parte de uma amostra de agregados provenientes da empresa, com alguma heterogeneidade de material pétreo presente. Tal é evidenciado pela Figura 30-A, que para além da diversidade, demonstra igualmente, a grande porosidade presente em alguns desses materiais não desejados. De referir que a ultima figura referida, é representativa de uma selecção propositada do material indesejável, proveniente de uma amostra muito superior à representada.

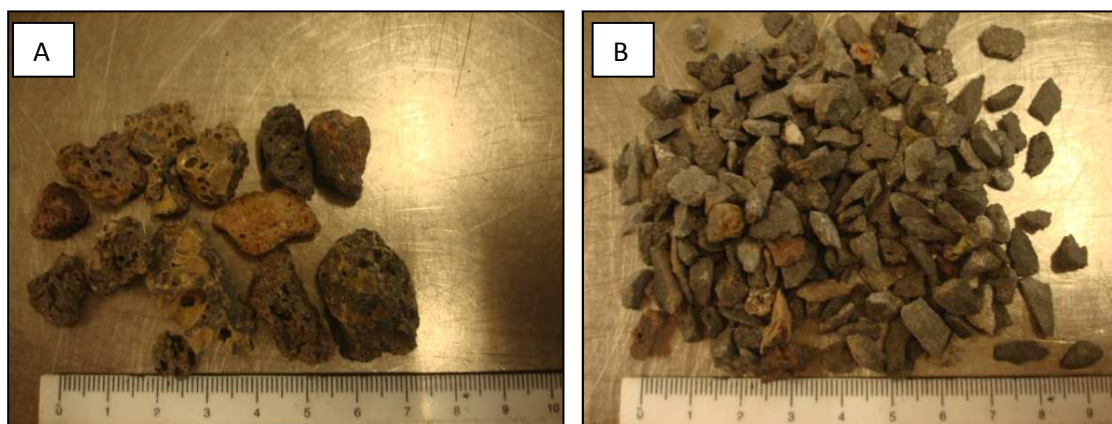


Figura 30-Amostras de material pétreo utilizado no EN NP 1097-6

A presença de material pétreo com grande porosidade, não só deteriora a resistência do betão, bem como a trabalhabilidade. Isto por reduzir a quantidade de água existente para a “criação” do ligante hidráulico, devido a parte desta saturar os poros.

Uma grande porosidade pode provocar durante o processo de mistura, a quebra desses agregados que aumenta a percentagem de finos existentes na mistura

(Mindess, et al., 1981), comprometendo a granulometria da mistura pretendida, alterando assim o módulo de finura da mesma.

Como anteriormente referido, na Figura 30-A é possível confirmar a existência de agregados com grande porosidade, Figura 30-B pode-se visualizar a forma achatada, ou laminar, da grande parte dos agregados. Esta forma não constitui como uma boa característica para garantir a trabalhabilidade do betão, ao invés da forma cúbica ou esférica.

Na determinação da consistência (Figura 31), por exemplo, através do ensaio de cone de Abraams (A e B), as partículas com forma cúbica ou esférica, tem mais facilidade em reajustar a uma nova posição (B e C) porque mais facilmente conseguem rodar sobre as mesmas. Por outro lado as partículas com forma laminar ou achatada, têm tendência a se dispor em planos horizontais, tornando assim a sua posição mais estável em A, logo mais difícil de se ajustar a uma nova posição em B. A grande rugosidade das partículas também prejudica o reajustamento das mesmas.

Para poder haver uma boa trabalhabilidade com estes agregados, terá que haver camadas compostas por agregados finos, cimento, água e possivelmente adjuvantes, com espessura (e) suficiente para poder ajudar as partículas em questão em se reajustar. Estas camadas viscosas efectuaram menos atrito, do que o contacto directo entre superfícies rugosas de partículas diferentes.

Um acréscimo de finos torna-se importante, ao invés da adição de mais água que vazará lateralmente, fazendo com que a camada (e) torne-se quase inexistente e provocando somente um assentamento das partículas.

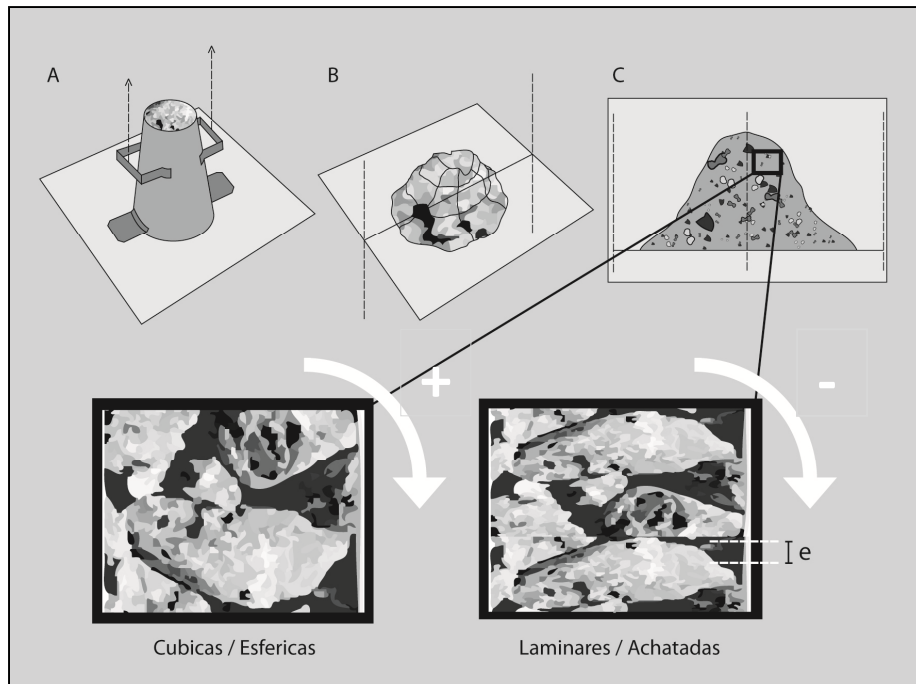


Figura 31- Ilustração representativa da influência da forma dos agregados

3.2.4 Água de amassadura e efectiva

O principal problema deparado foi os resultados insatisfatórios da consistência dos diversos betões criados. Como base em avaliações visuais e comparação com outras composições, para o mesmo ou semelhante tipo de betão, foi analisado que uma das principais dúvidas, logo possível fonte de erro, residia na quantificação da água de amassadura.

Um dos aspectos relativos a esse parâmetro que suscitou mais dúvidas, foi o ensaio de determinação da absorção dos agregados, devido ao processo experimental em si. A obtenção da absorção dos agregados é efectuada com uma amostra parcial e não integral, devido a retirada do fíler (partículas menores que 0.065 mm), o que torna o resultado não representativo da totalidade granulométrica dos diferentes agregados.

A variação dos resultados deverá ser mais acentuada consoante a quantidade e tipo de partículas existente no fíler, como a existência de material terroso ou com porosidade superior.

Outro aspecto analisado a este procedimento experimental, é referente à obtenção da massa saturada com superfície seca da amostra analisada, nomeadamente a agregados com partículas entre 0.063 e 4 mm, ou seja agregados finos. Esta análise é referente à possibilidade da existência de graus intermédios de saturação das partículas, entre a partícula seca e a saturação total. Sendo assim, a Figura 32 ajuda a representar esses graus ou níveis de saturação, em que o valor d , representa a profundidade da camada seca das partículas, desconhecida aquando da obtenção do estado saturado com superfície seca. Para além do referido, a obtenção deste estado é sujeita ao nível de perícia e experiência de quem está realizando o ensaio.

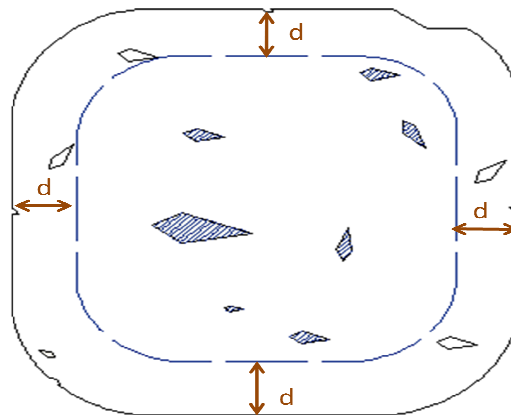


Figura 32- Representação do grau de saturação de um agregado

A associação entre parâmetros de humidade e absorção é igualmente repleta de dúvidas, nomeadamente a relação entre capacidade de absorção total, entre seca e totalmente saturado, e a absorção efectiva entre estado húmido e o saturado.

Relativamente à determinação dos teores de humidade dos agregados, esta revelou uma grande diferença entre valores para agregados finos e grossos, com especial atenção para o valor determinado para a areia do mar. Este pode ser explicado pelo facto da tendência de pequenos agrupamentos das partículas nas areias, reterem consideráveis quantidades de água entre si, para além das películas superficiais comuns aos outros agregados. A formação dessas películas de água entre as partículas faz com que estas se afastem entre si, aumentando o seu volume aparente, que poderá causar erros na quantificação do volume a utilizar, tendo assim consequência

no próprio volume do produto final, o betão. Ao saturar a areia essas películas são destruídas fazendo com que o volume retorne à referência dos valores no estado seco.

Este facto é representado na Figura 33, onde é possível visualizar a relação entre esses agrupamentos de partículas e diferentes estados de humidade, como o seco (A), o parcialmente saturado (B) e o totalmente saturado (C).

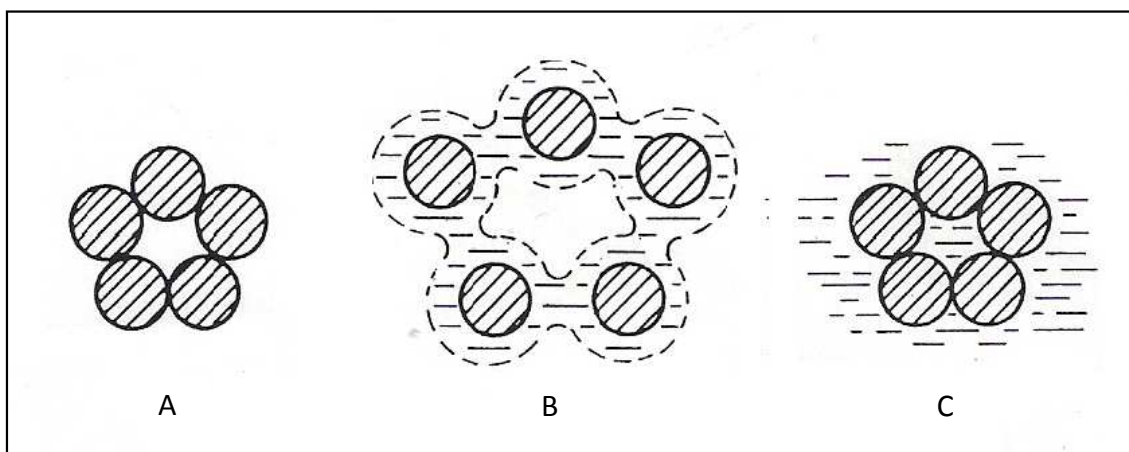


Figura 33-Fénomeno de agrupamento de partículas (bulking) em agregados finos (Mindess, et al., 1981)

Estabelecendo uma relação entre o aumento do volume dos agregados relativamente à areia seca e o teor de humidade, é possível observar o incremento de volume para os estados descritos anteriormente, no qual a Figura 34 representa essa relação. Esta relação está em sintonia com a teoria de acréscimo de volumes nos agregados consoante o teor de humidade presente.

Como exemplo, podemos analisar que seria necessário um aumento entre 35 a 40 % do volume na medição de agregados finos se estes se possuísem teores de humidade na ordem dos 5 %. foi (Mindess, et al., 1981).

Este facto seria extremamente importante, caso as medições das quantidades dos agregados para as amassaduras, tivessem sido realizadas com base na volumetria e na no seu peso, como foi o caso deste estudo. Na quantificação da areia para as amassaduras, bem como para os restantes agregados, as massas foram determinadas tendo em conta a presença de água sob a forma de humidade, aumentando assim os seus valores, relativamente à massa seca.

Em termos do fabrico de betão numa central de betonagem, as considerações anteriormente referidas terão de ser levadas em conta para um bom controle das quantidades de agregados em stock.

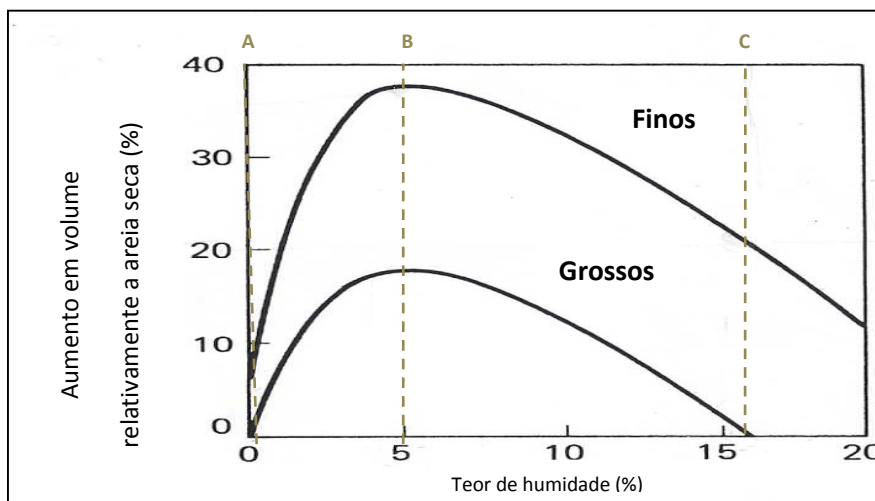


Figura 34-Relação entre acréscimo de volume e teor de humidade (Mindess, et al., 1981)

3.3 Segunda Parte – Estudo complementar aos agregados

Na sequência das análises efectuadas aos resultados da primeira parte dos trabalhos experimentais, foi decidido efectuar um estudo que pudesse ajudar a esclarecer algumas dúvidas surgidas na quantificação da água de amassadura. Neste destacou-se a determinação dos valores de absorção de água por parte dos agregados.

Os agregados finos escolhidos para este trabalho foram a areia do mar, areia britada e pó de pedra, para fins comparativos e dentro da gama de agregados finos utilizáveis e disponíveis nas composições de betão.

3.3.1 Absorções de amostras com e sem filer

Estes ensaios foram devidos em duas partes, em que a primeira respeitava integralmente o protocolo experimental normativo (NP EN 1097), ou seja, com a remoção das partículas inferiores a 0.065 mm, e a segunda não contemplou a referida

remoção. De maneira a distinguir os dois processos, foram denominadas de amostra lavada e não lavada respectivamente. A diferença das amostras está exemplificada na Figura 35, para o caso do pó de pedra.

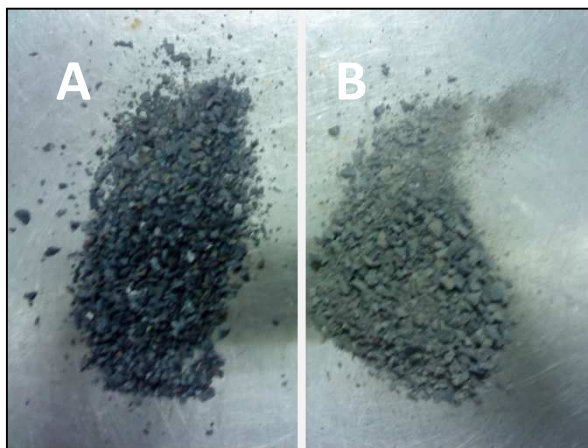


Figura 35-Amostra de pó de pedra lavada (A) e não lavada (B)

Esta diferença de procedimento poderia quantificar a influência do filler na determinação da absorção, possivelmente devido à possível existência de materiais terrosos com grandes capacidades de retenção de água, como a argila.

O ensaio para a determinação deste parâmetro, é consideravelmente demorado, sendo estimada a duração média de aproximadamente 2 dias para cada absorção. Isto devido ao facto da amostra ser alvo de secagem em estufa no início e no fim do ensaio, imersão de 24 ± 0.5 horas dos agregados em água, e neste caso particular a secagem dos agregados finos (menor que 4 mm) do estado saturado e molhado, para o saturado com superfície seca.

A descrição do método de obtenção da massa saturada com superfície seca das amostras, já foi referenciada anteriormente nos ensaios preliminares das composições. Para este estudo o procedimento aplicado é referente a agregados com partículas com dimensões entre 0.063 e 4 mm.

Para o procedimento referido, a averiguação da passagem de estado referida, foi feita com a realização de um ensaio com um cone (Figura 11), onde foi inserida a amostra até perfazer a totalidade do volume do mesmo. Foi efectuada uma compactação

“leve” com 25 pancadas e a validação do ensaio foi obtida com uma avaliação da forma de ajustamento das partículas indicada na Figura 36-C. A Figura 36-A/B representa, de acordo com NP EN 1097-6, que as partículas ainda não se encontravam com superfície seca. Este ensaio do cone tem algumas semelhanças com o slump, sendo neste caso a análise dos resultados restrita ao resultado da amostra “deformada”, e não o valor de abaixamento.

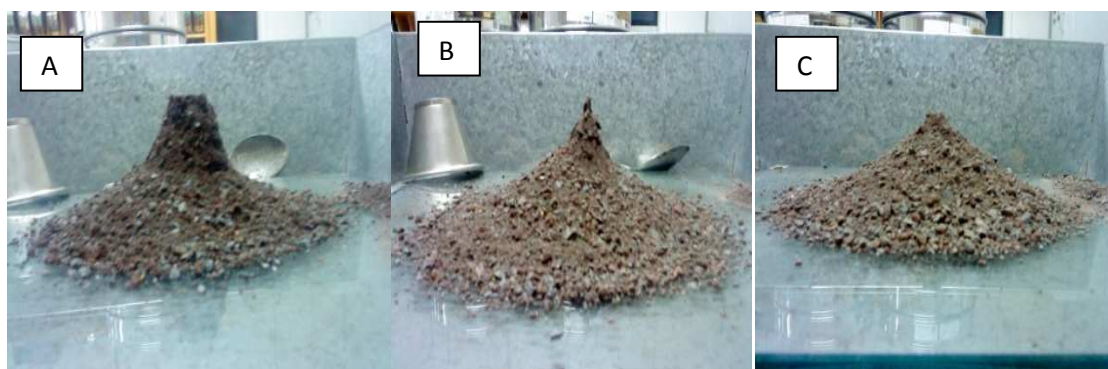


Figura 36-Determinação do estado das partículas (saturadas com superfície seca ou não) (A e B- Superfície húmida; C- Superfície seca)

A figura anterior representa a execução do ensaio para a areia britada, sendo a mesma comum aos restantes agregados finos. A Tabela 39 indica as medições parciais para obter os valores de absorção para cada tipo de agregado, relacionando com a percentagem de material com dimensões inferiores a 0.063 mm para cada um.

Tabela 39- Absorções de diversos agregados finos com e sem fíler

	Areia do Mar		Areia Britada		Pó de Pedra	
	Não lavada	Lavada	Não lavada	Lavada	Não lavada	Lavada
Material saturado com Superfície seca (g) (M1)	1061.9	1069.3	1238.2	1118.4	1447.5	1247.7
Matéria seca (g) (M2)	1039.2	1049.0	1200.5	1086.7	1425.8	1231.2
Absorção WA₂₄ (%)	2.2	1.9	3.1	2.9	1.5	1.3
Amostra inferior a 0.065 mm (%)	4.0		3.0		14.0	

Através dos resultados obtidos, pode-se verificar que a diferença para entre as amostras lavadas e não lavadas não é muito significativa. Pode-se analisar que as diferenças entre as amostras lavadas e não lavadas de areia do mar, areia britada e pó de pedra são aproximadamente idênticas

Para este ensaio realizado, os resultados do pó de pedra foram de alguma foram insatisfatórios de acordo com as expectativas. De referir, que o ensaio para este agregado foi repetido, no qual foram obtidos os valores de 1.7 e 1.9 %, para amostras não lavadas e lavadas, respectivamente.

Os resultados podem ser justificados, devido a uma grande perda de quantidade de material com dimensões inferiores a 0.063 mm, nas etapas de imersão das amostras e posterior remoção do excesso de água, antes de iniciar o processo de secagem.

De forma a garantir uma melhor exactidão de resultados, a quantidade de amostra deveria ter sido menor, de forma a ser necessária menos quantidade de água para imergir o agregado. Isto tendo em conta, o procedimento de não retirar água proveniente do picnómetro com o agregado, deixando a secar toda água no tabuleiro. Este processo sugerido seria extremamente demorado, devido ao volume de água para ser evaporado, mas permitiria algum assentamento das partículas muito finas suspensas no líquido. Assim a influência do fíler seria mais correctamente quantificada e analisada.

4. Conclusões

Com a realização deste estudo, pode-se concluir que as patologias, que ocorrem do processo de criação de um betão com determinados desempenhos, advêm da grande diversidade de factores existentes.

Conclui-se assim, que a complexidade da obtenção da composição ideal de um betão, não é dependente do processo teórico em si, mas sim dos factores que indirectamente afectam os resultados do betão. Estes, não são quantificáveis no cálculo da composição, e estão associados às características dos agregados que constituem cerca de 70 a 80 % do volume total do betão.

O controlo dos agregados deverá surgir em primeira instância, numa selecção homogénea de material pétreo de qualidade, e na utilização de um processo de britagem que possibilite, de acordo com o material escolhido, a obtenção de agregados com forma cúbica ou esférica. Após o processo de britagem, deverá ser controlada a humidade dos agregados, protegendo da variação das condições ambientais. Sugere-se a utilização de sondas na central de betonagem, ou outro tipo de instrumentação adequada, que permita quantificar a humidade e proceder ao ajuste da água de amassadura.

Em termos do método teórico de Faury, conclui-se que, de acordo com a qualidade geral dos agregados utilizados, este ser efectuado de forma a potencializar o acréscimo da trabalhabilidade. Isto tendo em conta, os resultados excedentários de resistência à compressão, relativamente ao previsto.

Para isto é proposto uma curva real de referência, indicada na Figura 37, obtida com base nas análises efectuadas aos trabalhos experimentais realizados.

Para o tipo de agregados usados, com maioritariamente forma achatada, os parâmetros de trabalhabilidade de Faury não se adaptam a essa realidade. Sendo assim, para a obtenção de betões com consistência mínima de S3, ou seja, pelo menos 100 mm de abaixamento do ensaio de cone de Abrams, deverão ser atribuídos pelo menos o valor de 38 ao parâmetro A e de 2 ao B.

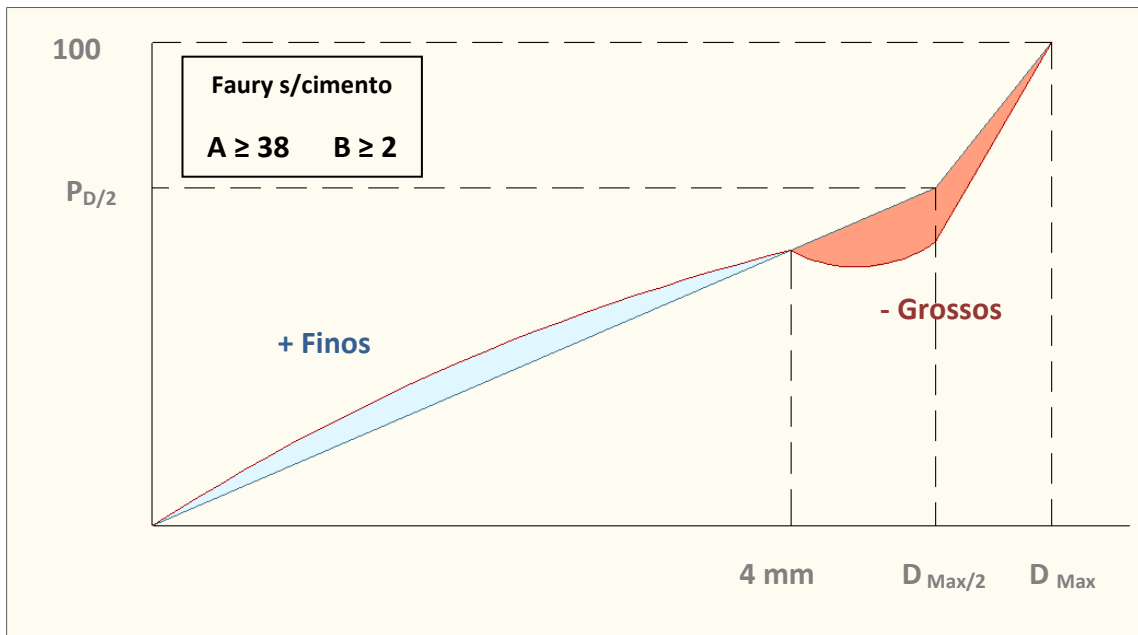


Figura 37- Curva real granulométrica de referência

A mistura sólida dos componentes de betão, deverá ter mais finos, comparando com o valor teórico da curva de referência, como indicado na Figura 37. Este incremento de finos possibilitará uma maior trabalhabilidade, garantindo um envolvimento sobre os agregados mais grossos, facilitando assim o reajuste a novas posições.

A quantidade de finos deverá ser efectuada com uma combinação de agregados finos, em semelhança ao utilizado neste estudo, podendo ser utilizados sob a forma de areia do mar, areia britada e pó de pedra. Esta combinação tem como objectivo restringir a quantidade de areia do mar, possuidora de um maior teor de cloretos. É importante referir, que este aumento de finos causará potencialmente um aumento da superfície específica e volume de vazios na mistura, que deverá ser compensando com um acréscimo de pasta de cimento, necessário para envolver todas as partículas.

A redução de agregados grossos deverá ser proporcional ao aumento de finos, de modo a manter o mesmo módulo de finura da mistura. Também permitirá, reduzir fenómenos descritos no estudo, como a interferência de partículas. Com estes ajustes a mistura obterá um aspecto menos granular permitindo uma maior fluidez.

A utilização de combinação de finos com areia britada ou pó de pedra, ou outros aditivos com menor índice de cloretos, poderá ser alvo de um estudo comprovando a redução da deterioração do betão por acção dos cloretos.

Caso a formulação de um betão siga estas recomendações de ajustamento, deverá ser efectuado um estudo detalhado da permeabilidade do betão endurecido, devido ao possível aumento de vazios no betão. Este aumento poderá ocorrer devido ao aumento de finos na mistura, que de acordo com a teoria apresentada em 2.2.3, refere que um excesso de finos tornará a mistura mais permeável apesar do aumento da trabalhabilidade. Sendo assim o estudo detalhado sobre a permeabilidade deste tipo de formulação permitirá determinar o limite de finos máximo a usar.

O aumento da permeabilidade do betão endurecido provocará um acréscimo da deterioração, através da carbonatação para o caso da classe ambiental do betão neste estudo.

Em termos dos resultados das amassaduras pode-se concluir que o objectivo de obtenção de um betão com classe de resistência C 30/37, consistência S3 e para uma classe de exposição ambiental foi alcançado. Isto tendo em conta os resultados obtidos de 52 MPa aos 28 dias e cerca de 100 mm de slump para um A/C de 0.6.

Analisando os resultados obtidos, para o estudo da influência do fíler na absorção, pode-se referir que estes não são conclusivos relativamente à sua relação entre quantidade e tipo de fíler. Sendo assim é sugerido a realização de um estudo mais aprofundado sobre este tema, possivelmente através de uma metodologia diferente da realizada neste trabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros é indicado um estudo complementar dentro da temática apresentada, averiguando os módulos de elasticidade para estas ou outras composições, analisando assim a influência das proporções de diferentes agregados na mistura, o tipo e a forma dos agregados, a temperatura, tempo de cura, teor de humidade no momento do ensaio de determinação e compactação incompleta. Isto tendo em conta o conhecimento da existência de amplitude de resultados para o mesmo tipo de betão, e também a percepção generalizada no meio da engenharia civil da Região Autónoma da Madeira, de valores inferiores ao padrão, resultando em previsões de deformações subestimadas.

Bibliografia

Argamassas com areia britada: influências dos finos da forma das partículas. **Silva, Narciso G., Buest, Guilherme e Campiteli, Vicente C. 2005.** Florianópolis : VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas-I Internacional Symposium on Mortars Technology, 2005.

Betão leve estrutural usando agregados de argila expandida . **Silva, B., Coutinho, J. e Neves, S. 2004.** s.l. : Encontro Nacional Betão Estrutural, 2004.

Características físicas da areia britada de origem basáltica e estudo de dosagem para concreto à base de cimento Portland para fins estruturais. **Lang, Cezar L. e Rocha, Janaíde C. 2006.** s.l. : Workshop- Desempenhos de sistemas construtivos, 2006.

Carla, Marchão e Julio, Appleton. 2006/2007. *Manual de apoio às aulas de Betão Armado I.* s.l. : IST, 2006/2007.

Concrete Mix Design and Optimization. **Shakhmenko, Genadij e Birsh, Juris. 1998.** Budapest : 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, 1998.

Costa, António e Appleton, Júlio. Análise da Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Expostas ao Ambiente Marítimo. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE).* Vol. Nº 46.

Coutinho, A. de Sousa e Gonçalves, Arlindo. 1994. *Fabrico e Propriedades do Betão Volume III.* Lisboa : LNEC, 1994.

Coutinho, A. de Sousa. 2006. *Fabrico e Propriedades do Betão Volume I.* Lisboa : LNEC, 2006.

Coutinho, A. de Sousa 2006. *Fabrico e Propriedades do Betão Volume II.* Lisboa : LNEC, 2006.

Coutinho, Joana de Sousa. 1998. *Excertos de "Melhoria da durabilidade do betão por tratamento da cofragem".* s.l. : FEUP, 1998.

Coutinho,Joana de Sousa 2006. *Manual de apoio às aulas de Materiais de Construção 2-1ª Parte Ligantes e Caldas 2002.* s.l. : FEUP, 2006.

Coutinho,Joana de Sousa 1999. *Manual de apoio às aulas de Materias de Construção-Agregados Para Argamassas e Betões.* s.l. : FEUP, 1999.

EN 1992-1. 2004. *Eurocódigo 2-Projecto de estruturas de betão-Regras gerais e regras para edifícios.* 2004.

Ensaio de absorção e permeabilidade em agregados. **Castro-Gomes, J.P., et al.**

Estudo experimental para validação de procedimento de determinação da absorção de agregados reciclados porosos. **Almeida, Vitor Santana Nichikaua e Dias, João Fernando.**

Figueira e Reis, João Diogo Alves Diniz. 2008. *Viabilidade da reutilização de resíduos finos provenientes do corte de GFRP na produção de betões.* s.l. : IST, 2008.

Lang, Cezar Luiz. 2006. *Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para utilização em concreto à base de cimento Portland.* Florianópolis : Universidade federal de Santa Catarina, 2006.

Martins, João Guerra,Ribeiro,César. 2003. *Sebenta de Materiais de Construção I-Betões Adjuvantes-série de materiais.* s.l. : Universidade Fernando Pessoa, 2003.

Mindess, Sidney e Young, J. Francis. 1981. *Concrete.* Estados Unidos da América : Prentice-Hall, 1981.

Nepomuceno, Miguel Costa Santos. 1999. *Estudo da Composição de Betões-Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica Aula Teórico-Prática.* Covilhã : Universidade da Beira Interior-Departamento de Engenharia Civil, 1999.

NP EN 1097. *Ensaio das propriedades mecânicas dos agregados.*

NP EN 12350-Ensaio do betão fresco. 2009.

NP EN 12390-Ensaio do betão endurecido. 2009.

NP EN 12620-Agregados para betão. 2004.

NP EN 197-1 *Cimento.*

NP EN 206-1. 2007. *NP EN 206-1 Betão Parte 1 especificação,desempenho,produção e conformidade.* 2007.

NP EN 932-Ensaio para determinação das propriedades gerais dos agregados.

NP EN 933. *Ensaio das propriedades gerais dos agregados.*

Portland Cement Institute. 1986. *Fulton's Concrete Technology.* Midrand,South Africa : The Natal Witness (Pty), 1986.

Rodolpho, Paula Medeiros. 2007. *Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada.* Brasília/D.F. : Universidade de Brasília-Faculdade de tecnologia-Departamento de engenharia civil, 2007.

Anexo I- Fichas técnicas dos agregados

Este anexo contém as fichas técnicas dos agregados utilizados na primeira parte do programa experimental, na realização das amassaduras.

FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

Produto: <input type="text" value="Pó de Pedra"/>	Utilização: <input type="text" value="Agregados para Betão (EN 12620)"/>
Origem: <input type="text" value="S. Martinho"/>	Tipo: <input type="text" value="Basalto"/>

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾				Outras características		
Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Límites Mínimos (%)	Límites Máximos (%)	Característica	Valor declarado	Categoria
63	100			Dimensão nominal (d/D)	0/4	
45	100			Granulometria		G _r 85
31,5	100			Teor de finos		f ₁₆
22,4	100			Qualidade dos finos	DND ²⁾	
16	100			Massa Volúmica (picnómetro)		
11,2	100			- Material impermeável	3,08 ± 0,04 Mg/m ³	
8	100	100	100	- Partículas secas em estufa	2,93 ± 0,04 Mg/m ³	
5,6	100	95	100	- Partículas saturadas	2,98 ± 0,04 Mg/m ³	
4	100	95	100	Absorção de água	≤ 5,0 %	
2	89			Retracção por secagem	0,044%	
1	58	38	78	Reacção álcalis-silica	DND ^{2),3)}	
0,5	39			Teor de cloretos	≤ 0,01 %	
0,25	27	7	47	Teor de sulfatos solúveis em ácido		AS _{sw} ³⁾
0,125	19			Enxofre total	≤ 0,038 %	
0,063	16	13	19	Teor de húmus	Isento	
				Teor de cont. orgânicos leves	DND ^{2),3)}	
				Teor de carbonato	DND ²⁾	

¹⁾ Valores em percentagem de passados

Parâmetros de controlo			
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	2,67	2,17	3,17
CF	3,71	3,21	4,21

²⁾ DND – Desempenho Não Determinado (Anexo ZA, secção ZA.1)
³⁾ Os valores para as categorias declaradas são facultados ao Cliente mediante pedido.

CE 1029	05 1029-CPD-PT 05 1419.0 EN 12620
--------------------------	--

Figura 38-Ficha técnica do Pó de pedra

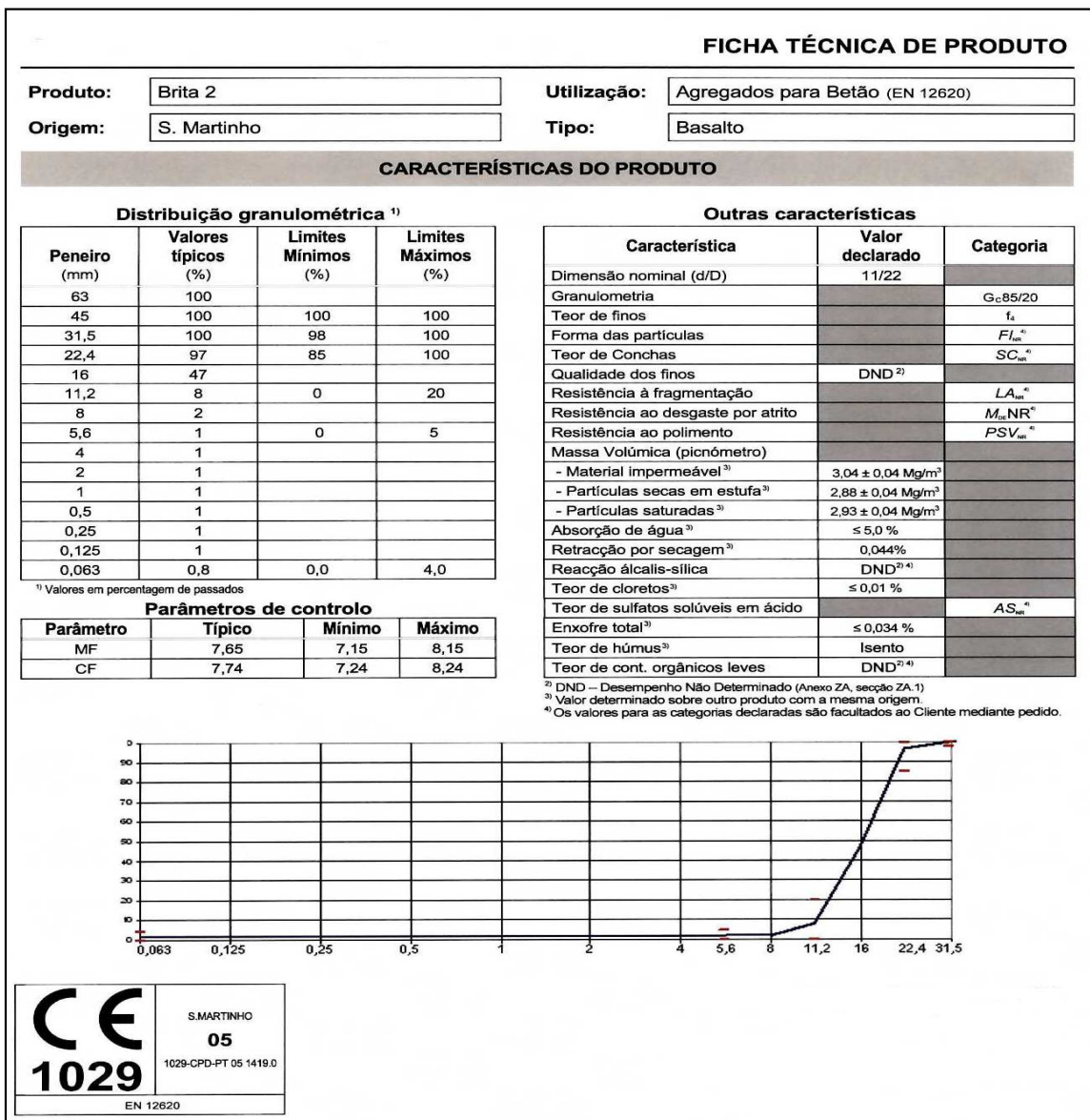


Figura 39-Ficha técnica da Brita 2

FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

Produto:	Brita 1	Utilização:	Agregados para Betão (EN 12620)
Origem:	S. Martinho	Tipo:	Basalto

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
63	100		
45	100		
31,5	100		
22,4	100	100	100
16	100	98	100
11,2	90	85	99
8	43		
5,6	14		
4	5	0	20
2	2	0	5
1	2		
0,5	2		
0,25	2		
0,125	2		
0,063	1,3	0,0	4,0

¹⁾ Valores em percentagem de passados

Parâmetros de controlo

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	6,60	6,10	7,10
CF	6,77	6,27	7,27

Outras características

Característica	Valor declarado	Categoria
Dimensão nominal (d/D)	4/11	
Granulometria		G _c 85/20
Teor de finos		f _s
Forma das partículas		FI _{rel} ²⁾
Teor de Conchas		SC _{rel} ²⁾
Qualidade dos finos	DND ²⁾	
Resistência à fragmentação		LA _{rel} ²⁾
Resistência ao desgaste por atrito		M _{rel} NR ²⁾
Resistência ao polimento		PSV _{rel} ²⁾
Massa Volúmica (picnómetro)		
- Material impermeável	3,04 ± 0,04 Mg/m ³	
- Partículas secas em estufa	2,88 ± 0,04 Mg/m ³	
- Partículas saturadas	2,93 ± 0,04 Mg/m ³	
Absorção de água	≤ 5,0 %	
Retração por secagem	0,044%	
Reacção álcalis-silica	DND ²⁾ 4)	
Teor de cloretos	≤ 0,01 %	
Teor de sulfatos solúveis em ácido		AS _{rel} ²⁾
Enxofre total	≤ 0,034 %	
Teor de húmus ³⁾	Isento	
Teor de cont. orgânicos leves	DND ²⁾ 4)	

²⁾ DND — Desempenho Não Determinado (Anexo ZA, secção ZA.1)

³⁾ Valor determinado sobre outro produto com a mesma origem.

⁴⁾ Os valores para as categorias declaradas são facultados ao Cliente mediante pedido.

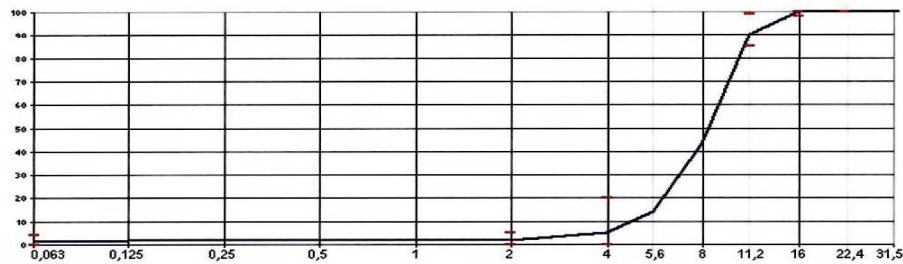


Figura 40-Ficha técnica de Brita 1

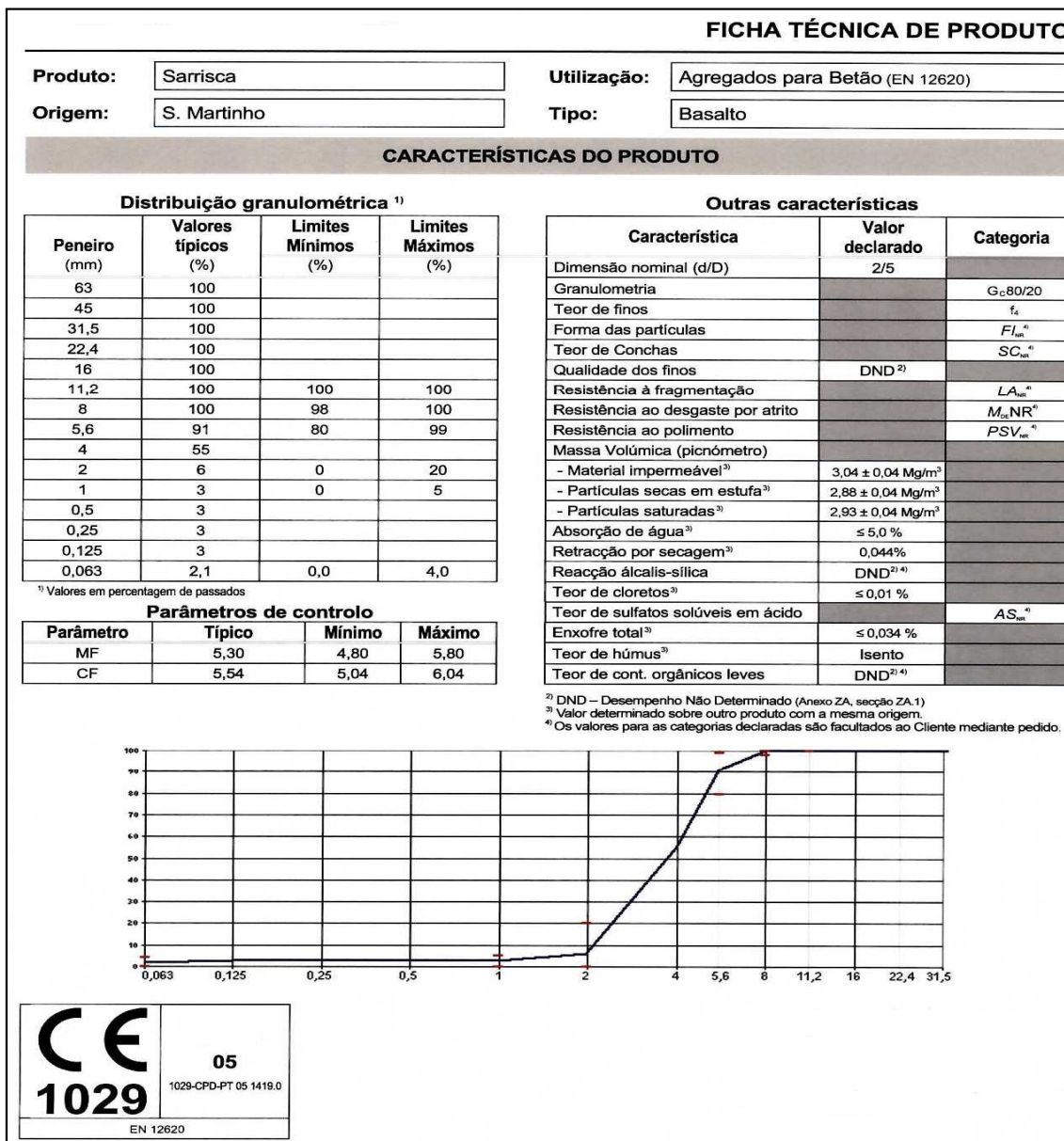


Figura 41-Ficha técnica de Sarrisca



FICHA TÉCNICA DO PRODUTO

Designação do Agregado: Areia Fina - 0/2 Centro de produção:

Aplicações: Argamassas e Betão

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Características	NP EN 12620	NP EN 12620
Tamanho das Partículas	0/2	0/2
Granulometria	—	G ₇₋₈₅
Massa volúmica das partículas secas	2,77 Mg/m ³	2,77 Mg/m ³
Massa volúmica das partículas impermeáveis	3,04 Mg/m ³	3,04 Mg/m ³
Massa volúmica das partículas lavadas com sup. seca	2,86 Mg/m ³	2,86 Mg/m ³
Absorção de água	3,2 %	3,2%
Teor de Finos	Categoria 3	f ₁₀
Cloretos (%)	0,14-0,56	0,14-0,56
Sulfatos solúveis em ácido	A _{0,2}	A _{0,2}
Enxofre total (%)	0,02	0,02
Teor de húmus	Mais claro que a solução padrão	Mais claro que a solução padrão
Retracção por secagem (%)	—	0,0-11 %

Granulometria			
Peneiro (mm)	Valores declarados (%)	Limite Inferior	Limite Superior (%)
20			
15			
12,5			
10			
7,5			
5			
4	100	100	100
2	100	95	100
1	98	78	100
0,5	91	—	—
0,250	68	43	83
0,125	17	—	—
0,063	1,5	0,0	7,0

Figura 42-Ficha técnica da Areia do mar

Anexo II- Resistência à compressão em basaltos da ilha da Madeira

Os ensaios foram realizados com video-extensómetro até à rotura, medido numa geratriz do provete, no LREC. Na tabela seguinte são apresentados os resultados para sete tipos de basalto ensaiados, em que alguns destes estão representados em nas figuras representadas. Este ensaio também possibilitou a obtenção dos módulos de Young, não sendo analisados neste estudo.

Tabela 40-Resultados de ensaios à compressão de diferentes basaltos no LREC

Basalto	Tensão de rotura (σ_u) (MPa)
A	173.8
B	126.1
C	216.3
D	146.1
E	117.1
F	81.4
G	62.6



Figura 43-Registo fotográfico de alguns dos basaltos ensaiados no LREC

Anexo III- Equações de NP EN 1097-6

Neste anexo é indicado as equações utilizadas para a determinação das massas volúmicas e absorções de água, em ambas as fases do programa experimental.

Massa volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m₃)

$$\rho_a = \frac{M_4}{\left[\frac{M_4 - (M_2 - M_3)}{\rho_w} \right]}$$

Massa volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m₃)

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{\left[\frac{M_1 - (M_2 - M_3)}{\rho_w} \right]}$$

Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Mg/m₃)

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{\left[\frac{M_1 - (M_2 - M_3)}{\rho_w} \right]}$$

Porcentagem de absorção de água após imersão durante 24 horas

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

Onde:

M₁ – Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar em gramas

M₂- Massa do picnómetro contendo o provete do agregado saturado em gramas

M₃- Massa do picnómetro apenas cheio com água em gramas

M₄- Massa no ar do provete seco em estufa em gramas

P_w – Massa volúmica da água consoante a temperatura da mesma.

Anexo IV- Formulações das Amassaduras

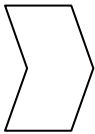
Este anexo contém algumas etapas dos processos de formulação das composições das amassaduras, desde a nº 2 à nº 5. Isto de forma a representar todo o processo teórico de obtenção das quantidades dos componentes para cada betão.

No capítulo 3 foi descrito o processo comum às primeiras quatro amassaduras, através da nº 1. Também foi descrito as etapas que diferenciaram no processo de formulação da amassadura nº 5, em relação às quatro primeiras.

Anexo IV-A Formulação da Amassadura 2

Dados : cimento 360 Kg/m₃ ; Dmax 22.4 mm ; A/C 0.6

1) Parâmetros definidos para a curva de Faury

- D_{Max}=22.4 mm
 - A=30
 - B=2
 - R=D
- 
- $P_{D/2} = 69,7\%$

2) Curva de Faury sem cimento

Tabela 41-Ajuste para obtenção da curva de Faury s/ cimento da amassadura 2

	mm	%	(-) % cimento	Ajuste
D	22,400	100,0	85,2	100,0
D/2	11,200	69,7	54,8	64,4
di	0,125	16,3	1,5	1,8

Módulo de finura da curva de referência=6.33

3) Resultados do Método gráfico

- Areia do Mar 18.0%
- Sarrisca.30.0%
- Brita 1 14.0%
- Brita 2 38.0%

Módulo de finura =6.52

4) Ajuste das percentagens

- Areia do Mar 21.2% (+4.3)
- Sarrisca 29.9 (-0.1)
- Brita 1 12.9% (-1.1)
- Brita 2 35.8 (-2.2)

5) Granulometria da mistura

Tabela 42-Granulometria da mistura obtida

Abertura Peneiro (mm)	Brita 2		Brita 1		Sarrisca		areia		Curva mist. Gran	Curva teórica
	%	0,358	%	0,129	%	0,299	%	0,212		
0,063	0,8	0,3	1,3	0,2	2,1	0,6	1,5	0,3	1,4	0,0
0,125	1,0	0,4	2,0	0,3	3,0	0,9	17,0	3,6	5,1	1,8
0,25	1,0	0,4	2,0	0,3	3,0	0,9	68,0	14,4	16,0	8,2
0,5	1,0	0,4	2,0	0,3	3,0	0,9	91,0	19,3	20,9	15,5
1	1,0	0,4	2,0	0,3	3,0	0,9	98,0	20,8	22,3	23,9
2	1,0	0,4	2,0	0,3	6,0	1,8	100,0	21,2	23,7	33,6
4	1,0	0,4	5,0	0,6	55,0	16,5	100,0	21,2	38,7	44,7
5,6	1,0	0,4	14,0	1,8	91,0	27,2	100,0	21,2	50,7	50,7
8	2,0	0,7	43,0	5,5	100,0	29,9	100,0	21,2	57,5	57,5
11,2	8,0	2,9	100,0	12,9	100,0	29,9	100,0	21,2	67,0	64,4
16	47,0	16,8	100,0	12,9	100,0	29,9	100,0	21,2	80,9	82,1
22,4	97,0	34,8	100,0	12,9	100,0	29,9	100,0	21,2	98,9	100,0
31,5	100,0	35,8	100,0	12,9	100,0	29,9	100,0	21,2	99,9	100,0

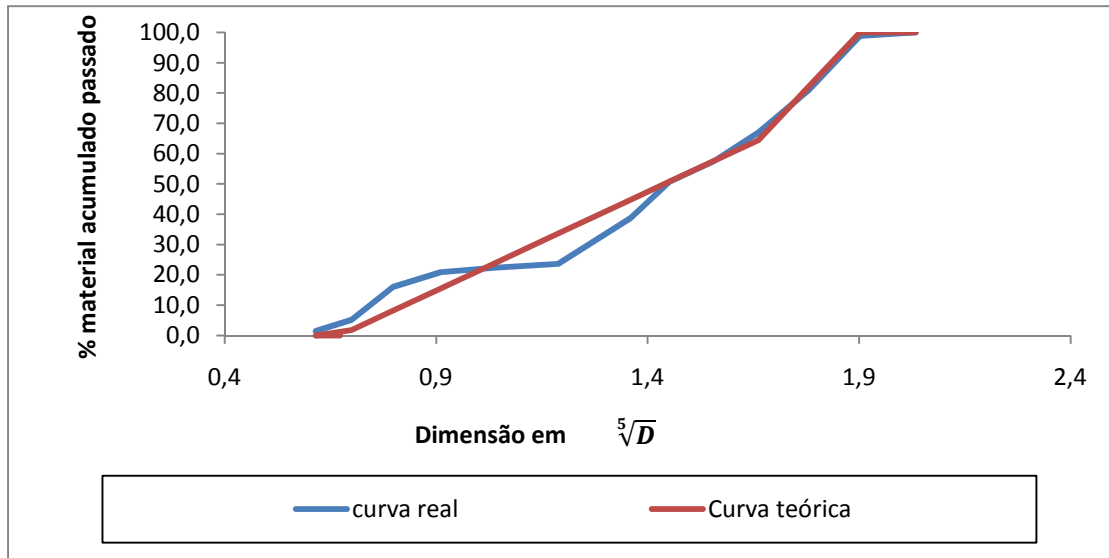


Figura 44-Curva real e teórica da composição da amassadura 2

6) Água de Amassadura

Figura 45-Processo de determinação da água para amassadura 2

	Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia	Un.
Teor de humidade	2,5	2,3	2,5	15,1	%
Absorção	2.1	2.7	2.7	5.6	%
Massa seca	675,1	242,1	569,8	398,8	Kg
Água a ser absorvida	16,9	5,6	14,2	60,2	l
Água existente (humidade)	14.2	6.5	15.4	22.3	L

Diferença	38.5
------------------	-------------

Água de Amassadura=177.5 l/m₃

7) Composição final da amassadura 2

Tabela 43-Quantidades dos componentes do betão para amassadura 2 para um metro cúbico

Componentes	Quantidades	Un.
Brita 2	692	Kg/m ₃
Brita 1	248	
Sarrisca	584	
Areia do mar	459	
Água	178	l/m ³
Cimento	360	kg/m ³

Anexo IV-B Formulação da Amassadura 3

Dados: Cimento 380 Kg/m₃; Dmax 22 mm; A/C 0.6

1) Parâmetros definidos para a curva de Faury

- D_{Max}=22 mm
- A=30
- B=2
- R=D



$$P_{D/2} = 69,5\%$$

2) Curva de Faury sem cimento

Tabela 44-Ajuste para obtenção da curva de Faury s/ cimento da amassadura 3

	mm	%	(-) % cimento	Ajuste
D	22,00	100,0	84,2	100,0
D/2	11,00	69,5	53,7	63,8
di	0,125	16,4	0,6	0.7

Módulo de finura de referência=6.37

3) Resultados do Método gráfico

- Areia do Mar 17.0%
- Sarrisca 31.0%
- Brita 1 16.0%
- Brita 2 36.0%

Módulo de finura =6.54

4) Ajuste das percentagens

- Areia do Mar 19.9% (+2.9)
- Sarrisca 30.9% (-0.1)
- Brita 1 15.0% (-1.0)
- Brita 2 34.1% (-1.9)

5) Granulometria da mistura

Tabela 45-Granulometria da mistura obtida para a amassadura 3

Abertura peneiro (mm)	Brita 2		Brita 1		Sarrisca		areia		Curva mist. Gran	Curva teórica
	%	0,341	%	0,150	%	0,309	%	0,199		
0,063	0,8	0,3	1,3	0,2	2,1	0,6	1,5	0,3	1,4	0,0
0,125	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,9	17,0	3,4	4,9	0,7
0,25	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,9	68,0	13,5	15,1	7,2
0,5	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,9	91,0	18,1	19,7	14,6
1	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,9	98,0	19,5	21,0	23,2
2	1,0	0,3	2,0	0,3	6,0	1,9	100,0	19,9	22,4	33,0
4	1,0	0,3	5,0	0,8	55,0	17,0	100,0	19,9	38,0	44,3
5,6	1,0	0,3	14,0	2,1	91,0	28,1	100,0	19,9	50,5	50,4
8	2,0	0,7	43,0	6,5	100,0	30,9	100,0	19,9	57,9	57,2
11,2	8,0	2,7	100,0	15,0	100,0	30,9	100,0	19,9	68,6	64,2
16	47,0	16,0	100,0	15,0	100,0	30,9	100,0	19,9	81,9	82,8
22,4	97,0	33,1	100,0	15,0	100,0	30,9	100,0	19,9	98,9	101,0
31,5	100,0	34,1	100,0	15,0	100,0	30,9	100,0	19,9	99,9	120,8

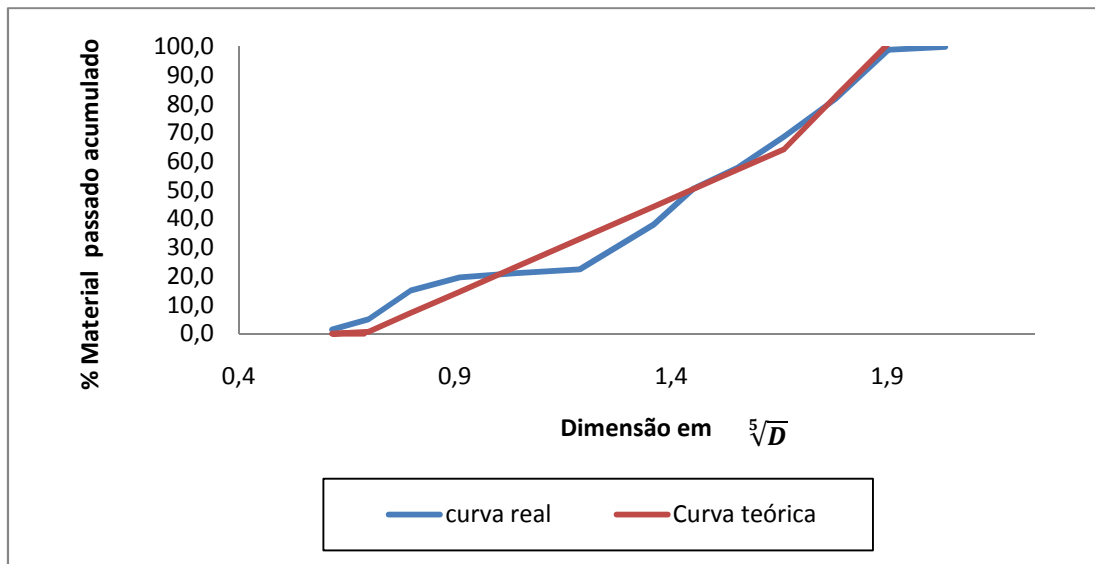


Figura 46-Curva granulométrica real e teórica da mistura para a amassadura 3

6) Água de Amassadura

Tabela 46-Processo de determinação da água para amassadura 3

	Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia	Un.
Teor de humidade	2,5	2,3	2,5	15,1	%
Absorção	2.1	2.7	2.7	5.6	%
Massa seca	638.3	280.7	585.1	370.8	Kg
Água a ser absorvida	16,0	6.5	14.6	59.3	l
Água existente (humidade)	13.4	7.6	15.8	20.8	L

Água livre	38.8 l
------------	--------

Água de Amassadura=189.2 l/m₃

7) Composição final da amassadura 3

Tabela 47- Quantidades dos componentes do betão para a amassadura 3

Componentes	Quantidades	Un.
Brita 2	654	Kg/m ₃
Brita 1	287	
Sarrisca	600	
Areia do mar	430	
Água	189	l/m ³
Cimento	380	kg/m ³

Anexo IV-C Formulação da Amassadura 4

Dados: Cimento 360 Kg/m₃; D_{max} 11 mm; A/C 0.6

1) Parâmetros definidos para a curva de Faury

- D_{Max}=11 mm
- A=30
- B=2
- R=D



$$P_{D/2} = 65,5\%$$

2) Curva de Faury sem cimento

Tabela 48-Ajuste para obtenção da curva de Faury s/ cimento da amassadura 4

	mm	%	(-) % cimento	Ajuste
D	11,00	100,0	84,3	100,0
D/2	5,50	65,5	49,8	59,0
di	0,125	18,5	2,9	3,4

Módulo de finura de referência=5.78

3) Resultados do Método gráfico

- Areia do Mar 21.0%
- Sarrisca 35.0%
- Brita 1 44.0%

Módulo de finura =5

4) Ajuste das percentagens

- Areia do Mar 23.8 % (+2.8)
- Sarrisca 34.4 % (-0.6)
- Brita 1 41.8 % (-2.2)

5) Granulometria da mistura obtida

Tabela 49-Granulometria da mistura obtida para a amassadura 4

Abertura Peneiro (mm)	0		Brita 1		Sarrisca		Areia		Curva mist. Gran	Curva Teórica
	%	0,000	%	0,418	%	0,344	%	0,238		
0,063	0,0	0,0	1,3	0,5	2,1	0,7	1,5	0,4	1,6	0,0
0,125	0,0	0,0	2,0	0,8	3,0	1,0	17,0	4,0	5,9	3,4
0,25	0,0	0,0	2,0	0,8	3,0	1,0	68,0	16,2	18,1	10,7
0,5	0,0	0,0	2,0	0,8	3,0	1,0	91,0	21,7	23,5	19,1
1	0,0	0,0	2,0	0,8	3,0	1,0	98,0	23,3	25,2	28,8
2	0,0	0,0	2,0	0,8	6,0	2,1	100,0	23,8	26,7	39,8
4	0,0	0,0	5,0	2,1	55,0	18,9	100,0	23,8	44,8	52,6
5,6	0,0	0,0	14,0	5,9	91,0	31,3	100,0	23,8	60,9	59,4
8	0,0	0,0	43,0	18,0	100,0	34,4	100,0	23,8	76,2	80,5
11,2	0,0	0,0	100,0	41,8	100,0	34,4	100,0	23,8	100,0	101,1
16	0,0	0,0	100,0	41,8	100,0	34,4	100,0	23,8	100,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0	41,8	100,0	34,4	100,0	23,8	100,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0	41,8	100,0	34,4	100,0	23,8	100,0	100,0

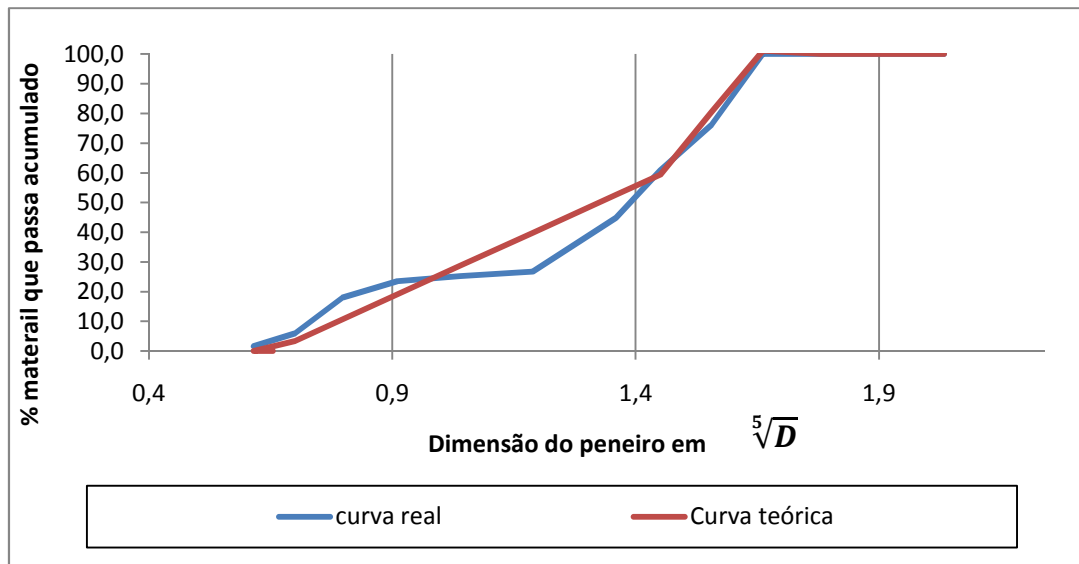


Figura 47- Curva granulométrica real e teórica da amassadura 4

6) Água de Amassadura

Tabela 50-Processo de obtenção da água da amassadura 4

	Brita 1	Sarrisca	Areia	Un.
Teor de humidade	2,3	2,5	16	%
Absorção	2.7	2.7	5.6	%
Massa seca	746.6	622.4	425.0	Kg
Água a ser absorvida	20.2	16.8	23.8	l
Água existente (humidade)	17.5	15.6	68	L

Água livre	40.0 l
------------	--------

Água de Amassadura=176.0 l/m₃

7) Composição final da amassadura 4

Tabela 51-Quantidades dos componentes do betão para a amassadura 4

Componentes	Quantidades	Un.
Brita 2	764	Kg/m ₃
Sarrisca	638	
Areia do mar	493	
Água	176	l/m ³
Cimento	360	kg/m ³

Anexo IV-D Formulação da Amassadura 5

Dados:

Cimento 360 Kg/m₃ ; D_{max} 22.4 mm; A/C 0.6; Mix = 60% areia + 40% Pó de pedra

1) Parâmetros definidos para a curva de Faury

- D_{Max}=22.4 mm
- A=38
- B=2
- R=D



$$P_{D/2} = 77.7\%$$

2) Curva de Faury sem cimento

Tabela 52- Ajuste para obtenção da curva de Faury s/ cimento da amassadura 5

	mm	%	(-) % cimento	Ajuste
D	22,4	100,0	84,7	100,0
D/2	11,2	77,7	62,3	73,6
di	0,125	18,2	2,9	3,4

Módulo de finura de referência=5.96

3) Resultados do Método gráfico

- Mix 33.0%
- Sarrisca 22.0%
- Brita 1 16.0%
- Brita 2 29.0%

Módulo de finura =5.92

4) Ajuste das percentagens

- Mix 32.2 (-0.8)
- Sarrisca 22.1 (+0.1)
- Brita 1 16.3 % (+0.3)
- Brita 2 29.5% (+0.5)

5) Granulometria da mistura obtida

Tabela 53-Granulometria da mistura obtida para a amassadura 5

Abertura Peneiro (mm)	Brita 2		Brita 1		Sarrisca		mix		Curva mist. Gran	Curva Teórica
	%	0,295	%	0,163	%	0,221	%	0,322		
0,063	0,8	0,2	1,3	0,2	2,1	0,5	7,3	2,3	3,3	0,0
0,125	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,7	17,8	5,7	7,0	3,4
0,25	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,7	51,6	16,6	17,9	10,6
0,5	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,7	70,2	22,6	23,9	18,8
1	1,0	0,3	2,0	0,3	3,0	0,7	82,0	26,4	27,7	28,2
2	1,0	0,3	2,0	0,3	6,0	1,3	95,6	30,8	32,7	39,1
4	1,0	0,3	5,0	0,8	55,0	12,1	100,0	32,2	45,4	51,6
5,6	1,0	0,3	14,0	2,3	91,0	20,1	100,0	32,2	54,8	58,3
8	2,0	0,6	43,0	7,0	100,0	22,1	100,0	32,2	61,8	65,9
11,2	8,0	2,4	100,0	16,3	100,0	22,1	100,0	32,2	72,9	73,6
16	47,0	13,9	100,0	16,3	100,0	22,1	100,0	32,2	84,4	86,7
22,4	97,0	28,6	100,0	16,3	100,0	22,1	100,0	32,2	99,1	100,0
31,5	100,0	29,5	100,0	16,3	100,0	22,1	100,0	32,2	100,0	100,0

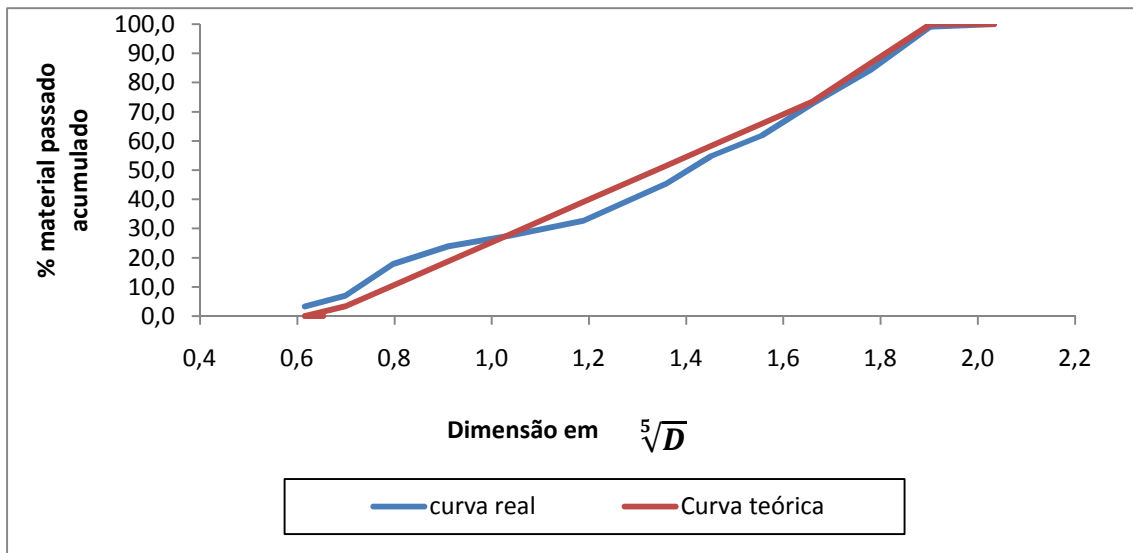


Figura 48-Curva granulométrica real e teórica para a amassadura 5

6) Água de Amassadura

Tabela 54-Processo de obtenção da água de amassadura 5

	Brita 2	Brita 1	Sarrisca	Areia	Pó pedra	Un.
Teor de humidade	2,5	2,3	2,5	16	3.6	%
Absorção	2.1	2.7	2.7	2.8	1.4	%
Massa seca	541.4	298.0	409.3	353.2	150.3	Kg
Água a ser absorvida	11.4	8.0	11.1	9.9	2.1	l
Água existente (humidade)	13.5	6.5	10.2	56.5	5.4	L

Água livre 50.1 l

Água de Amassadura=165.9 l/m₃

7) Composição final da amassadura 5

Tabela 55-Quantidades dos componentes do betão para a amassadura 5 por metro cúbico

Componentes	Quantidades	Un.
Brita 2	555	Kg/m ³
Brita 1	305	
Sarrisca	420	
Areia do mar	410	
Pó de pedra	410	
Água	165.9	l/m ³
Cimento	360	kg/m ³

