



**UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

# **ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES**

Miguel Costa Santos Nepomuceno

Provas de Aptidão Pedagógica e  
Capacidade Científica.

Aula Teórico-Prática.

Covilhã  
1999

Aula teórico-prática elaborada no âmbito das Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, em cumprimento do n.º 1 do artigo 58 da Lei n.º 19/80 do Estatuto da Carreira Docente Universitária sob orientação e co-orientação, respectivamente:

**Prof. Doutor Sérgio Manuel Rodrigues Lopes**

- Prof. Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da F.C.T.U.C.;
- Prof. Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Civil da U.B.I..

**Prof. Doutor Ryszard Kowalczyk**

- Prof. Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da U.B.I..



## ÍNDICE

	Pág.
<b>CAPÍTULO 1 – Introdução</b>	
1.1 – Generalidades .....	3
1.2 – Objectivos .....	3
1.3 - Justificação do tema .....	3
1.4 - Enquadramento da aula teórico-prática no programa da disciplina .....	4
1.5 - Planificação da aula teórico-prática .....	5
1.6 – Sumário .....	7
<b>Primeira Parte</b>	
<b>CAPÍTULO 2 – Estudo da composição de betões - revisões</b>	
2.1 – Generalidades .....	11
2.2 – Formulação dos dados essenciais de base para o estudo do betão .....	12
2.2.1 – Entidades intervenientes na formulação dos dados essenciais de base .....	12
2.2.2 - Dados essenciais de base para o estudo da composição do betão .....	13
2.3 – Outras determinações necessárias à formulação dos betões .....	14
2.3.1 – Efeito de parede .....	14
2.3.2 – Efeito de segregação .....	15
2.4 - Controle da conformidade de acordo com a NP_ENV206 .....	16
2.5 – Metodologia corrente no estudo e análise da composição de betões .....	19
<b>CAPÍTULO 3 – Classificação dos betões</b>	
3.1 – Classes de resistência .....	21

3.1.1 – Conceitos básicos .....	21
3.1.2 – Classes de resistência definidas pelo REBAP .....	22
3.1.3 – Classes de resistência definidas pela NP_ENV206 .....	23
3.1.4 – Correspondência entre as classes de resistência definidas no REBAP e na NP_ENV206 .....	24
3.1.5 - Critérios de conformidade para a resistência à compressão definidos pela NP_ENV206 .....	25
3.1.6 - Estimativa do valor médio da resistência à compressão a partir do valor cara- cterístico definidor da classe de resistência .....	26
3.2 – Classes de consistência (trabalhabilidade) .....	32
3.3 – Classes de exposição (durabilidade) .....	34

#### **CAPÍTULO 4 – Método das curvas de referência de Faury**

4.1 – Fórmula fundamental da composição do betão .....	37
4.2 - Determinação do volume de vazios .....	38
4.3 - Determinação do índice de vazios .....	38
4.4 - Determinação da dosagem de água de amassadura .....	40
4.5 – Relação água/cimento em massa .....	41
4.6 - Determinação da dosagem de cimento em massa .....	44
4.7 - Volume das partículas de cimento .....	45
4.8 - Volume do total das partículas sólidas do betão .....	45
4.9 - Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total .....	45
4.10 - Determinação das quantidades dos elementos sólidos .....	46
4.10.1 - Método da curva de referência de Faury .....	46
4.10.2 - Curva granulométrica de referência de Faury .....	47
4.10.3 – Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury .....	49

	Pág.
4.10.4 - Determinação das percentagens dos componentes sólidos .....	51
4.10.5 – Aproximação do módulo de finura da curva real ao módulo de finura da curva de referência .....	54
4.10.6 – Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual .....	55
4.10.7 - Determinação das dosagens dos inertes da mistura, em massa .....	57
4.11 – Apresentação final da composição do betão .....	57

## **CAPÍTULO 5 – Fluxogramas de aplicação do método de Faury**

5.1 – Betões com componentes normais .....	59
5.2 – Betões com adjuvantes redutores de água .....	65
5.3 – Betões com aditivos e adjuvantes redutores de água .....	71

## **Segunda Parte**

### **CAPÍTULO 6 – Exemplos práticos**

6.1 - Exemplo prático n.º 1 .....	81
6.1.1 - Enunciado .....	81
6.1.2 - Resolução do exercício utilizando o Fluxograma n.º 1 .....	82
6.1.2.1 – Limitação da máxima dimensão do inerte mais grosso .....	82
6.1.2.2 – Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão para o estudo da composição .....	82
6.1.2.3 – Razão A/C máxima .....	84
6.1.2.4 – Estimativa do índice de vazios .....	84
6.1.2.5 – Água de amassadura .....	85
6.1.2.6 – Dosagem de cimento .....	85

	Pág.
6.1.2.7 – Volume das partículas de cimento .....	86
6.1.2.8 – Volume do total das partículas sólidas do betão .....	87
6.1.2.9 – Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total .....	87
6.1.2.10 – Curva de referência de Faury .....	88
6.1.2.11 – Determinação das percentagens dos componentes sólidos .....	89
6.1.2.12 – Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury .....	90
6.1.2.13 – Aproximação do módulo de finura da mistura ao módulo de finura da curva de referência de Faury .....	90
6.1.2.14 – Comparação da curva real com a curva de referência de Faury e determi- nação do erro médio percentual .....	91
6.1.2.15 – Massa de cada componente sólido .....	92
6.1.2.16 – Apresentação final da composição do betão .....	92
6.1.3 - Aplicação do programa de cálculo computacional “BECOMP” .....	93
6.2 - Exemplo prático n.º 2 .....	97
6.2.1 - Enunciado .....	97
6.2.2 - Resolução do exercício utilizando o Fluxograma n.º 3 .....	97
6.2.2.1 – Limitação da máxima dimensão do inerte mais grosso .....	97
6.2.2.2 – Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão para o estudo da composição .....	98
6.2.2.3 – Razão A/L e razão A/C máximas .....	99
6.2.2.4 – Estimativa do índice de vazios .....	100
6.2.2.5 – Água de amassadura .....	101
6.2.2.6 – Dosagem de adjuvante e redução da água de amassadura .....	101
6.2.2.7 – Correção do índice de vazios .....	102
6.2.2.8 – Dosagem de material cimentício .....	102
6.2.2.9 – Dosagem de aditivo .....	103

	Pág.
6.2.2.10 – Dosagem de cimento .....	103
6.2.2.11 – Volume das partículas de cimento .....	104
6.2.2.12 – Volume das partículas de aditivo (cinzas volantes) .....	104
6.2.2.13 – Volume do total das partículas de material cimentício .....	105
6.2.2.14 – Volume do total das partículas sólidas do betão .....	105
6.2.2.15 – Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total .....	105
6.2.2.16 – Percentagem do volume de aditivo em relação ao volume sólido total .....	106
6.2.2.17 – Percentagem do volume de material cimentício em relação ao volume sólido total .....	106
6.2.2.18 – Curva de referência de Faury .....	107
6.2.2.19 – Determinação das percentagens dos componentes sólidos .....	108
6.2.2.20 – Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury .....	109
6.2.2.21 – Aproximação do módulo de finura da mistura ao módulo de finura da curva de referência de Faury .....	109
6.2.2.22 – Comparação da curva real com a curva de referência de Faury e determinação do erro médio percentual .....	110
6.2.2.23 – Massa de cada componente sólido .....	111
6.2.2.24 – Apresentação final da composição do betão .....	111
6.2.3 - Aplicação do programa de cálculo computacional “BECOMP” .....	112
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>117</b>
 <b>ANEXOS</b>	
A.1 – Caracterização dos inertes (Areia natural rolada, Brita 1 e Brita 2) .....	125
A.2 – Fichas técnicas dos ligantes (cimento tipo II / 32,5 e cimento tipo I / 42,5R) .....	141
A.3 – Ficha técnica do aditivo (Cinzas volantes) .....	145
A.4 – Ficha técnica do adjuvante redutor de água (Superplastificante) .....	149



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
2.1	Metodologia corrente no estudo e análise da composição de betões ..... 19
3.1	Relação entre o desvio padrão e a resistência média de provetes padrão obtida em betões produzidos “in situ” ..... 28
4.1	Resistência média à compressão dos betões versus razão A/C ..... 42
4.2	Razão água / (materiais cimentícios) versus resistência à compressão para betões de diferentes elementos constituintes e diferentes dosagens ... 42
4.3	Comparação entre os resultados obtidos por Nepomuceno e aqueles propostos pelo ACI para a relação entre a resistência à compressão e a razão A/C ..... 44
4.4	Representação gráfica dos pontos da curva de referência de Faury ..... 48
4.5	Aproximação da curva real à curva de referência (situação 1) ..... 51
4.6	Aproximação da curva real à curva de referência (situação 2) ..... 52
4.7	Aproximação da curva real à curva de referência (situação 3) ..... 52
4.8	Determinação das percentagens dos componentes sólidos ..... 53
6.1	Ajustamento da curva granulométrica dos inertes à curva de ref. de Faury .. 89
6.2	Representação gráfica da curva real e da curva de referência de Faury ..... 91
6.3	Representação gráfica do cálculo computacional ..... 96
6.4	Ajustamento da curva granulométrica dos inertes à curva de ref. de Faury .. 108
6.5	Representação gráfica da curva real e da curva de referência de Faury ..... 110
6.6	Representação gráfica do cálculo computacional ..... 115



## ÍNDICE DE QUADROS

	Pág.
2.1 Plano de amostragem e critérios de conformidade para a resistência à compressão de acordo com a NP_ENV206 .....	18
3.1 Classes de resistência do betão definidas pelo REBAP .....	23
3.2 Classes de resistência do betão de acordo com a NP_ENV206 .....	24
3.3 Correspondência entre as classes de resistência definidas no REBAP e na NP_ENV206 .....	24
3.4 Valores de $\lambda$ e K .....	26
3.5 Classificação do padrão de controle dos betões com resistência até 35 MPa de acordo com o ACI 214-77 .....	29
3.6 Desvios padrão em função das condições de produção do betão .....	30
3.7 Valores típicos do desvio padrão dos provetes cúbicos utilizados no controle de produção .....	30
3.8 Classes de consistência definidas a partir do ensaio de abaixamento .....	32
3.9 Graus de trabalhabilidade Vêbê .....	32
3.10 Classes de abaixamento definidas pela NP_ENV206 .....	33
3.11 Classes Vêbê definidas pela NP_ENV206 .....	33
3.12 Classes de compactação definidas pela NP_ENV206 .....	33
3.13 Classes de espalhamento definidas pela NP_ENV206 .....	33
3.14 Classes de exposição relacionadas com as condições ambientais .....	34
3.15 Requisitos de durabilidade relacionados com a exposição ambiental .....	35
4.1 Volume de vazios do betão em função da máxima dimensão do inerte .....	38

	Pág.
4.2	Valores dos parâmetros K e K' para a determinação do índice de vazios .... 39
4.3	Pontos da curva de referência de Faury ..... 48
4.4	Valores dos parâmetros A e B da curva de referência de Faury ..... 49
4.5	Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury ..... 50
4.6	Aproximação do módulo de finura da curva real ao módulo de finura da curva de referência ..... 54
4.7	Comparação da curva real com a curva de referência ..... 56
6.1	Aproximação da curva real do betão à curva de referência de Faury ..... 90
6.2	Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual ..... 91
6.3	Aproximação da curva real do betão à curva de referência de Faury ..... 109
6.4	Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual ..... 110

## SIGLAS

- ACI - American Concrete Institute, Detroit (USA).
- APEB - Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto.
- ASTM - American Society for Testing and Materials, Philadelphia (USA).
- EC2 - Eurocódigo 2.
- ISO - International Organization for Standardization.
- LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (Portugal).
- NP - Norma Portuguesa.
- RBLH - Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos.
- REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado.
- UBI - Universidade da Beira Interior.



## SIMBOLOGIA

$\bar{X}_n$	Significa o mesmo que $f_{cm}$
$\lambda$	Factor de probabilidade de 95% para uma distribuição normal
$\rho$	Raio médio da malha da armadura ou da fenda mais fechadas, em milímetros
$I'_i$ %	Percentagem final (corrigida) do volume das partículas do inerte $i$ em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão
$I'_v$	Índice de vazios de Faury corrigido, expresso em $m^3$ por cada $m^3$ de betão
$\delta_a$	Massa volúmica da água, em $kg/m^3$
$\delta_c$	Massa volúmica do cimento, em $kg/m^3$
$\delta_e$	Massa volúmica do adjuvante, em $kg/m^3$
$I_i$	Dosagem (em massa) do inerte $i$ , expressa em kg por cada $m^3$ de betão
$\delta_i$	Massa volúmica do inerte $i$ , em $kg/m^3$
$I_i$ %	Percentagem do volume das partículas do inerte $i$ em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão
$\delta_o$	Massa volúmica do aditivo em $kg/m^3$
$I_v$	Índice de vazios de Faury, expresso em $m^3$ por cada $m^3$ de betão
$A$	Dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada $m^3$ de betão
$a$	Volume unitário de água
$A, B$	Parâmetros de Faury para a curva de referência de Faury
$A'$	Dosagem de água corrigida, expressa em litros por cada $m^3$ de betão
$A_e$	Dosagem de adjuvante, expressa em kg por cada $m^3$ de betão
$A_o$	Dosagem de aditivo, expressa em kg por cada $m^3$ de betão
$A_o$ %	Percentagem do volume das partículas de aditivo em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão

$A_{o/L}\%$	Percentagem de aditivo em relação à massa total de material cimentício
C	Dosagem (em massa) de cimento, expressa em kg por cada $m^3$ de betão
c	Volume unitário de cimento
C%	Percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão
cv	Coefficiente de variação de um conjunto de valores
D	Máxima dimensão do inerte, em milímetros
$D_p$	Densidade potencial do betão, medida em cubos padrão, aos 28 dias de idade
$E_r\%$	Erro médio percentual da mistura
$f_{ci}$	Tensão de rotura à compressão do betão da amostra i
$f_{ci,28}$	Tensão de rotura potencial à compressão do betão da amostra padrão i, aos 28 dias de idade (quando submetida a preparação, cura e ensaio normalizados)
$f_{ci,cil}$	Tensão de rotura à compressão no cilindro padrão i (150 mm x 300 mm)
$f_{ci,cub15}$	Tensão de rotura à compressão do provete cúbico padrão i (150 mm de aresta)
$f_{ci,cub20}$	Tensão de rotura à compressão do provete cúbico padrão i (200 mm de aresta)
$f_{ck}$	Valor característico da tensão de rotura à compressão de n amostras de betão ( $f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn}$ )
$f_{ck,28}$	Valor característico da tensão de rotura à compressão de n amostras de betão ( $f_{c1,28}, f_{c2,28}, \dots, f_{cn,28}$ ) aos 28 dias de idade, quando submetidas a preparação, cura e ensaio normalizados
$f_{ck,cil}$	Valor característico da tensão de rotura à compressão de n cilindros padrão ( $f_{c1,cil}, f_{c2,cil}, \dots, f_{cn,cil}$ ) com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura
$f_{ck,cub15}$	Valor característico da tensão de rotura à compressão de n provetes cúbicos padrão ( $f_{c1,cub15}, f_{c2,cub15}, \dots, f_{cn,cub15}$ ) com 150 mm de aresta
$f_{ck,cub20}$	Valor característico da tensão de rotura à compressão de n provetes cúbicos padrão ( $f_{c1,cub20}, f_{c2,cub20}, \dots, f_{cn,cub20}$ ) com 200 mm de aresta

$f_{cm}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de $n$ amostras de betão ( $f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn}$ )
$f_{cm,28}$	Valor médio da tensão de rotura potencial à compressão do betão de $n$ amostras padrão aos 28 dias, preparadas, curadas e ensaiadas de forma normalizada
$f_{cm,cil}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de $n$ cilindros padrão ( $f_{c1,cil}, f_{c2,cil}, \dots, f_{cn,cil}$ ) com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura
$f_{cm,cub15}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de $n$ provetes cúbicos padrão ( $f_{c1,cub15}, f_{c2,cub15}, \dots, f_{cn,cub15}$ ) com 150 mm de aresta
$f_{cm,cub20}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de $n$ provetes cúbicos padrão ( $f_{c1,cub20}, f_{c2,cub20}, \dots, f_{cn,cub20}$ ) com 200 mm de aresta
$i$	Volume unitário de inerte
$K, K'$	Parâmetros de Faury para a determinação do índice de vazios
$L$	Dosagem (em massa) de material cimentício, expressa em kg por $m^3$ de betão
$L\%$	Percentagem do volume total das partículas de material cimentício em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão
$MF_i$	Módulo de finura de Faury para o inerte $i$
$MF_{real}$	Módulo de finura de Faury para a curva real do betão
$MF_{ref}$	Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury
$n$	Número de leituras individuais (1,2,...,n)
$P_j \%$	Percentagem de passados acumulados no peneiro $j$
$R$	Raio médio do molde, expresso em milímetros
$R_a \%$	Percentagem de redução de água
$S_n$	Desvio padrão de um conjunto de $n$ leituras directas
$v$	Volume unitário de vazios (ar ocluído)
$V_c$	Volume das partículas de cimento, expresso em $m^3$ por cada $m^3$ de betão
$V_e$	Volume de adjuvante, expresso em $m^3$ por cada $m^3$ de betão

- $V_L$  Volume do total das partículas de material cimentício, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão
- $V_o$  Volume das partículas de aditivo, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão
- $V_s$  Volume do total das partículas sólidas do betão, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão
- $V_v$  Volume de vazios do betão, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão

## ABREVIATURAS

- Relação A/C - Relação água/cimento, em massa.
- Relação A/L - Relação água/(material cimentício), em massa.
- Cilindros de “X x Y” mm - O primeiro dado refere-se ao diâmetro da base e o segundo à altura do cilindro, ambos em milímetros.



# **INTRODUÇÃO**



## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 – Generalidades**

O presente relatório insere-se no âmbito da legislação que regula a prestação de Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, nomeadamente a alínea n.º 1 do Artigo 58º do Estatuto da Carreira Docente Universitária, Decreto-Lei n.º 448/79, de 13 de Novembro, ratificado pelas alterações introduzidas pela Lei n.º 19/80 de 16 de Julho.

Neste capítulo introdutório serão referidos de forma sintética, os objectivos da aula teórico-prática, a justificação da temática abordada, o seu enquadramento no âmbito da disciplina em que se insere, a sua planificação e, finalmente, o seu sumário.

### **1.2 – Objectivos**

A aula teórico-prática que a seguir se apresenta tem por destinatários os alunos do 3.º ano da Licenciatura em Engenharia Civil que frequentam a disciplina de Materiais de Construção II. O objectivo principal é familiarizar os referidos alunos com a metodologia de cálculo e estudo da composição de betões baseada no método das curvas de referência, nomeadamente as de Faury. Para além disso, pretende-se fornecer aos alunos ferramentas úteis que permitam ajustar o procedimento de cálculo às disposições normativas em vigor, nomeadamente, aquelas recentemente introduzidas pela norma NP\_ENV206 [23] e que revogaram o anterior Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos (RBLH) [24].

### **1.3 – Justificação do tema**

A metodologia adoptada no estudo da composição de betões baseada no “método das curvas de referência de Faury” tem sido utilizada nas últimas décadas em Portugal, com grande sucesso em betões da gama de resistências normal [4, 8, 15, 16, 17]. Mais

recentemente, numa investigação levada a cabo no LNEC, Ivan Ramalho de Almeida [3], confirmou a utilidade deste método em betões da gama de alta resistência na sua tese de doutoramento intitulada “ Betões de alta Resistência e Durabilidade”. Resultados similares foram também obtidos pelo signatário desta aula prática, com base em estudos prévios experimentais, produzidos no Laboratório de Betão e Materiais da UBI, no âmbito do trabalho de síntese e, em conjunto com os anteriores, permitem reforçar a validade deste método nesta nova classe de betões, cuja aplicação tem despertado muito interesse na actualidade.

Apesar de existirem outros métodos de estudo da composição de betões, os quais são, na sua generalidade, abordados de forma sintética nas aulas teóricas, o método que se propõe neste relatório é, sem dúvida alguma, aquele que mais frequentemente se aplica em Portugal e, os resultados proporcionados até ao momento, justificam plenamente a sua abordagem na disciplina de Materiais de Construção II.

#### **1.4 – Enquadramento da aula teórico-prática no programa da disciplina**

As aulas teórico-práticas da disciplina de Materiais de Construção II são leccionadas em estreita dependência e complementaridade com as aulas práticas, sendo estas últimas de carácter eminentemente laboratorial.

Nas aulas teórico-práticas são transmitidos os conceitos elementares que permitem a resolução das situações mais frequentes relacionadas com a selecção dos materiais constituintes, formulação das composições, fabrico, transporte, colocação, compactação, cura e caracterização das propriedades do betão fresco e endurecido.

Nas aulas práticas desenvolve-se a componente laboratorial. Nesse sentido, é solicitado aos alunos (em grupos de 4 a 5 elementos) o estudo da composição de um betão de comportamento especificado e a sua caracterização por ensaios iniciais, nos termos definidos na NP\_ENV206 [23]. São especificadas: a classe de resistência pretendida, as propriedades do betão fresco e os materiais constituintes (de entre aqueles disponíveis no Laboratório de Materiais e Estruturas da UBI).

Devidamente acompanhados, os alunos procedem aos ensaios laboratoriais para classificação dos materiais constituintes, ao estudo teórico e computacional da composição do betão e à execução de uma amassadura experimental, suficiente para a elaboração de alguns provetes cúbicos padrão e para a determinação das propriedades do betão fresco. A resistência à compressão é determinada em diferentes idades, incluindo aos 28 dias, após cura normalizada. Ocasionalmente, são aplicados alguns ensaios não destrutivos nesses provetes antes do ensaio à compressão. Terminado este processo, os alunos procedem à elaboração de um relatório final. Uma vez avaliado pelo docente, o relatório é submetido a discussão na presença de todos os elementos do respectivo grupo de trabalho, de modo a estimar a contribuição individual de cada elemento.

É neste contexto que se insere o tema da aula teórico-prática que a seguir se apresenta, a qual constitui, sem dúvida, o suporte de toda a análise experimental desenvolvida pelos alunos e traduz a expressão prática de todos os conceitos adquiridos ao longo do semestre.

### **1.5 – Planificação da aula teórico-prática**

A aula em questão iniciar-se-á com uma chamada de atenção em relação à importância dos conteúdos abordados até aqui, que pressupõem já a aquisição de conhecimentos básicos relativos à caracterização dos materiais (cimentos, inertes, água, adjuvantes e aditivos) a utilizar na produção dos betões e compreendem um conjunto de ensaios laboratoriais nesse sentido, incluindo, entre outros, a análise granulométrica dos inertes, caracterização da sua forma (índice volumétrico), massas volúmicas (inertes saturados e com a superfície seca), baridades e absorção de água.

Partindo do princípio que os alunos têm já assimilados estes conhecimentos mínimos, procede-se a uma breve exposição sobre a classificação dos betões, as várias fases da metodologia geralmente recomendada, as condicionantes impostas pelos documentos normativos e, finalmente, a descrição do método das curvas de referência de Faury e a explicação do fluxograma proposto pelo docente com base nesse método. Tal

fluxograma de cálculo, referenciando quadros, gráficos e ábacos de natureza empírica apresentados por diferentes autores, permite, de uma forma rápida e eficaz, formular a composição dos betões mais correntemente usados.

Na segunda parte da aula, procede-se à resolução de dois exercícios práticos de aplicação, visando o cálculo de dois betões com resistência à compressão e trabalhabilidade (consistência) idênticas, contudo, utilizando-se diferentes materiais constituintes (à exceção dos inertes) e diferentes proporções da mistura.

A obtenção destes dois tipos de betões com diferentes componentes e diferentes dosagens, mas, conduzindo às mesmas propriedades do betão fresco e endurecido, permitirá aos alunos extraírem conclusões relevantes que contribuem para um melhor entendimento dos vários factores intervenientes e das alternativas existentes no mercado.

Para os mesmos betões analisados, os resultados obtidos teoricamente serão confrontados com aqueles obtidos a partir do programa de cálculo “BECOMP” do LNEC e, este facto, permitirá mostrar aos alunos uma ferramenta útil e extremamente rápida de confirmação dos resultados. Porém, chama-se a atenção que o programa de cálculo, só por si, não determina a composição do betão para determinadas propriedades, mas antes, necessita de dados essenciais de base, que terão que ser sempre equacionados previamente com base nos critérios definidos nas aulas teórico-práticas. Para além disso, necessita igualmente do conhecimento das propriedades dos materiais, tal como foram determinadas laboratorialmente pelos alunos.

Refira-se que o estudo visa essencialmente dois aspectos:

- a obtenção de um betão com determinado nível de resistência à compressão, o que permitirá caracterizar esta propriedade do betão endurecido;
- a obtenção de uma determinada trabalhabilidade (consistência), medida em termos do abaixamento do “cone de Abrams”, o que permitirá caracterizar as propriedades do betão no estado fresco.

Nesta primeira fase não serão estudados os aspectos relacionados com a perda de trabalhabilidade do betão ao longo do tempo. No entanto, este assunto será abordado teoricamente ao longo do semestre.

A durabilidade do betão, tendo em vista a classe de exposição ambiental, será determinada apenas com base nos parâmetros fixados pelas normas e não será avaliada experimentalmente.

## **1.6 – Sumário**

O sumário é elaborado e divulgado de acordo com as regras internas da Universidade da Beira Interior.

O conteúdo do sumário desta aula é o seguinte: Estudo da composição de betões com base no método das curvas de referência de Faury por construção geométrica e exemplificação da sua aplicação.



## **Primeira Parte**

# **ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES**

(Introdução teórica)



## **CAPÍTULO 2 – ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES - REVISÕES**

### **2.1 – Generalidades**

Em geral assume-se, como definição, que o betão é um material constituído pela mistura devidamente proporcionada de materiais inertes (finos e grossos), ligados entre si pela pasta de cimento (cimento + água) e, eventualmente, poderá ainda conter adjuvantes e aditivos que entram na mistura em quantidades relativamente pequenas.

A selecção dos materiais constituintes do betão constitui uma das fases críticas que precedem o estudo das proporções da mistura e deverá ser sempre efectuada tendo em vista o binómio qualidade-custo e, não menos importante, tendo em vista o comportamento do betão endurecido face à exposição ambiental e às diferentes solicitações mecânicas previstas. A selecção dos materiais constituintes deverá ser igualmente ponderada observando as características geométricas das peças a betonar, os meios disponíveis para amassadura, transporte, colocação e cura e ainda as condições ambientais, ou outras, previstas na altura da betonagem (características adicionais de comportamento).

Como facilmente se depreende, as propriedades do betão dependerão também das proporções com que cada um dos seus elementos constituintes entra na mistura. De entre os vários métodos disponíveis para o estudo da composição de um betão (já abordados nas aulas teóricas), aquele que se afigura mais conhecido em Portugal é o método das curvas de referência. De entre várias curvas de referência conhecidas (Fauy, Bolomey e Joisel), será dada preferência às primeiras, ou seja, às de Fauy, não só pela simplicidade de traçado, mas também por estas terem conduzido, até hoje, à obtenção de bons resultados.

O método das curvas de referência de Fauy é de natureza empírica e visa sobretudo fornecer uma curva granulométrica das partículas sólidas do betão que, tendo em vista a natureza dos inertes, a trabalhabilidade pretendida, os meios de colocação, o efeito de parede e a presença de armaduras, conduz à maior compacidade do betão endurecido.

Neste capítulo serão revistos alguns dos aspectos relativos à formulação dos dados essenciais de base para o estudo da composição do betão, serão enunciadas as cláusulas aplicáveis da NP\_ENV206 [23] relativas ao controle de conformidade e serão abordados os vários aspectos relativos à metodologia geral do estudo e análise da composição de betões.

## **2.2 – Formulação dos dados essenciais de base para o estudo do betão**

### **2.2.1 – Entidades intervenientes na formulação dos dados essenciais de base**

Quando se estuda a composição de um betão é necessário, à partida, reunir dados suficientes (dados essenciais de base) que permitam definir as suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido, bem como na passagem do estado fresco ao endurecido. Estas últimas, também designadas por “características adicionais de comportamento”, estão geralmente associadas a circunstâncias particulares, climatéricas e outras, verificadas durante a betonagem.

As propriedades do betão nos seus vários estados são geralmente definidas por diferentes entidades que estão envolvidas no projecto e posteriormente na execução da obra. Assim e de forma genérica, poder-se-á dizer que as características do betão são definidas do seguinte modo:

#### Propriedades do betão endurecido.

São definidas pelo projectista e estão geralmente relacionadas com os seguintes factores: tensão característica de rotura, classe de exposição (está relacionada com a durabilidade) e qualidade do betão (está relacionada com os cuidados a ter na sua produção).

#### Propriedades do betão fresco.

São definidas, quase sempre, pelo responsável da obra, tendo em vista a sua especificidade, e estão geralmente relacionadas com a trabalhabilidade do betão. Em geral

terão em conta factores, como sejam: a geometria dos moldes, a disposição das armaduras e o grau de consistência do betão face aos meios disponíveis para amassadura, transporte, colocação e compactação.

#### Propriedades do betão na passagem do estado fresco ao endurecido.

São normalmente definidas pelo responsável da obra e estão geralmente associadas com condições especiais que ocorrem durante a betonagem e que podem interferir nas propriedades do betão.

### **2.2.2 – Dados essenciais de base para o estudo da composição do betão**

#### Elementos de projecto

i) Tensão característica de rotura: Interessa-nos o valor característico da tensão de rotura à compressão ( $f_{ck,28}$ ), referido a uma determinada geometria dos provetes de ensaio;

ii) Definição geométrica das peças a betonar incluindo a pormenorização de armaduras: É importante para o cálculo dos efeitos de parede e de segregação; a menos que o projectista especifique a máxima dimensão do inerte a utilizar;

ii) Classe de exposição ambiental (condições de serviço da estrutura).

#### Condições de produção, colocação do betão e controle de qualidade

i) Trabalhabilidade do betão fresco, traduzida pelo grau ou classe de consistência (Classes de abaixamento, classes Vêbê, classes de compactação ou classe de espalhamento);

ii) Equipamentos disponíveis para amassadura, transporte, colocação e compactação do betão e grau de precisão das medições com estes efectuadas;

iii) Nível de controle da produção;

iv) Plano de amostragem e controle de qualidade.

## Componentes materiais

Note-se que os materiais constituintes deverão ser classificados e as suas propriedades determinadas conforme previsto nas disposições regulamentares por forma a inferir, não só da sua conformidade, mas também, da sua compatibilidade uma vez misturados. No entanto, para o cálculo das proporções da mistura será necessário conhecer apenas algumas dessas propriedades, como sejam:

i) Cimentos: Tipo, classe e massa volúmica;

ii) Água: Interessa saber a sua origem. As águas potáveis, em geral, podem ser usadas sem reservas [7];

iii) Inertes: Tipo, natureza, forma, origem, análises granulométricas, módulos de finura e massas volúmicas;

iv) Adjuvantes: Tipo, natureza química, modo de fornecimento (líquido ou sólido), compatibilidade, comportamento (percentagens de redução de água versus dosagem), massa volúmica e, se o produto é fornecido como solução aquosa da base química, interessa conhecer o teor de água em massa;

v) Aditivos: Tipo (pozolanas, cinzas volantes, sílica de fumo, etc.) e respectivas massas volúmicas.

## **2.3 – Outras determinações necessárias à formulação dos betões**

### **2.3.1 – Efeito de parede**

O efeito de parede é contabilizado pela relação entre o raio médio do molde (R) e a máxima dimensão do inerte (D).

- Raio médio do molde ou raio hidráulico (R):

$$R = \frac{\text{Volume a encher de betão}}{\text{Superfície confinante desse volume de betão}} \quad (2.1)$$

- Para peças correntes de betão armado o efeito de parede não se dá quando:

$$\frac{R}{D} > 0,75 \quad \text{Critério de Faury} \quad (2.2)$$

Ou seja,

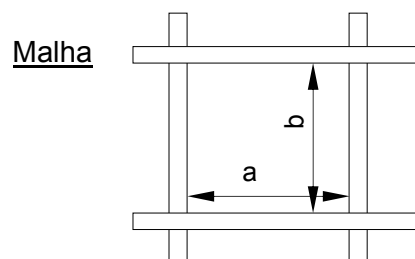
$$D < \frac{4}{3} \cdot R \quad (2.3)$$

- Quando não se conhece o projecto estrutural e desde que não se utilizem inertes com dimensão superior a 25,4 mm, poderá adoptar-se uma máxima dimensão igual ao raio médio do molde, ou seja,  $R/D = 1$  [8].

### 2.3.2 – Efeito de segregação

O efeito de segregação é contabilizado pela relação entre a máxima dimensão do inerte (D) e o raio médio da malha da armadura ou de uma fenda ( $\rho$ ).

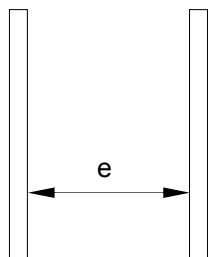
- Raio médio da malha da armadura ou de uma fenda ( $\rho$ ):



$$\rho = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad (2.4)$$

$$\rho = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} \quad (2.5)$$

Fenda



$$\rho = \frac{\text{Espessura}}{2} \quad (2.6)$$

$$\rho = \frac{e}{2} \quad (2.7)$$

- Segundo Faury, o efeito de segregação não se dá quando:

$D < 1,2 \rho$  para inertes britados,

$D < 1,4 \rho$  para inertes rolados,

- A NP\_ENV206 [23] (Cláusula 5.4) especifica da seguinte forma os requisitos mínimos quanto à máxima dimensão dos inertes:

*«A máxima dimensão do inerte tem de ser escolhida de modo que o betão possa ser colocado e compactado à volta das armaduras sem que haja segregação. A posição das armaduras deve ser tal que o betão possa ser colocado e compactado dum modo satisfatório e sem que haja segregação. A máxima dimensão do inerte não deve exceder:*

- $\frac{1}{4}$  da menor dimensão do elemento estrutural;
- a distância livre entre as barras das armaduras menos 5 mm, a não ser que se tomem providências especiais, p. ex. agrupando os varões da armadura;
- 1,3 vezes a espessura do recobrimento das armaduras (esta restrição não é necessária para a classe de exposição 1 (...))»

## 2.4. – Controle da conformidade de acordo com a NP\_ENV206

(Notas acerca da Cláusula 11.3. da NP\_ENV206 [23] - Controle da conformidade)

### Generalidades

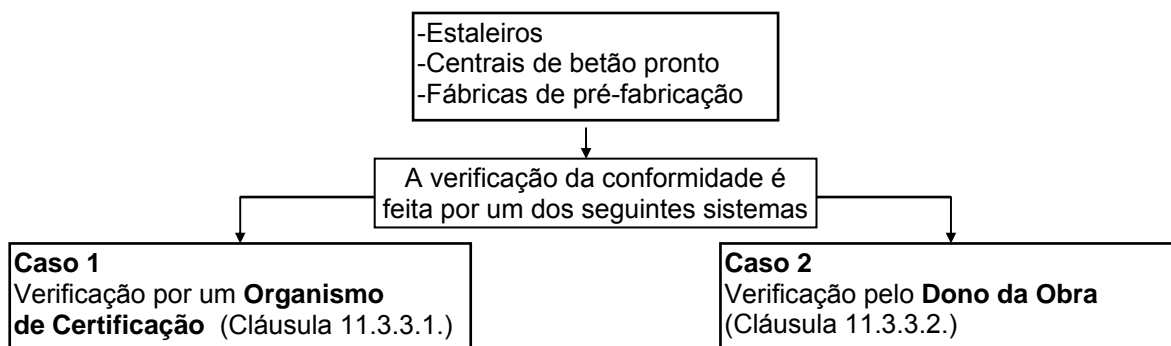
O controle da conformidade compreende a combinação de acções e decisões,

tomadas de acordo com regras de conformidade previamente adoptadas, necessária para verificar a conformidade de um lote, previamente definido, com as especificações.

### Critérios de conformidade

A conformidade ou não conformidade é julgada com base em critérios de conformidade. A conformidade conduz à aceitação enquanto a não conformidade poderá conduzir a acções posteriores.

### Sistemas de verificação



### Ensaio de recepção

Mesmo quando existe um organismo de certificação (Caso 1) o dono da obra pode solicitar ensaios de recepção. Neste caso deve ser acordada a amostragem para os ensaios de recepção.

### Responsabilidade pela amostragem

A responsabilidade do fabricante, do empreiteiro, do dono da obra ou do organismo de certificação pela amostragem depende das normas nacionais ou das regulamentações em vigor no local de aplicação do betão.

### Plano de amostragem e critérios de conformidade para a resistência à compressão

Este assunto é tratado de forma esquemática no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1 – Plano de amostragem e critérios de conformidade para a resistência à compressão de acordo com a NP\_ENV206 [23]**

PLANO DE AMOSTRAGEM		VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE						
<p>(Cláusula 11.3.5.1.1.)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Generalidades</b> Para julgar a conformidade da resistência do betão, o volume de betão utilizado na estrutura, no elemento estrutural, etc., deve ser dividido em lotes nos quais é verificada a conformidade. O volume total de betão de um lote deve ser fabricado em condições consideradas uniformes (mesma família).</li> <li><b>A dimensão de um lote deve ser:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- O betão fornecido para cada andar de um edifício ou grupo de vigas/lajes ou colunas/paredes de um andar de um edifício, ou partes comparáveis de outras estruturas;</li> <li>- Sempre inferior a 450 m<sup>3</sup> ou à produção de uma semana de betonagem (tomando-se o menor destes valores);</li> <li>- No caso de ensaios de recepção pelo dono da obra, o lote deve ser definido pelo dono da obra.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Por cada lote:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pelo menos 6 amostras colhidas separadamente. Se se pretender colher mais do que 6 amostras por lote, tal deve ser acordado antes de começar o fabrico do betão;</li> <li>• Para betões de classes de resistência não superiores a C20/25 e de pequenos lotes até 150 m<sup>3</sup>, podem tomar-se 3 amostras colhidas separadamente.</li> </ul>	<p><b>Admite-se a conformidade se os resultados dos ensaios satisfizerem:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Critério 1, no caso de <math>n \geq 6</math> amostras</li> <li>• Critério 2, no caso de <math>n = 3</math> amostras</li> <li>• Quando as normas nacionais ou as regulamentações em vigor no local de aplicação do betão o permitirem, pode ser suficiente uma declaração de conformidade pelo fabricante conforme EN45014, desde que: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Exista um controle de fabrico satisfazendo as exigências;</li> <li>- Os ensaios prévios tenham dado resultados satisfatórios;</li> <li>- A classe de resist. especificada para o betão não seja superior a C20/25;</li> <li>- Os lotes sejam inferiores a 150 m<sup>3</sup> ou os elementos de betão sejam de menor importância para a segurança da estrutura.</li> </ul> </li> </ul>	<p><b>Admite-se a conformidade se os resultados dos ensaios satisfizerem:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A cláusula 11.3.5.1.2. ou,</li> <li>• Quando a conformidade do betão pronto fornecido já tiver sido verificada por um organismo de certificação e se a verificação se baseou em pelo menos 15 resultados de ensaio, então, para a verificação da conformidade no local: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se <math>n \geq 6</math> aplica-se o critério 1, sendo <math>\lambda = 1,48</math></li> <li>- Se <math>n = 3</math> aplica-se o critério 2, sendo: <math>X_3 \geq f_{ck} + 3 \wedge X_{\min} \geq f_{ck} - 1</math></li> </ul> </li> </ul>					
	<p>Obra (11.3.5.1)</p>	<p>Utilização de betão pronto (*) (11.3.5.1.3)</p>		<p><b>Opção1: Baseada na amostragem por lotes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplica-se o plano de amostragem e os critérios de conformidade estabelecidos em 11.3.5.1.2. A amostragem deve fazer-se no local</li> </ul> <p><b>Opção2: Baseada na certificação do betão</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para um determinado local, não é necessário amostragem nem ensaios de conformidade desde que: <ul style="list-style-type: none"> <li>- A conformidade do betão pronto fornecido seja verificada de acordo com 11.3.5.2. por um organismo de certificação;</li> <li>- Existam resultados satisfatórios de ensaios de amostras colhidas no decurso do fabrico e existam disponíveis no local amostras de betão pronto do fornecedor, retiradas da mesma família de betão durante os últimos 7 dias de fabrico.</li> </ul> </li> </ul>				
<p>Fabrico contínuo em fabrico contínuo em pré-fabricação (11.3.5.2)</p>	<p>Utilização de betão pronto (*) (11.3.5.1.3)</p>	<p><b>Admite-se a conformidade se os resultados dos ensaios satisfizerem os requisitos do critério 1.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se forem satisfatórios os resultados de mais de 15 ensaios durante o fabrico de um tipo ou de uma família de betão, só têm que ser considerados os últimos 15 resultados.</li> </ul>	<p><b>Admite-se a conformidade se os resultados dos ensaios satisfizerem os requisitos do critério 1.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se forem satisfatórios os resultados de mais de 15 ensaios durante o fabrico de um tipo ou de uma família de betão, só têm que ser considerados os últimos 15 resultados.</li> </ul>					
<p>(Cláusula 11.3.5 da NP ENV206)</p> <p>PLANO DE AMOSTRAGEM E CRITÉRIO DE CONFORMIDADE PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO</p>	<p>Fabrico contínuo em pré-fabricação (11.3.5.3)</p>	<p>Quadro 18 – Amostragem</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Classe de resistência</th> <th>Nº de amostras</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≤ C20/25</td> <td>1 por cada 150 m<sup>3</sup> de betão mas não mais de 6 amostras por dia, a não ser que seja especificado outro valor</td> </tr> <tr> <td>&gt; C20/25</td> <td>1 por cada 75 m<sup>3</sup> de betão mas não mais de 15 amostras por dia, a não ser que seja especificado outro valor</td> </tr> </tbody> </table>		Classe de resistência	Nº de amostras	≤ C20/25	1 por cada 150 m <sup>3</sup> de betão mas não mais de 6 amostras por dia, a não ser que seja especificado outro valor	> C20/25
Classe de resistência	Nº de amostras							
≤ C20/25	1 por cada 150 m <sup>3</sup> de betão mas não mais de 6 amostras por dia, a não ser que seja especificado outro valor							
> C20/25	1 por cada 75 m <sup>3</sup> de betão mas não mais de 15 amostras por dia, a não ser que seja especificado outro valor							
<p>Fabrico contínuo em pré-fabricação (11.3.5.3)</p>	<p>Utilização de betão pronto (*) (11.3.5.1.3)</p>	<p>• Se a fábrica funciona com o esquema de certificação verificado por um organismo de certificação aprovado, deve aplicar-se o plano de amostragem e os critérios de conformidade de 11.3.5.2.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nos outros casos deve aplicar-se a cláusula 11.3.5.1.</li> </ul>	<p><b>Admite-se a conformidade se os resultados dos ensaios satisfizerem os requisitos do critério 1.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se forem satisfatórios os resultados de mais de 15 ensaios durante o fabrico de um tipo ou de uma família de betão, só têm que ser considerados os últimos 15 resultados.</li> </ul>					
<p>(Cláusula 11.3.5 da NP ENV206)</p> <p>PLANO DE AMOSTRAGEM E CRITÉRIO DE CONFORMIDADE PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO</p>	<p>Fabrico contínuo em pré-fabricação (11.3.5.3)</p>	<p>• Se a fábrica funciona com o esquema de certificação verificado por um organismo de certificação aprovado, deve aplicar-se o plano de amostragem e os critérios de conformidade de 11.3.5.2.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nos outros casos deve aplicar-se a cláusula 11.3.5.1.</li> </ul>						

(\*) A opção a usar depende das normas nacionais ou regulamentações em vigor no local de aplicação do betão ou, se tais regulamentações não existirem, de um acordo.

## 2.5 – Metodologia corrente no estudo e análise da composição de betões

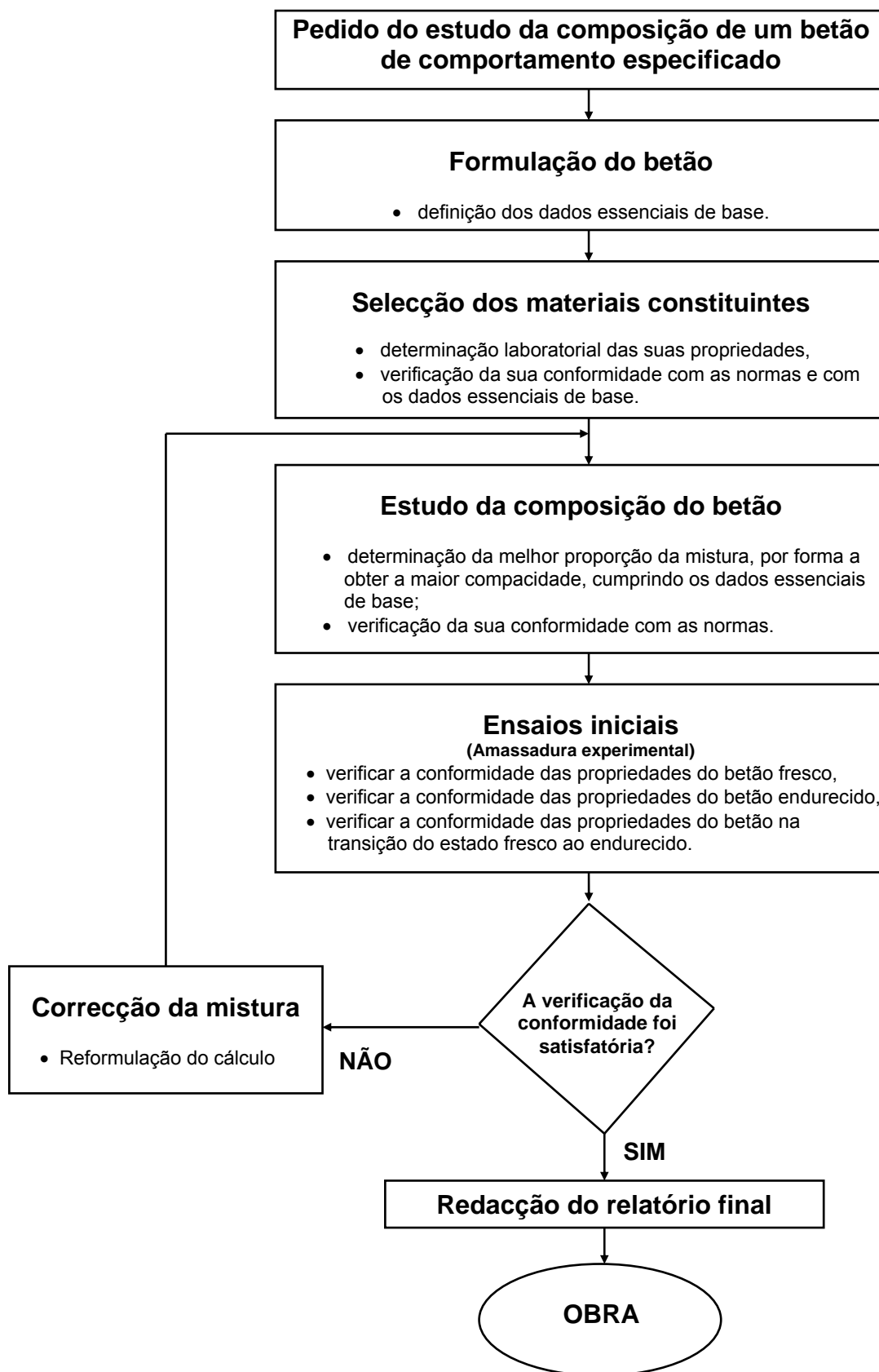


Figura 2.1 – Metodologia corrente no estudo e análise da composição de betões



## CAPÍTULO 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS BETÕES

### 3.1 – Classes de resistência

#### 3.1.1 – Conceitos básicos

Importa antes de mais rever alguns conceitos básicos no que se refere ao tratamento estatístico dos resultados do ensaio à compressão.

Assim, considere-se  $n$  leituras do valor da resistência à compressão obtidas em  $n$  provetes de ensaio.

Seja:

$f_{c1}$  – resistência à compressão, em MPa, obtida no provete 1,

$f_{c2}$  – resistência à compressão, em MPa, obtida no provete 2,

⋮

$f_{cn}$  – resistência à compressão, em MPa, obtida no provete  $n$ .

a) Valor médio da resistência à compressão ( $f_{cm}$ ):

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} \quad (3.1)$$

b) Desvio padrão ( $S_n$ ):

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} \quad (3.2)$$

c) Coeficiente de variação em percentagem (cv%):

$$cv \% = \frac{S_n}{f_{cm}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

d) Valor característico ( $f_{ck}$ ) ou valor da população das resistências do betão especificado que é atingido com probabilidade de 95%:

$$f_{ck} = f_{cm} - \lambda \cdot S_n \quad (3.4)$$

O valor de  $\lambda$  depende do número de amostras. Para um número elevado de amostras,  $\lambda$  tende para 1,64.

e) Valor de cálculo ( $f_{cd}$ ) utilizado pelo REBAP [25] e EC2 [6] para efeitos de dimensionamento de estruturas de betão armado:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck,cil}}{1,5} \quad (3.5)$$

$f_{ck,cil}$  = valor característico da resistência à compressão do betão, obtido aos 28 dias de idade em cilindros padrão de 150x300 mm, curados e ensaiados de forma normalizada.

### 3.1.2 - Classes de resistência definidas pelo REBAP

As classes de resistência à compressão definidas pelo REBAP [25] (Art.º 13) são identificadas pela sigla “Bx” (veja-se o Quadro 3.1), onde “x” representa o valor característico mínimo da tensão de rotura à compressão ( $f_{ck,cub20}$ ), obtido aos 28 dias de idade do betão, em provetes cúbicos de 200 mm de aresta, fabricados e curados conforme a

especificação do LNEC E255 [14] e ensaiados de acordo com a especificação do LNEC E226 [11].

O valor característico da tensão de rotura é definido como o valor da população das resistências do betão especificado que é atingido com probabilidade de 95%.

O REBAP apresenta, igualmente, os valores característicos correspondentes, obtidos da mesma forma, para os provetes cilíndricos padrão de 150X300 mm ( $f_{ck, cil}$ ).

**Quadro 3.1** – Classes de resistência do betão definidas pelo REBAP [25]

Classe de resistência	B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55
$f_{ck, cil}$ (1) [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck, cub20}$ (2) [MPa]	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$f_{ck, cil}$ é idêntico ao valor $f_{ck}$ usado no REBAP (em MPa)									

(1) Cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura

(2) Cubos com 200 mm de aresta

### 3.1.3 - Classes de resistência definidas pela NP\_ENV206

As classes de resistência à compressão definidas pela NP\_ENV206 [23] (Cláusula 7.3.1.1.), para betões de massa volúmica normal, são identificadas pela sigla “Cy/z” (veja-se o Quadro 3.2), onde “y” e “z” representam o valor característico mínimo da tensão de rotura à compressão, obtido aos 28 dias de idade do betão, a partir, respectivamente, de provetes cilíndricos de 150X300 mm ( $f_{ck, cil}$ ) e de provetes cúbicos de 150 mm de aresta ( $f_{ck, cub15}$ ), fabricados e curados conforme especificação do LNEC E255 [14] (ISO 1920 e ISO 2736) e ensaiados de acordo com a especificação do LNEC E226 [11] (ISO 4012).

Tal como referido anteriormente, o valor característico da tensão de rotura é definido como o valor da população das resistências do betão especificado que é atingido com probabilidade de 95%.

**Quadro 3.2** – Classes de resistência do betão de acordo com a NP\_ENV206 [23]

Classe de resistência	<u>C12/15</u>	C16/20	<u>C20/25</u>	C25/30	<u>C30/37</u>	C35/45	<u>C40/50</u>	C45/55	<u>C50/60</u>
$f_{ck,cil}$ (1) [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cub15}$ (2) [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60
$f_{ck,cil}$ é idêntico ao valor $f_{ck}$ usado no Eurocódigo 2 (em MPa ou N/mm <sup>2</sup> )									

(1) cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura

(2) Cubos com 150 mm de aresta

Por razões de fabrico e controle da qualidade, a NP\_ENV206 [23] recomenda, para especificar o betão, os valores sublinhados no Quadro 3.2.

### 3.1.4 – Correspondência entre as classes de resistência definidas no REBAP e na NP\_ENV206

A correspondência que se apresenta no Quadro 3.3 teve por base o denominador comum representado pela resistência característica em cilindros padrão.

**Quadro 3.3** – Correspondência entre as classes de resistência definidas no REBAP e na NP\_ENV206

Classes de resistência		$f_{ck,cub20}$ (1) [MPa]	$f_{ck,cil}$ (2) [MPa]	$f_{ck,cub15}$ (3) [MPa]
REBAP [25]	NP_ENV206 [23]			
B15	C12/15	15	12	15
B20	C16/20	20	16	20
B25	C20/25	25	20	25
B30	C25/30	30	25	30
B35	C30/37	35	30	37
B40	C35/45	40	35	45
B45	C40/50	45	40	50
B50	C45/55	50	45	55
B55	C50/60	55	50	60

(1) Cubos com 200 mm de aresta

(2) Cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura

(3) Cubos com 150 mm de aresta

### 3.1.5 – Critérios de conformidade para a resistência à compressão definidos pela NP\_ENV206

A NP\_ENV206 [23] estabelece, na sua Cláusula 11.3.5.4., dois critérios de verificação da conformidade para a resistência à compressão, que têm em conta o plano de amostragem definido para o controle de qualidade. Esses critérios são definidos do seguinte modo:

#### Critério 1

Este critério aplica-se quando a conformidade é verificada através da consideração de 6 ou mais amostras consecutivas, cujas resistências são  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

A resistência de uma amostra deve ser o resultado do ensaio de um provete ou a média dos resultados quando se moldam dois ou mais provetes de uma amostra.

A resistência em MPa, deve satisfazer as seguintes duas condições:

$$\bar{X}_n \geq f_{ck} + \lambda \cdot S_n \quad (3.6)$$

$$X_{\min} \geq f_{ck} - k \quad (3.7)$$

Onde:

- $X_{\min}$  é o menor valor individual do conjunto de amostras;
- $\bar{X}_n$  é a resistência média do conjunto de n amostras;
- $S_n$  é o desvio padrão das resistências do conjunto de n amostras;
- $f_{ck}$  é a resistência característica especificada para o betão;
- $\lambda$  e  $K$  são valores indicados no Quadro 3.4, de acordo com o número n de amostras do conjunto.

**Quadro 3.4 - Valores de  $\lambda$  e K**

n	$\lambda$	k
6	1.87	3
7	1.77	3
8	1.72	3
9	1.67	3
10	1.62	4
11	1.58	4
12	1.55	4
13	1.52	4
14	1.50	4
15	1.48	4

### Critério 2

Este critério aplica-se quando a conformidade é verificada através da consideração de três amostras cujas resistências são  $X_1, X_2, X_3$ .

A resistência de uma amostra deve ser o resultado do ensaio de um provete ou a média dos resultados quando se moldam dois ou mais provetes de uma amostra.

A resistência em MPa deve satisfazer as seguintes condições:

$$\bar{X}_3 \geq f_{ck} + 5 \quad (3.8)$$

$$X_{\min} \geq f_{ck} - 1 \quad (3.9)$$

Onde:

$\bar{X}_3$  é a resistência média das três amostras.

### **3.1.6 – Estimativa do valor médio da resistência à compressão a partir do valor característico definidor da classe de resistência**

Vejamos então de que forma se poderá estimar o valor médio da resistência à compressão em provetes padrão, conhecida a classe de resistência do betão.

A relação entre o valor médio e o valor característico da resistência é meramente estatística, ou seja, conhecido o valor médio ( $f_{cm}$ ) e o desvio padrão ( $S_n$ ) da resistência à

compressão de um determinado número de amostras ( $n$ ), determina-se o valor característico ( $f_{ck}$ ) por uma expressão do tipo:

$$f_{ck} = f_{cm} - \lambda \cdot S_n \quad (3.10)$$

Onde  $\lambda$  é um parâmetro estatístico que algumas normas fazem depender do número de amostras para garantir o mesmo nível de probabilidade; é o caso da NP\_ENV206 [23], como se viu anteriormente. Para um número elevado de amostras, o valor de  $\lambda$  tende para 1,64.

Consideremos agora a situação inversa, ou seja, a determinação do valor médio a partir do valor característico. Assim, analisando a Equação 3.10, poderá facilmente concluir-se que:

$$f_{cm} = f_{ck} + \lambda \cdot S_n \quad (3.11)$$

Ou, de outra forma, considerando que o coeficiente de variação ( $cv$ ) é representado pelo quociente entre o desvio padrão ( $S_n$ ) e a média ( $f_{cm}$ ):

$$f_{cm} = \frac{f_{ck}}{1 - \lambda \cdot cv} \quad (3.12)$$

Analisando as Equações 3.11 e 3.12, a primeira questão que se nos oferece colocar de imediato é a seguinte:

*- Qual das equações, ou melhor, qual dos parâmetros ( $S_n$ ) ou ( $cv$ ) se deve utilizar, qual o valor a adoptar para ( $\lambda$ ) e como se determinam todos estes parâmetros?*

A resposta parece à partida simples:

*- Teremos que arbitrar valores para esses parâmetros! O parâmetro ( $\lambda$ ) depende do nível de probabilidade associado ao  $n.º$  de amostras. Os parâmetros ( $S_n$ ) e ( $cv$ ) dependem da variabilidade prevista para o betão (função do nível de resistência e do nível de controle de produção).*

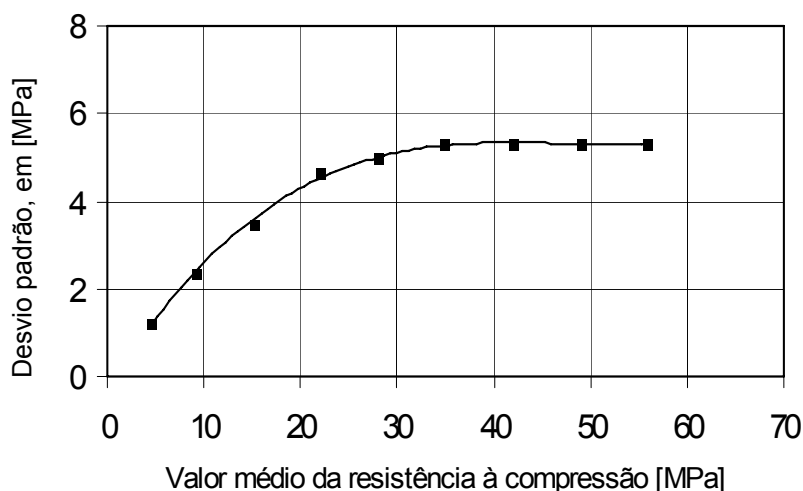
Vejamos primeiro qual dos parâmetros a utilizar ( $S_n$ ) ou (cv).

Poderá dizer-se que, para um nível de controle de qualidade constante, os dois parâmetros fornecem valores idênticos quando, quer o desvio padrão quer o coeficiente de variação, determinados para um betão, são utilizados como estimativa para calcular o valor médio de um outro betão com aproximadamente o mesmo nível de resistência característica. Porém, quando esses dados são utilizados para estimar o valor médio de um betão com resistência característica diferente, os dois métodos conduzirão provavelmente a resultados diferentes, que dependerão da forma como o desvio padrão ou o coeficiente de variação são afectados pela alteração da resistência.

Segundo uma recomendação do ACI 214-77 (reaprovado em 1989) [1], a decisão sobre qual dos parâmetros (desvio padrão ou coeficiente de variação) melhor representa a dispersão, depende de qual das medidas se mostra mais claramente constante na gama de resistências características de uma situação particular.

Neville [18], por exemplo, refere a existência de uma resistência limite (cerca de 31 MPa) abaixo da qual o coeficiente de variação é constante e acima da qual passa a ser o desvio padrão o parâmetro constante.

Erntroy [10] refere um valor constante do desvio padrão da ordem de 5,5 MPa para resistências médias à compressão a partir dos 35 MPa, Figura 3.1.



**Figura 3.1** – Relação entre o desvio padrão e a resistência média de provetes padrão obtida em betões produzidos “in situ”

Uma outra situação que se poderá proporcionar e que igualmente exige uma análise da forma como variam o desvio padrão e o coeficiente de variação está relacionada com as alterações no nível de controle de qualidade utilizado na produção do betão. Se os parâmetros da dispersão ( $S_n$  e  $cv$ ) medidos num betão, produzido com um determinado nível de controle de qualidade, são utilizados como estimativa para determinar o valor médio de um outro betão com a mesma resistência característica, mas produzido com um nível de controle de qualidade diferente, os valores dos parâmetros da dispersão ( $S_n$  e  $cv$ ) serão provavelmente diferentes da situação anterior, dependendo, desta vez, do nível de controle de qualidade.

O nível de controle de qualidade está associado à variabilidade da qualidade e das proporções dos componentes da mistura entre amassaduras e às variações resultantes das operações de amassadura e transporte, reflectindo-se em alterações nos valores do desvio padrão e do coeficiente de variação. Interessa, portanto, observar a forma como estes parâmetros variam em função dos níveis de controle de qualidade.

O Quadro 3.5, sugerido pelo ACI 214-77 (reaprovado em 1989) [1], apresenta valores típicos do desvio padrão para betões com resistências até 35 MPa, tendo por base a hipótese de um desvio padrão constante.

**Quadro 3.5** – Classificação do padrão de controle dos betões com resistências até 35 MPa de acordo com o ACI 214-77 (reaprovado em 1989) [1].

Padrão de controle da produção.	Desvio padrão em [MPa]	
	Produzido "in situ"	Produzido em laboratório
Excelente	< 3	< 1,5
Muito bom	3 – 3,5	1,5
Bom	3,5 – 4	1,5 – 2
Satisfatório	4 – 5	2 – 2,5
Pobre	> 5	> 2,5

Neville [18], ao referir-se às recomendações do ACI, nomeadamente aos valores apresentados no Quadro 3.5, deixa algumas reservas quanto à sua aplicação actual. Refere, por exemplo, o facto da tabela reflectir o controle de produção em meados da década de 70,

acrescentando que as melhorias entretanto introduzidas nos equipamentos de produção justificam uma ligeira redução dos valores do desvio padrão.

Lourenço [15], referindo-se a trabalhos realizados por Coutinho, apresenta de forma resumida no Quadro 3.6, valores típicos do desvio padrão em função do modo de medição dos componentes e da forma como é feito o controle da produção do betão. É de supor que este estudo tenha sido obtido a partir do ensaio à compressão de provetes cúbicos de 20 cm de aresta.

**Quadro 3.6** – Desvios padrão em função das condições de produção do betão

Medição dos componentes		Grau de controle da produção	Desvio padrão [MPa]
Cimento	Inertes		
Peso (servo-mecanismo)	Peso (servo-mecanismo)	Fraco	5,6
		Normal	4,6
		Bom	3,6
Peso	Peso	Fraco	6,5
		Normal	5,4
		Bom	4,4
Peso	Volume	Fraco	7,2
		Normal	6,0
		Bom	4,7
Volume	Volume	Fraco	7,6
		Normal	6,5
		Bom	5,2

**Nota:** Aplica-se a betões com resistências médias à compressão superiores a 35 MPa.

Bungey e Millard [5] sugerem, para uso geral, a adopção dos valores do desvio padrão apresentados no Quadro 3.7, os quais consideram como sendo típicos para provetes cúbicos normalizados, utilizados no controle da produção do betão.

**Quadro 3.7** – Valores típicos do desvio padrão dos provetes cúbicos utilizados no controle de produção

Nível de controle da produção e da construção	Desvio padrão dos provetes de controle, em [MPa]
Muito bom	3,0
Normal	5,0
Baixo	7,0

Um assunto que interessa abordar neste momento é a “adequabilidade” dos valores da dispersão apresentados quando o objectivo é fabricar betões de alta resistência. Os valores apresentados no Quadro 3.6, que se aplicam a resistências superiores a 35 MPa, poderiam parecer à partida “exagerados”. No entanto, se atendermos ao facto de que só é possível fabricar um betão de alta resistência em centrais modernas, com um rigoroso controle de qualidade dos materiais, uma variabilidade da mistura baixa e com operadores muito experientes, poderá estimar-se, por consulta da referida tabela, um desvio padrão compreendido entre os 3,6 MPa e os 5,6 MPa.

O intervalo de variação de 3,6 MPa a 5,6 MPa parece coincidir com valores apresentados por outros autores. Por exemplo, o ACI 363 R-84 [2] reconhece que o desvio padrão do betão de alta resistência torna-se uniforme na gama de 3,5 MPa a 4,8 MPa.

Vejamos agora que valor arbitrar para o parâmetro ( $\lambda$ ).

Admitindo que a média aritmética e o quadrado do valor do desvio padrão são uma boa estimativa da média e da variância da distribuição estatística da população que as amostras apresentam e admitindo uma distribuição normal, o valor característico da tensão de rotura ( $f_{ck}$ ) distará da média 1,64 desvios padrão, ou seja,  $\lambda$  será aproximadamente 1,64.

Contudo, se soubermos antecipadamente o número de amostras do plano de amostragem, será preferível utilizar os valores do parâmetro ( $\lambda$ ) previstos na Cláusula 11.3.5.4 da NP\_ENV206 [23] (Secção 3.1.5).

Resta apenas referir que o valor médio obtido a partir das Equações 3.11 e 3.12 terá, obviamente, por referência, provetes de betão com a mesma geometria e as mesmas condições de moldagem, cura e ensaio especificadas para o valor característico. O mesmo princípio deveria aplicar-se na estimativa quer do desvio padrão quer do coeficiente de variação.

### 3.2 – Classes de consistência (trabalhabilidade)

No que se segue resumem-se nos Quadros 3.8 e 3.9 os valores que serão utilizados no método de Faury para caracterizar os diferentes graus de consistência do betão fresco. Note-se que os resultados apresentados nos Quadros 3.8 e 3.9 não são directamente relacionáveis [8].

**Quadro 3.8** – Classes de consistência definidas a partir do ensaio de abaixamento

Trabalhabilidade	Abaixamento do cone de Abrams, em mm (de acordo com a NP 87 [20])	Meios de compactação que se podem empregar
Terra húmida	-----	Vibração potente e compressão (Pré-fabricação)
Seca	-----	Vibração potente (Pré-fabricação)
Plástica	0 a 40	Vibração normal
Mole	40 a 150	Apiloamento
Fluida	> 150	Espalhamento e compactação pelo próprio peso

**Quadro 3.9** – Graus de trabalhabilidade Vêbê

Trabalhabilidade	Número de graus Vêbê (*) (de acordo com Espec. LNEC E228 [12])	Meios de compactação que se podem empregar
Terra húmida	> 30	Vibração potente e compressão (Pré-fabricação)
Seca	10 a 30	Vibração potente (Pré-fabricação)
Plástica	2 a 10	Vibração normal
Mole	-----	Apiloamento
Fluida	-----	Espalhamento e compactação pelo próprio peso

(\*) O tempo de vibração em segundos corresponde à trabalhabilidade expressa em número de graus Vêbê.

A NP\_ENV206 [23] define as classes de consistência dos betões durante a betonagem do modo indicado nos Quadros 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13. Para além disso, estabelece ainda as seguintes recomendações de carácter geral a este respeito:

- A consistência deve ser tal que o betão fresco seja trabalhável sem segregação e possa ser totalmente compactado nas condições existentes no local;

- De forma a assegurar uma compactação adequada do betão moldado in situ, a consistência do betão fresco no momento da colocação deve ser da classe de abaixamento S3 ou da classe de espalhamento F3 a não ser que sejam tomadas outras medidas.

**Quadro 3.10** – Classes de abaixamento definidas pela NP\_ENV206 [23]

Classe	Abaixamento, em mm
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	≥ 160
O abaixamento medido deve ser arredondado para os 10 mm mais próximos	

**Quadro 3.11** – Classes Vêbê definidas pela NP\_ENV206 [23]

Classe	Vêbê, em segundos
V0	≥ 31
V1	30 a 21
V2	20 a 11
V3	10 a 5
V4	≤ 4

**Quadro 3.12** – Classes de compactação definidas pela NP\_ENV206 [23]

Classe	Grau de compactabilidade
C0	≥ 1,46
C1	1,45 a 1,26
C2	1,25 a 1,11
C3	1,10 a 1,04

**Quadro 3.13** – Classes de espalhamento definidas pela NP\_ENV206 [23]

Classe	Diâmetro de espalhamento, em mm
F1	≤ 340
F2	350 a 410
F3	420 a 480
F4	490 a 600

Tal como se referiu anteriormente, também neste caso, as diferentes classes de consistência apresentadas nos Quadros 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13 não são directamente relacionáveis [23].

### 3.3 – Classes de exposição (durabilidade)

A NP\_ENV206 [23] considera que a dosagem de cimento e a razão A/C são factores que condicionam a durabilidade dos betões e, como tal, faz depender essas quantidades das condições ambientais de exposição e das exigências relativas ao betão de recobrimento das armaduras.

Assim, tendo em conta a classe de exposição do betão, tal como definida no Quadro 3.14, a NP\_ENV206 [23] estabelece - para betões fabricados com inertes de máxima dimensão igual ou inferior a 32 mm - valores máximos para a razão A/C e valores mínimos da dosagem de cimento a adoptar no estudo da composição do betão, como se ilustra no Quadro 3.15.

**Quadro 3.14 – Classes de exposição relacionadas com as condições ambientais**

(Quadro 2 da Cláusula 5.3. da NP\_ENV206 [23])

Classes de exposição		Exemplo de condições ambientais
1 (Ambiente seco)		- interior de habitações ou de escritórios (1)
2 (Ambiente húmido)	a (sem gelo)	- interior de edifícios onde a humidade é elevada (p. ex. lavandarias) - elementos exteriores - elementos em águas ou solos não agressivos
	b (com gelo)	- elementos exteriores sujeitos ao gelo - elementos em águas ou solos não agressivos e expostos ao gelo - elementos interiores onde a humidade é elevada e expostos ao gelo
3 (ambiente húmido com gelo e produtos descongelantes)		- elementos interiores e exteriores expostos ao gelo e a produtos descongelantes
4 (ambiente marítimo)	a (sem gelo)	- elementos completa ou parcialmente submersos na água do mar ou sujeitos aos efeitos da rebentação - elementos em ar saturado de sais (área costeira)
	b (com gelo)	- elementos parcialmente submersos na água do mar ou sujeitos aos efeitos da rebentação e expostos ao gelo - componentes em ar saturado de sais e expostos ao gelo
As classes seguintes podem ocorrer isoladas ou em combinação com as classes acima mencionadas		
5 (ambiente quimicamente agressivo) (2)	a	- ambiente químico ligeiramente agressivo (gás, líquido ou sólido) - atmosfera industrial agressiva
	b	- ambiente químico moderadamente agressivo (gás, líquido ou sólido)
	c	- ambiente químico altamente agressivo (gás, líquido ou sólido)
<p>(1) Esta classe de exposição só é válida desde que, durante a construção, a estrutura ou alguns dos seus elementos, não esteja exposta a condições mais severas durante um período prolongado de tempo.</p> <p>(2) Os ambientes quimicamente agressivos estão classificados na ISO 9690. Podem ser utilizadas as condições equivalentes de exposição que a seguir se indicam:</p> <p style="text-align: center;">Classe de exposição 5a: classificação ISO A1G, A1L, A1S Classe de exposição 5b: classificação ISO A2G, A2L, A2S Classe de exposição 5c: classificação ISO A3G, A3L, A3S</p>		

### Quadro 3.15 – Requisitos de durabilidade relacionados com a exposição ambiental

(Quadro 3 da Cláusula 5.3. da NP\_ENV206 [23])

Requisitos	Classes de exposição de acordo com o Quadro 2								
	1	2a	2b	3	4a	4b	5a	5b	5c (1)
Razão A/C máxima para (2) - betão simples - betão armado - betão pré-esforçado	--- 0,65 0,60	0,70 0,60 0,60	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45
Dosagem mínima de Cimento (2), em kg/m <sup>3</sup> , para: - betão simples - betão armado - betão pré-esforçado	150 260 300	200 280 300	200 280 300	300	300	300	200 280 300	300	300
Teor mínimo de ar no betão Fresco, em %, para a máxima Dimensão do inerte de (3) - 32 mm - 16 mm - 8 mm	---	---	(4) 4 5 6	(4) 4 5 6	---	(4) 4 5 6	---	---	---
Inertes resistentes ao gelo (6)	---	---	sim	sim	---	sim	---	---	---
Betão impermeável segundo 7.3.1.5.	---	---	sim	sim	sim	sim	sim	sim	Sim
Tipos de cimento para betão simples e armado	De acordo com a EN 197 – Partes 1 e 2 (proj. Junho 88) (*)						Cimento resistente aos sulfatos (5) para teores de sulfato > 500 mg/kg na água > 3000 mg/kg no solo		
<p>Estes valores da razão A/C e da dosagem de cimento respeitam a cimentos sobre os quais existe uma larga experiência em vários países. Contudo, na altura da redacção desta pré-norma, a experiência de utilização de certos cimentos normalizados na EN 197 é limitada às condições climáticas locais nalguns países. Assim durante a vigência desta pré-norma, particularmente para as classes de exposição 2b, 3 e 4b, na escolha de tipo de cimento e na sua composição convém seguir as normas nacionais ou regulamentações em vigor no local de aplicação do betão (*). Em alternativa, a aplicabilidade dos cimentos pode comprovar-se por ensaios em betão sujeito às condições de utilização previstas (*). Refira-se ainda que o cimento CE I pode geralmente ser utilizado no betão pré-esforçado. Podem ser utilizados outros tipos de cimento se existir experiência e a sua aplicação for permitida pelas normas nacionais ou regulamentações em vigor no local de aplicação do betão (*).</p>									
<p>(1) Além disso o betão deve estar protegido do contacto directo com o meio agressivo por um revestimento, a não ser nos casos particulares em que tal protecção for considerada desnecessária.  (2) A dosagem mínima de cimento e a razão A/C máxima estabelecidas nesta Pré-norma só se referem aos cimentos listados em 4.1. Quando se adicionam à composição pozolanas ou adições hidráulicas latentes, as normas nacionais ou regulamentares em vigor no local de aplicação do betão (*) poderão estabelecer modificações dos valores mínimo e máximo.  (3) Com um factor de espaçamento do ar introduzido no sistema de vazios &lt; 0,20 mm medido no betão endurecido.  (4) Nos casos em que o grau de saturação é elevado durante períodos de tempo prolongados, podem-se aplicar outros valores ou outras medidas se o betão for ensaiado e se verificar que tem resistência ao gelo adequada de acordo com as normas nacionais ou regulamentações em vigor no local de aplicação do betão (*).  (5) A resistência do cimento aos sulfatos deve ser determinada com base nas normas nacionais ou regulamentações em vigor no local de aplicação do betão (*).  (6) A verificar segundo as normas nacionais ou regulamentações em vigor no local de aplicação do betão (*).</p>									

(\*) Ver Anexo NA (Anexo Nacional)



## CAPÍTULO 4 – MÉTODO DAS CURVAS DE REFERÊNCIA DE FAURY

### 4.1 – Fórmula fundamental da composição do betão

Consideremos a unidade de volume do betão. Obtém-se deste modo a seguinte equação:

$$i + c + a + v = 1 \quad (4.1)$$

Onde:

$i$  = volume unitário do inerte,

$c$  = volume unitário de cimento,

$a$  = volume unitário de água,

$v$  = volume unitário de vazios (ar ocluído).

Tomando para unidade de volume o  $m^3$  e para unidade de massa o kg, a Equação 4.1 pode ser colocada da seguinte forma:

$$\sum \frac{I_i}{\delta_i} + \frac{C}{\delta_c} + \frac{A}{\delta_a} + V_v = 1m^3 \quad (4.2)$$

Onde:

$I_i$  = dosagem do inerte  $i$ , expressa em kg por cada  $m^3$  de betão;

$\delta_i$  = massa volúmica do inerte  $i$ , em  $kg/m^3$ ;

$C$  = dosagem de cimento, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão;

$\delta_c$  = massa volúmica do cimento, em  $kg/m^3$ ;

$A$  = dosagem de água, expressa em kg (ou litros) por cada  $m^3$  de betão;

$\delta_a$  = massa volúmica da água, em  $kg/m^3$ ;

$V_v$  = volume de vazios do betão, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.

## 4.2 – Determinação do volume de vazios

O volume de vazios é uma quantidade difícil de conhecer. A experiência tem mostrado a seguinte variação [8]:

Betão mais doseado e rico em cimento,

$$V_v \cong 10 \text{ litros por cada m}^3 \text{ de betão;}$$

Betão mais pobre,

$$V_v \cong 30 \text{ litros por cada m}^3 \text{ de betão.}$$

Uma estimativa do volume de vazios pode ser obtida em função da máxima dimensão do inerte, de acordo com a Norma 613 do ACI, conforme se ilustra no Quadro 4.1. Sousa Coutinho [8] recomenda, igualmente, a utilização destes valores.

**Quadro 4.1** – Volume de vazios do betão em função da máxima dimensão do inerte.

Máxima dimensão do inerte (D) [mm]	Volume de vazios (V <sub>v</sub> ) [ litros por cada m <sup>3</sup> de betão]
9,5	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3
152,4	2

## 4.3 – Determinação do índice de vazios

O índice de vazios (I<sub>v</sub>) corresponde à soma dos volumes de água e vazios por unidade de volume de betão logo após a colocação.

Expressão geral para o cálculo do índice de vazios de Faury [8, 15, 16]:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad [\text{m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão}] \quad (4.3)$$

Onde:

K, K' - parâmetros que dependem da natureza dos inertes, da trabalhabilidade pretendida e dos meios de colocação utilizados, conforme definido no Quadro 4.2;

R - raio médio do molde que contém o betão, em mm;

D - máxima dimensão do inerte, em mm.

A Equação 4.3 permite calcular o índice de vazios para o betão armado e simples (não armado). A primeira parcela desta equação é válida para o betão simples. A segunda parcela é um acréscimo de vazios que se destina a contabilizar o efeito de parede. No caso do betão simples ( $R/D = \infty$ ).

**Quadro 4.2** – Valores dos parâmetros K e K' para determinação do índice de vazios [8]

Trabalhabilidade	Meios de colocação	Valores de K			Valores de K'
		Natureza dos inertes			
		Areia rolada			
		Inerte grosso rolado	Inerte grosso britado	Areia britada e inerte grosso britado	
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	$\leq 0,24$	$\leq 0,25$	$\leq 0,27$	0,002
Seca	Vibração potente	0,25 a 0,27	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,003
Plástica	Vibração média	0,26 a 0,28	0,28 a 0,30	0,30 a 0,34	0,003
Mole	Apiloamento	0,34 a 0,36	0,36 a 0,38	0,38 a 0,40	0,003
Fluida	Sem nada	$\geq 0,36$	$\geq 0,38$	$\geq 0,40$	0,004

#### 4.4 – Determinação da dosagem de água de amassadura

A água de amassadura de um betão, admitindo os inertes saturados com a superfície seca, pode ser dividida em três parcelas:

- A primeira é mais ou menos fixa e destina-se a formar uma pasta com o cimento;
- A segunda destina-se a molhar a superfície dos inertes para permitir a ligação com a pasta de cimento; depende da superfície dos grãos desse inerte e, em consequência da sua dimensão;
- A terceira será uma quantidade adicional para permitir a obtenção de determinada trabalhabilidade (consistência).

Várias foram as expressões propostas para a determinação da quantidade de água de amassadura, desde Paul Alexandre, Feret, Abrams, Bolomey, Faury e outros. Faury simplificou a questão, considerando que para um determinado betão, com dada trabalhabilidade, há um volume máximo de materiais sólidos ao qual corresponde um vazio mínimo. Tal volume mínimo de vazios é a soma do volume total da água necessária para amassar e colocar o betão com o ar ocluído.

Assim, conhecido o índice de vazios ( $I_v$ ) e o volume de vazios ( $V_v$ ), a quantidade de água de amassadura ( $A$ ) para a produção de  $1 \text{ m}^3$  de betão poderá ser determinada, sem grande erro, pela expressão:

$$A = I_v - V_v \quad (4.4)$$

Onde:

$A$  = dosagem de água de amassadura, em litros por cada  $\text{m}^3$  de betão,

$I_v$  = índice de vazios de Faury, expresso em litros por cada  $\text{m}^3$  de betão,

$V_v$  = volume de vazios do betão, expresso em litros por cada  $\text{m}^3$  de betão.

#### 4.5 – Relação água/cimento em massa

É sabido que a resistência à compressão de um betão está estreitamente relacionada com a razão água/cimento ou, de uma forma mais abrangente, com a razão água/(materiais cimentícios).

Não existe uma única relação universal que possa ser generalizada a todos os tipos de betão. Contudo, poderão ser obtidas correlações muito estreitas entre a resistência à compressão e a razão água/(materiais cimentícios), se estas forem determinadas especificamente para o tipo de betões (tipo de materiais constituintes) em estudo.

Com base nestas correlações e para o mesmo tipo de materiais que conduziram à sua obtenção, será então possível formular, com uma precisão razoável, a composição de betões com diferentes níveis de resistência.

Na Figura 4.1 apresenta-se um gráfico proposto pelo ACI e citado por Coutinho e Gonçalves [9], relacionando a razão A/C em massa com a resistência à compressão em provetes cúbicos de 150 mm de aresta, ensaiados aos 28 dias de idade. Este gráfico foi obtido em betões de componentes normais utilizando-se um cimento portland normal.

Note-se que originalmente o gráfico referia-se a provetes cúbicos de 200 mm de aresta. A conversão para a resistência equivalente em cubos de 150 mm de aresta foi efectuada com base na seguinte expressão recomendada por Almeida [3]:

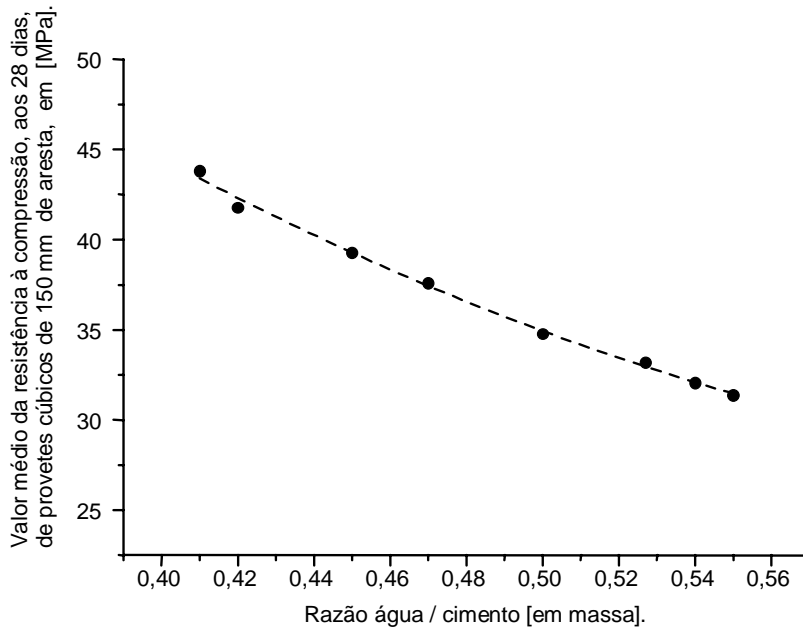
$$f_{cm,cub15} = (f_{cm,cub20} - 2,26) / 0,884 \quad (4.5)$$

Onde:

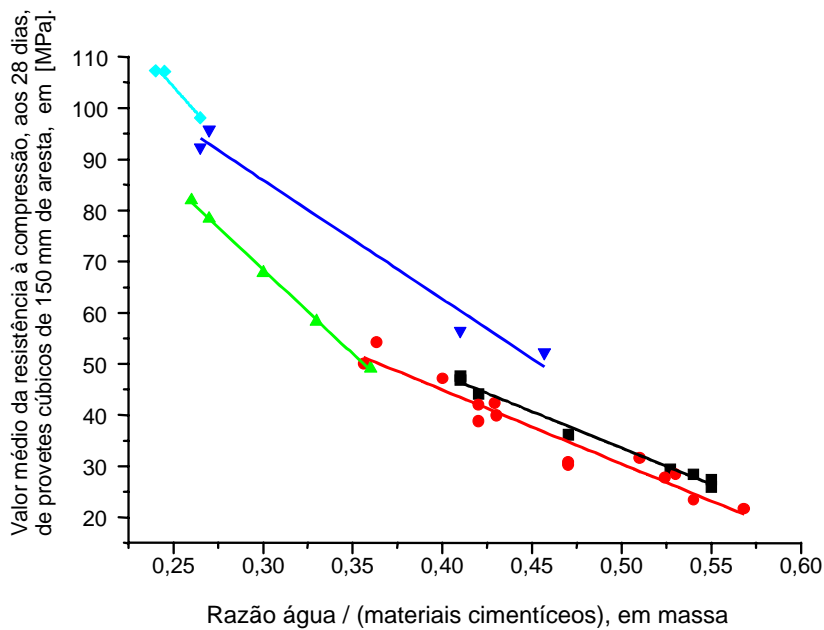
$f_{cm,cub15}$  = tensão de rotura média à compressão em cubos de 150 mm de aresta,

$f_{cm,cub20}$  = tensão de rotura média à compressão em cubos de 200 mm de aresta.

O gráfico que se apresenta na Figura 4.2 relaciona a razão água/(materiais cimentícios), em massa, com a resistência média à compressão, obtida aos 28 dias de idade, em betões sujeitos a cura normalizada de acordo com a especificação do LNEC E255 [14] e ensaiados de acordo com a especificação do LNEC E226 [11].



**Figura 4.1** – Resistência média à compressão dos betões versus razão A/C [9]



**Legenda:**

- Correlação 1– Cimento tipo II/32,5; sem aditivos e adjuvantes.
- Correlação 2– Cimento tipo II/32,5 + plastificante.
- ▲ Correlação 3– Cimento tipo I/42,5 + superplastificante.
- ▼ Correlação 4– Cimento tipo I/42,5 + cinzas volantes + superplastificante.
- ◆ Correlação 5– Cimento tipo I/42,5 + sílica de fumo + superplastificante.

**Figura 4.2** – Razão água/(materiais cimentícios) versus resistência à compressão para betões de diferentes elementos constituintes e diferentes dosagens [17]

O gráfico apresentado na Figura 4.2 resultou de um estudo laboratorial efectuado por Nepomuceno [17], no Laboratório de Materiais e Estruturas da UBI, com base em cerca de 40 composições de betão diferentes, utilizando diferentes materiais constituintes. Os materiais constituintes dos betões que conduziram à obtenção das diferentes curvas de correlação foram os seguintes:

#### Correlação 1

Areia natural rolada do rio ou areia britada de granito; inertes grossos britados de granito com a máxima dimensão de 25,4 mm; cimento portland composto tipo II, classe 32,5 e água potável;

#### Correlação 2

Areia natural rolada do rio ou areia britada de granito; inertes grossos britados de granito com a máxima dimensão de 25,4 mm; cimento portland composto tipo II, classe 32,5; plastificante (líquido) com redução de água de aproximadamente 11% e água potável;

#### Correlação 3

Areia natural rolada do rio; inertes grossos britados de granito com a máxima dimensão de 25,4 mm; cimento portland normal tipo I, classe 42,5R; superplastificante (líquido) com redução de água de aproximadamente 22% e água potável;

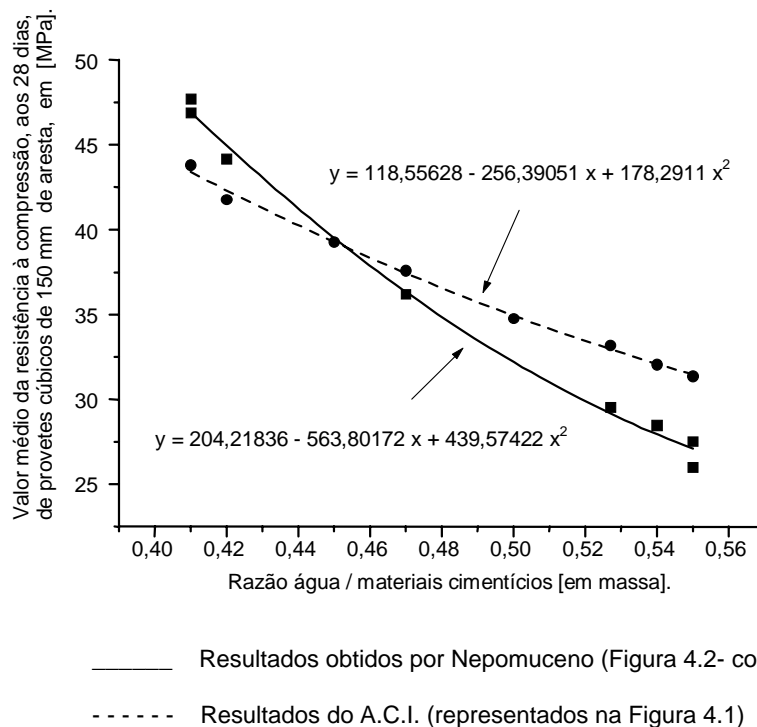
#### Correlação 4

Areia natural rolada do rio; inertes grossos britados de granito com a máxima dimensão de 19,1 mm; cimento portland normal tipo I, classe 42,5R; cinzas volantes; superplastificante (líquido) com redução de água de aproximadamente 30% e água potável;

#### Correlação 5

Areia natural rolada do rio; inertes grossos britados de granito com a máxima dimensão de 19,1 mm; cimento portland normal tipo I, classe 42,5R; sílica de fumo; superplastificante (líquido) com redução de água de aproximadamente 30% e água potável.

A Figura 4.3 compara os resultados obtidos neste estudo (correlação 1 da Figura 4.2) com aqueles apresentados pelo ACI (Figura 4.1), no que se refere aos betões com elementos constituintes similares.



**Figura 4.3** – Comparação entre os resultados obtidos por Nepomuceno [17] e aqueles propostos pelo ACI para a relação entre a resistência à compressão e a razão A/C

#### 4.6 – Determinação da dosagem de cimento em massa

Estabelecida a razão A/C (em massa) e uma vez determinada a quantidade de água de amassadura por metro cúbico de betão, conforme se definiu no Sub-Capítulo 4.4, a dosagem de cimento decorre naturalmente da expressão:

$$C = A / (\text{razão A/C}) \quad (4.6)$$

Onde:

C = dosagem de cimento, expressa em kg por cada m<sup>3</sup> de betão,

A = dosagem de água de amassadura, em litros por cada m<sup>3</sup> de betão,

Razão A/C = razão água/cimento em massa.

#### 4.7 – Volume das partículas de cimento

O volume que as partículas de cimento ocupam num metro cúbico de betão é dado pela seguinte expressão:

$$V_c = \frac{C}{\delta_c} \quad (4.7)$$

Onde:

$V_c$  = volume das partículas de cimento, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão,

$C$  = dosagem de cimento, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão,

$\delta_c$  = massa volúmica do cimento, em  $kg/m^3$ .

#### 4.8 – Volume do total das partículas sólidas do betão

O volume do total das partículas sólidas do betão inclui os volumes das partículas dos inertes e do cimento e é determinado da seguinte forma:

$$V_s = 1 - I_v \quad (4.8)$$

Onde:

$V_s$  = volume do total das partículas sólidas do betão, em  $m^3$  por  $m^3$  de betão;

$I_v$  = Índice de vazios de Faury, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.

#### 4.9 – Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total

A percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão é determinada pela expressão:

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100 \quad (4.9)$$

Onde:

$C\%$  = percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;

$V_c$  = volume das partículas de cimento, em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;

$V_s$  = volume do total das partículas sólidas do betão, em  $m^3$  por  $m^3$  de betão;

## **4.10 – Determinação das quantidades dos elementos sólidos**

### **4.10.1 – Método da curva de referência de Faury**

O método da curva de referência de Faury permite determinar a melhor proporção de cada um dos componentes sólidos do betão, de modo que a curva granulométrica daí resultante (curva real) se aproxime da curva de referência. Note-se que, a curva de referência de Faury inclui apenas as partículas sólidas do betão e, como tal, as percentagens determinadas serão relativas ao volume sólido ocupado por essas partículas e não ao metro cúbico.

Uma vez que a percentagem do cimento em relação ao volume sólido total é já um dado conhecido, podem ser utilizadas duas vias de cálculo:

- traçar a curva de referência descontando-lhe o cimento, e proceder à determinação das proporções dos inertes ignorando a sua presença;

- Considerar a curva de referência com a percentagem de cimento incluída, mas, cujo valor é já conhecido, e determinar as proporções dos elementos sólidos do betão.

A aproximação da curva real à curva de referência pode ser feita analítica ou graficamente.

#### Critério que será utilizado nesta aula teórico-prática

Nesta aula teórico-prática será utilizada a curva de referência sem descontar a percentagem de cimento, mas, considerando-o como um componente de percentagem conhecida. Para a aproximação da curva real à curva de referência será utilizada uma construção geométrica, ou seja, um método gráfico que traduz o método analítico. Posteriormente será utilizado um programa informático que utiliza a via analítica, traduzindo-se pela resolução de um sistema de equações.

Ao aplicar-se o método proposto, em que a curva de referência inclui o cimento, será necessário ter em atenção as duas condições seguintes:

a) A soma das percentagens (em relação ao volume sólido total) dos inertes ( $I_1\%$ ,  $I_2\%$ ,...,  $I_n\%$ ) e do cimento (C%) é igual a 100%.

$$I_1\% + I_2\% + \dots + I_n\% + C\% = 100\% \quad (4.10)$$

b) O módulo de finura da curva de referência ( $MF_{ref}$ ) é igual ao módulo de finura da curva real ( $MF_{real}$ ), ou seja:

$$MF_{ref} = (MF_1 \cdot I_1\% + MF_2 \cdot I_2\% + \dots + MF_n \cdot I_n\%) / 100 \quad (4.11)$$

Onde:

$MF_i$  é o módulo de finura do inerte  $i$ ,

$I_i\%$  é a percentagem do inerte  $i$  em relação ao volume sólido total.

Nota: O módulo de finura do cimento é nulo

#### 4.10.2 – Curva granulométrica de referência de Faury

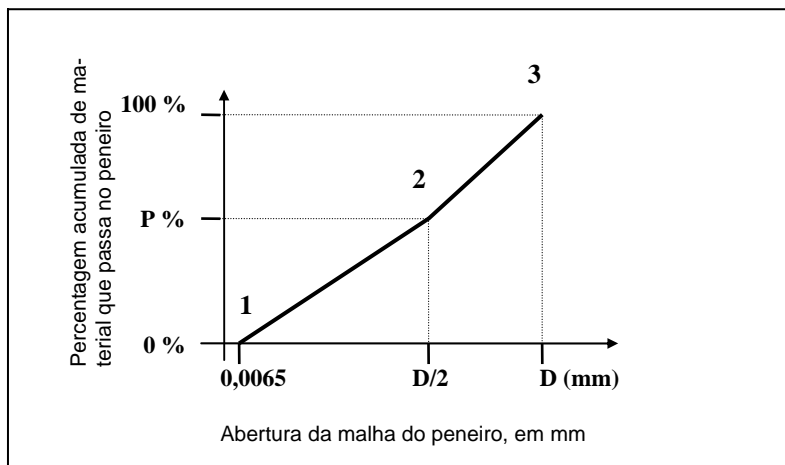
A curva de referência de Faury é na realidade constituída por dois segmentos de recta que são representados num diagrama em que as ordenadas e as abcissas têm o significado habitual nas curvas granulométricas. As abcissas vão de 0,0065 mm até D e têm uma escala proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas. As ordenadas têm uma escala linear.

O valor 0,0065 corresponde à menor dimensão de todas as partículas sólidas do betão, ou seja, à menor dimensão dos grãos de cimento.

Os três pontos que definem a curva de referência são apresentados no Quadro 4.3.

**Quadro 4.3** – Pontos da curva de referência de Faury

Ponto	Abcissa [mm]	Ordenada [%]
1	0,0065	0,0
2	D/2	$P_{D/2}$
3	D	100



**Figura 4.4** – Representação gráfica dos pontos da curva de referência de Faury

Determinação da ordenada do ponto de abcissa D/2:

$$P_{D/2} = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (4.12)$$

Onde:

A, B - são parâmetros que dependem da natureza dos inertes, do meio de colocação utilizado e da consistência do betão (veja-se o Quadro 4.4);

R - raio médio do molde, em mm;

D - máxima dimensão do inerte, em mm;

$P_{D/2}$  - Percentagem do material sólido total que passa no peneiro D/2.

**Quadro 4.4** – Valores dos parâmetros A e B da curva de referência de Faury [8]

Trabalha- bilidade	Meios de colocação	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos inertes			
		Areia rolada			
		Inerte grosso rolado	Inerte grosso britado	Areia britada e inerte grosso britado	
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
Seca	Vibração potente	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluida	Sem nada	32	34	38	2

#### 4.10.3 – Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury

O módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury é determinado por consulta do Quadro 4.5, uma vez conhecidos o valor da máxima dimensão do inerte (D) e do parâmetro (a), determinados da seguinte forma:

$$a = A + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (4.13)$$

Onde os parâmetros A, B, R e D têm o mesmo significado já definido no traçado da curva de referência.

**Quadro 4.5 – Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury [8]**

Máxima dimensão do inerte D	Valores da expressão (a)									
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
203,2	7,14	7,09	7,04	6,98	6,93	6,88	6,83	6,78	6,73	6,68
152,4	6,90	6,85	6,80	6,75	6,70	6,65	6,60	6,55	6,50	6,45
101,6	6,61	6,56	6,52	6,47	6,42	6,37	6,32	6,27	6,22	6,18
76,2	6,35	6,30	6,25	6,21	6,16	6,11	6,07	6,02	5,97	5,92
50,8	6,03	5,98	5,94	5,89	5,85	5,80	5,76	5,71	5,67	5,62
38,1	5,76	5,72	5,67	5,63	5,58	5,54	5,49	5,45	5,40	5,36
25,4	5,40	5,36	5,32	5,28	5,24	5,19	5,15	5,11	5,07	5,03
19,1	5,12	5,08	5,04	5,00	4,96	4,92	4,87	4,83	4,79	4,75
12,7	4,74	4,70	4,66	4,62	4,58	4,54	4,50	4,46	4,42	4,39
9,52	4,39	4,35	4,32	4,28	4,24	4,20	4,17	4,13	4,09	4,05
6,35	4,03	4,00	3,96	3,93	3,89	3,86	3,82	3,79	3,75	3,72
4,76	3,72	3,69	3,65	3,62	3,58	3,55	3,52	3,48	3,45	3,41

Máxima dimensão do inerte D	Valores da expressão (a)									
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
203,2	6,62	6,57	6,52	6,47	6,42	6,37	6,32	6,26	6,21	6,16
152,4	6,40	6,35	6,30	6,25	6,20	6,15	6,10	6,05	6,00	5,95
101,6	6,13	6,08	6,03	5,98	5,93	5,89	5,84	5,79	5,74	5,69
76,2	5,88	5,83	5,78	5,74	5,69	5,64	5,59	5,55	5,50	5,45
50,8	5,58	5,53	5,49	5,44	5,40	5,35	5,30	5,26	5,21	5,17
38,1	5,31	5,27	5,22	5,18	5,14	5,09	5,05	5,00	4,96	4,91
25,4	4,99	4,94	4,90	4,86	4,82	4,78	4,74	4,69	4,65	4,61
19,1	4,71	4,67	4,62	4,58	4,54	4,50	4,46	4,42	4,37	4,33
12,7	4,35	4,31	4,27	4,23	4,19	4,15	4,11	4,07	4,03	3,99
9,52	4,02	3,98	3,94	3,90	3,86	3,83	3,79	3,75	3,72	3,68
6,35	3,68	3,65	3,61	3,58	3,54	3,51	3,47	3,43	3,40	3,36
4,76	3,38	3,35	3,31	3,28	3,25	3,21	3,18	3,14	3,11	3,08

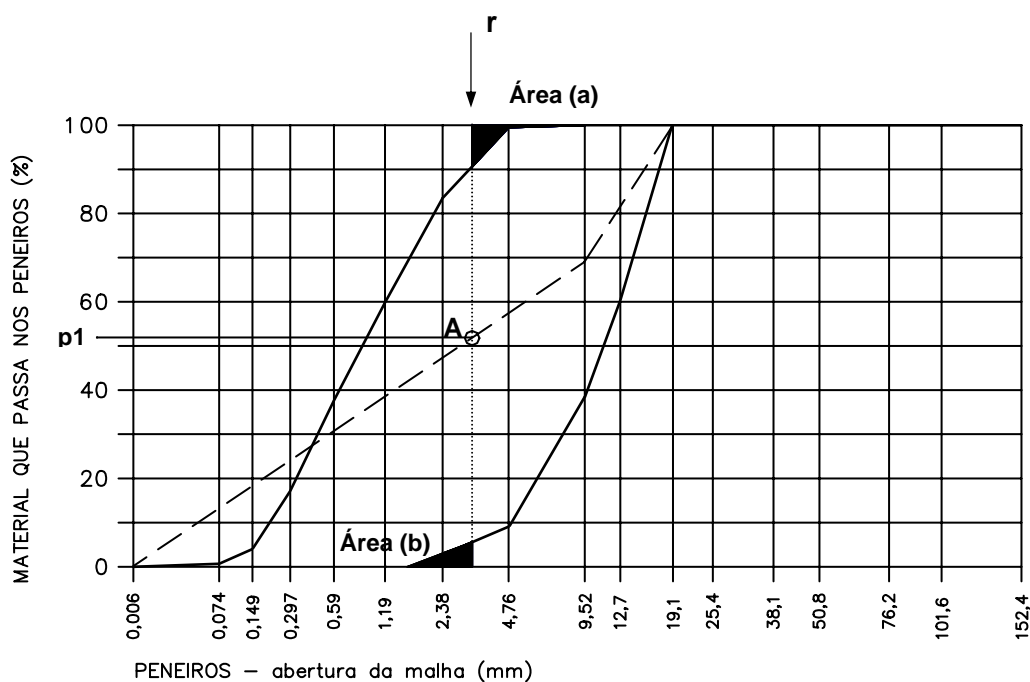
  

Máxima dimensão do inerte D	Valores da expressão (a)										
	35	36	37	38	39	40	41	43	44	45	46
203,2	6,11	6,06	6,01	5,96	5,91	4,85	5,80	5,75	5,70	5,65	5,60
152,4	5,90	5,85	5,80	5,75	5,70	5,65	5,60	5,55	5,50	5,45	5,40
101,6	5,64	5,60	5,55	5,50	5,45	5,40	5,36	5,31	5,26	5,21	5,16
76,2	5,40	5,36	5,31	5,26	5,22	5,17	5,12	5,07	5,03	4,98	4,93
50,8	5,12	5,08	5,03	4,99	4,94	4,89	4,85	4,80	4,76	4,71	4,69
38,1	4,87	4,82	4,78	4,74	4,69	4,65	4,60	4,56	4,51	4,47	4,42
25,4	4,57	4,53	4,48	4,44	4,40	4,36	4,32	4,28	4,24	4,19	4,15
19,1	4,29	4,25	4,21	4,17	4,12	4,08	4,04	4,00	3,96	3,92	3,88
12,7	3,96	3,92	3,88	3,84	3,80	3,76	3,72	3,68	3,64	3,60	3,56
9,52	3,64	3,60	3,56	3,53	3,49	3,45	3,41	3,38	3,34	3,30	3,26
6,35	3,33	3,29	3,26	3,22	3,19	3,15	3,12	3,08	3,05	3,01	2,98
4,76	3,04	3,01	2,98	2,94	2,91	2,88	2,84	2,81	2,78	2,74	2,71

#### 4.10.4 – Determinação das percentagens dos componentes sólidos

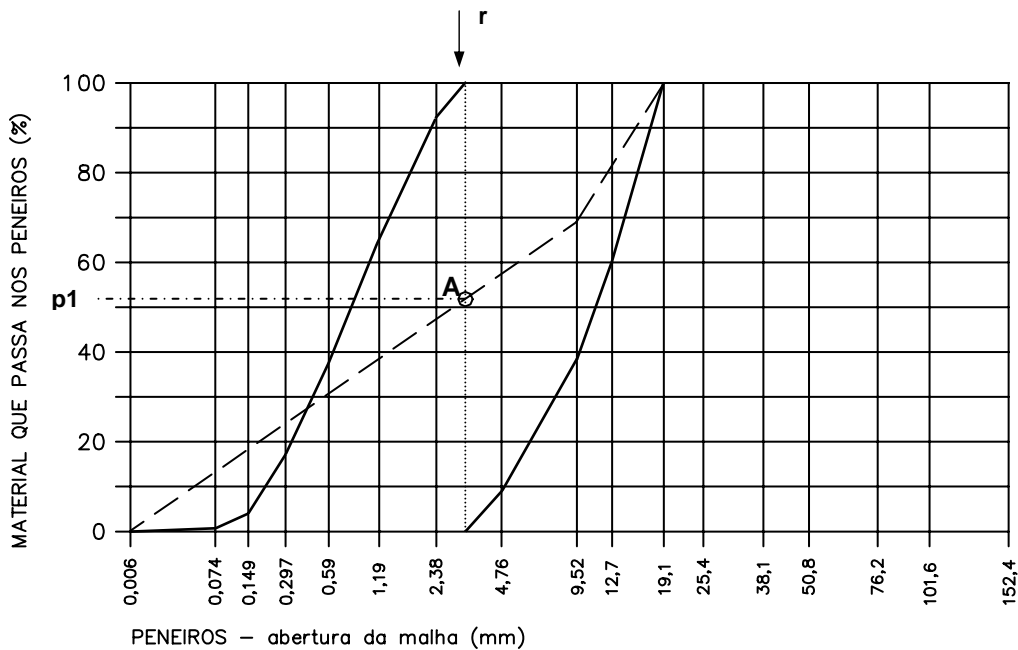
O método gráfico para ajustar a curva real à curva de referência inicia-se desenhando, no mesmo diagrama, a curva de referência e as curvas granulométricas dos inertes 1,2,3,..., n de que se dispõe. No diagrama, a escala das abcissas deverá ser proporcional à  $\sqrt{5}$  da abertura dos peneiros, enquanto a escala das ordenadas deverá ser linear. O procedimento prossegue da forma que a seguir se descreve.

A primeira situação, ilustrada na Figura 4.5, é a mais frequente e é também a mais desejável do ponto de vista da continuidade da curva granulométrica final. Uma linha vertical (r) é desenhada de modo que as áreas (a) e (b), limitadas por esta linha e pelas curvas granulométricas, sejam iguais. A sua intercepção com a curva de referência fornece o ponto (A) e a projecção horizontal deste ponto determina a percentagem p1.



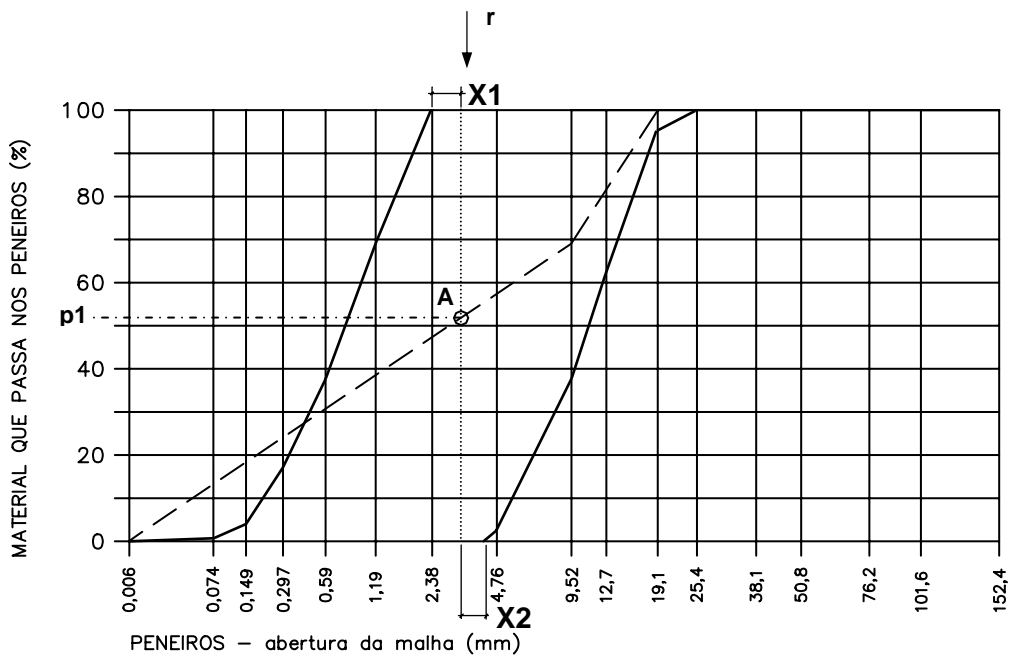
**Figura 4.5** – Aproximação da curva real à curva de referência (situação 1)

Na situação 2, representada na Figura 4.6, aplica-se o mesmo procedimento. Contudo, uma vez que o extremo de uma curva granulométrica corresponde ao início da curva granulométrica seguinte, as áreas serão nulas.



**Figura 4.6** – Aproximação da curva real à curva de referência (situação 2)

A situação 3, ilustrada na Figura 4.7, é de todo indesejável, já que conduz à ausência de uma determinada gama de partículas e à conseqüente descontinuidade da curva granulométrica. Neste caso, a linha vertical ( $r$ ) é traçada de modo que as distâncias ( $X1$ ) e ( $X2$ ), às extremidades das curvas granulométricas, sejam iguais.



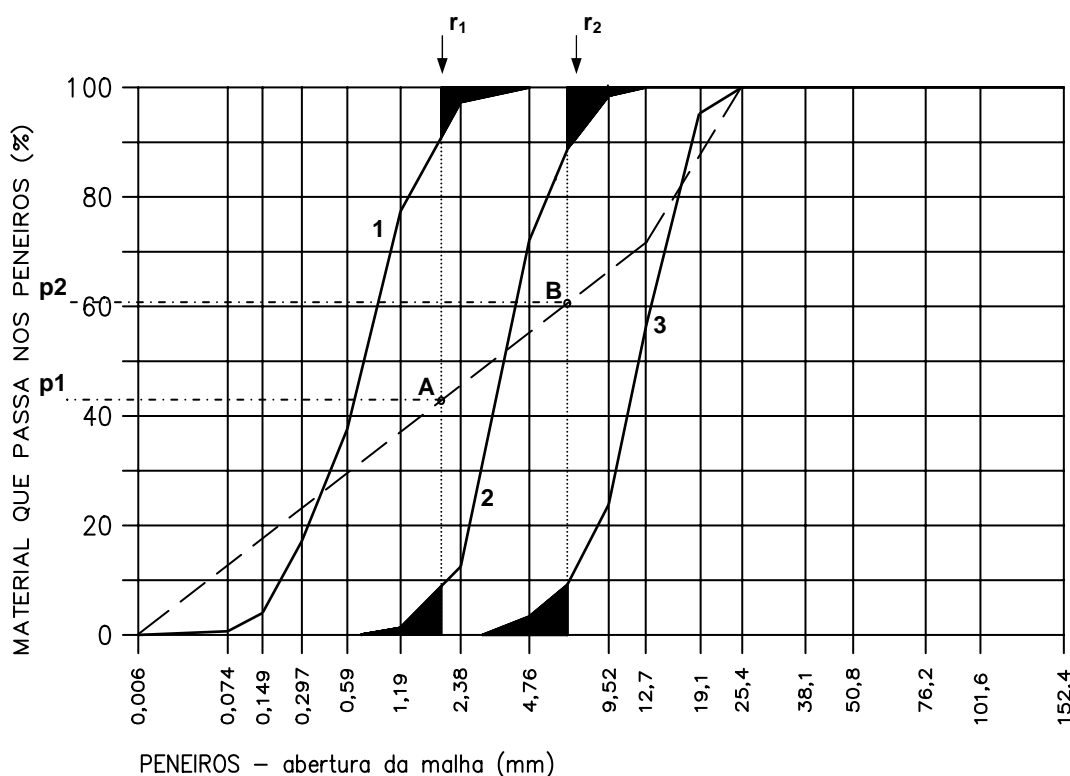
**Figura 4.7** – Aproximação da curva real à curva de referência (situação 3)

Na Figura 4.8 exemplifica-se o modo como se determinam as percentagens dos componentes sólidos relativamente ao volume do total das partículas sólidas do betão ( $V_s$ ). Note-se que a curva de referência inclui o cimento.

Da divisão das “áreas de influência”, efectuada do modo exemplificado anteriormente, resultam duas linhas verticais ( $r_1$ ) e ( $r_2$ ). A intercepção dessas linhas com a curva de referência conduz à determinação de dois pontos, os pontos (A) e (B), respectivamente. A projecção desses pontos, paralelamente ao eixo das abcissas, conduz às percentagens  $p_1$  e  $p_2$ , lidas no eixo das ordenadas.

As percentagens  $p_1$  e  $p_2$  têm o seguinte significado:

- i) ( $p_1\%$ ) é a soma das percentagens de cimento ( $C\%$ ) e do inerte 1 ( $I_1\%$ ). Se a percentagem de cimento é conhecida, então, será fácil determinar a percentagem do inerte 1 ( $I_1\%$ );
- ii) ( $p_2\% - p_1\%$ ) fornece a percentagem do inerte 2 ( $I_2\%$ );
- iii) ( $100\% - p_2\%$ ) corresponde à percentagem do inerte 3 ( $I_3\%$ ).



**Figura 4.8** – Determinação das percentagens dos componentes sólidos

#### 4.10.5 – Aproximação do módulo de finura da curva real ao módulo de finura da curva de referência.

A mistura dos inertes obtida pela construção geométrica não tem necessariamente o módulo de finura da curva de referência, pois a construção gráfica só tem em conta o início e o fim da curva granulométrica de cada inerte, ignorando o que se passa entre os extremos da curva. É, por isso, conveniente ajustar as percentagens dos inertes assim determinadas ao módulo de finura da curva de referência. Para tal, será necessário determinar, antes de mais, o módulo de finura da curva real. O Quadro 4.6 permite resumir essas duas operações.

**Quadro 4.6** – Aproximação do módulo de finura da curva real ao módulo de finura da curva de referência

Inerte	Inicial			Acerto	
	$MF_i$	$I_i\%$	$MF_i \times I_i\% / 100$	$I'_i\%$	$MF_i \times I'_i\% / 100$
Areia					
Brita 1					
Brita 2					
...					
Brita n					
			$\Sigma$		$\Sigma$



Notas:

- $I_i\%$  é a percentagem do volume das partículas do inerte i em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;
- $I'_i\%$  é a percentagem corrigida do volume das partículas do inerte i em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;
- $MF_i$  é o módulo de finura do inerte i;

Na Coluna 1 inserem-se os módulos de finura de cada um dos inertes ( $MF_i$ ) e na Coluna 2 as respectivas percentagens ( $I_i\%$ ), determinadas pela construção geométrica. O módulo de finura do cimento é nulo e, por isso, não consta no Quadro 4.6.

O módulo de finura da curva real do betão será então determinado na Coluna 3, traduzindo-se pelo somatório do produto do módulo de finura de cada inerte (Coluna 1) pela percentagem com que este entra na mistura (Coluna 2) dividida por 100.

Se o resultado final assim obtido ( $MF_{\text{real}}$ ) coincidir com o módulo de finura da curva de referência ( $MF_{\text{ref}}$ ), determinado pelo procedimento descrito na Secção 4.10.3, ou se for muito próximo deste, não será necessária qualquer correcção e as percentagens obtidas serão as percentagens finais. Caso contrário, se for registada uma diferença significativa, terá que proceder-se à correcção das percentagens dos inertes. Para tal deverão introduzir-se na Coluna 4 as alterações relativas das percentagens, tendo em conta que o somatório dessas percentagens deverá manter-se constante, ou seja, deverá ser igual ao da Coluna 2. O módulo de finura da curva real corrigido será determinado na Coluna 5, traduzindo-se pelo somatório do produto do módulo de finura de cada inerte (Coluna 1) pela percentagem corrigida (Coluna 4) dividida por 100. Se o resultado agora obtido coincidir com o módulo de finura da curva de referência ( $MF_{\text{real}} \cong MF_{\text{ref}}$ ), as percentagens corrigidas (Coluna 4) serão as percentagens finais.

Refira-se que as alterações introduzidas na Coluna 4 deverão ser proporcionais às percentagens inicialmente determinadas (Coluna 2) ou, se a diferença não for muito grande, poderá actuar-se apenas nas percentagens dos inertes extremos (isto é, no mais grosso e no mais fino). Assim, há a certeza de se obter uma mistura com a trabalhabilidade imposta quando se estabeleceu a curva de referência.

#### **4.10.6 – Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual**

A aproximação da curva real à curva de referência poderá ser investigada desenhando-se no mesmo gráfico ambas curvas granulométricas. O traçado da curva de referência é já conhecido, e as percentagens de material que passa em cada peneiro podem ser inferidas directamente do gráfico desenhado previamente na Secção 4.10.2.

A curva real, por outro lado, depende das percentagens com que cada material sólido entra na mistura. Em consequência, a percentagem de material que passa em cada peneiro ( $P_i\%$ ) será proporcional a essas quantidades.

De modo a facilitar a determinação da curva granulométrica real propõe-se a utilização do Quadro 4.7. Nesse quadro são inscritas, da coluna 1 até à coluna n, as percentagens de material que passa em cada peneiro e para cada um dos materiais sólidos. A percentagem de passados da curva real (P<sub>j</sub>%) no peneiro j será inscrita na Coluna A e deverá ser determinada pela expressão:

$$P_j\% = \sum \frac{[(\% \text{ passados do sólido } i \text{ no peneiro } j) \times (\% \text{ do sólido } i \text{ na mistura})]}{100} \quad (4.14)$$

O erro médio percentual (E<sub>r</sub>%) é determinado pelo valor médio dos módulos das diferenças entre as percentagens de material passado da curva real e da curva de referência, inscritos na Coluna C.

**Quadro 4.7 – Comparação da curva real com a curva de referência**



Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem acumulada de material que passa nos peneiros (entre parêntesis a percentagem final com que entram na mistura)							
	Cimento (C%)	Inerte 1 (I <sub>1</sub> %)	Inerte 2 (I <sub>2</sub> %)	....	Inerte n (I <sub>n</sub> %)	Curva real (100 %)	Curva de referência (100 %)	Erro percentual por peneiro
---						---		
---						---		
38,10						P <sub>1</sub> %		
25,40						P <sub>2</sub> %		
19,10						P <sub>3</sub> %		
12,70						P <sub>4</sub> %		
9,52						P <sub>5</sub> %		
4,76						P <sub>6</sub> %		
2,38						P <sub>7</sub> %		
1,190						P <sub>8</sub> %		
0,590						P <sub>9</sub> %		
0,297						P <sub>10</sub> %		
0,149						P <sub>11</sub> %		
0,074						P <sub>12</sub> %		
<b>Erro médio percentual (E<sub>r</sub>%) =</b>								

#### 4.10.7 – Determinação das dosagens dos inertes da mistura, em massa

A dosagem em massa, com que cada inerte entra na mistura, é determinada da seguinte forma:

$$I_i = \frac{(I'_i \%) \times V_s}{100} \times \delta_i \quad (4.15)$$

Onde:

$I_i$  = dosagem (em massa) do inerte  $i$ , em kg por cada  $m^3$  de betão;

$\delta_i$  = massa volúmica do inerte  $i$ , em  $kg/m^3$ ;

$I'_i\%$  = percentagem final (corrigida) do volume das partículas do inerte  $i$  em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão ( $V_s$ );

$V_s$  = volume do total das partículas sólidas do betão, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;

#### 4.11 – Apresentação final da composição do betão

O resultado final do estudo da composição do betão é expresso em termos de dosagens necessárias para fabricar 1 metro cúbico de betão (após compactação). As quantidades dos diferentes elementos constituintes são, de modo geral, referidas da seguinte forma:

Inertes: a quantidade de cada inerte é referida à massa das partículas saturadas e com a superfície seca e deve ser indicada em kg;

Cimento: O cimento é expresso pela massa em kg;

Água: é expressa em litros;



## CAPÍTULO 5 – FLUXOGRAMAS DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FAURY

### 5.1 – Betões com componentes normais

#### FLUXOGRAMA N.º 1 (inertes, cimento e água)



##### I. Limitação da máxima dimensão do inerte mais grosso

###### I.1 – Efeito de parede

- Em peças correntes de betão armado, o efeito de parede não ocorre quando:

$$\frac{R}{D} > 0,75 \Leftrightarrow D < \frac{4}{3} \cdot R$$

Onde:

R é o raio médio do molde,  
D é a máxima dimensão do inerte.

- Quando se utilizam inertes com máxima dimensão não superior a 25,4 mm e não se conhece o projecto estrutural, poderá adoptar-se  $R/D=1$ .

###### I.2 - Efeito de segregação

###### I.2.1 - Segundo Faury

- O efeito de segregação não se dá quando:

$$\begin{aligned} D &< 1,2 \cdot \rho && \text{para inertes britados,} \\ D &< 1,4 \cdot \rho && \text{para inertes rolados.} \end{aligned}$$

Onde:

$\rho$  é raio médio da malha da armadura ou da fenda mais fechadas,  
D é a máxima dimensão do inerte mais grosso.

###### I.2.2 – De acordo com a NP-ENV 206 [23]– Cláusula 5.4

- O efeito de segregação não se dá quando:

$$\begin{aligned} D &\leq 1/4 \text{ da menor dimensão do elemento estrutural;} \\ D &\leq \text{distância livre entre armaduras menos 5 mm;} \\ D &\leq 1,3 \times \text{recobrimento (excepto para a classe de exposição 1).} \end{aligned}$$



##### II – Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão para o estudo da composição

- O valor médio da tensão de rotura é determinado por estimativa a partir do valor característico que define a classe de resistência do betão (veja-se a Secção 3.1.5);
- O parâmetro ( $\lambda$ ), quando necessário, deve ser determinado em função do plano de amostragem previsto para a verificação da conformidade do betão (Cláusula 11.3.5.4 da NP\_ ENV206 [23]);
- Os parâmetros ( $S_n$ ) ou ( $cv$ ), quando necessários, devem ser arbitrados tendo em consideração o nível médio de resistência do betão e o nível de controle de produção previstos (veja-se a Figura 3.1 e os Quadros 3.5, 3.6 e 3.7).





### III – Razão A/C máxima

- Estimativa do valor da razão A/C para obtenção da resistência média pretendida (veja-se a Figura 4.3);
- Verificação das disposições regulamentares impostas pela NP\_ENV206 [23] (Cláusula 5.3) quanto à razão A/C máxima (vejam-se os Quadros 3.14 e 3.15);
- Concluir acerca da razão A/C a utilizar.



### IV – Estimativa do índice de vazios ( $I_v$ )

- Fórmula de Faury:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:

$I_v$  é o índice de vazios de Faury, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
K, K' são valores tabelados ( veja-se o Quadro 4.2);  
R é o raio médio do molde, em mm;  
D é a máxima dimensão do inerte mais grosso, em mm.

- Nota: no caso do betão simples  $R/D = \infty$



### V – Água de amassadura (A)

$$A = (I_v - V_v) \times 1000$$

Onde:

A – é a dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada  $m^3$  de betão;  
 $I_v$  - é o índice de vazios, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_v$  - é o volume de vazios, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão (consultar Quadro 4.1).



### VI - Dosagem de cimento (C)

- Estimativa da dosagem de cimento (C)

$$C = A / (\text{razão A/C})$$

Onde:

C – dosagem de cimento, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão.  
A – dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada  $m^3$  de betão.  
(razão A/C) – razão água/cimento em massa, adoptada anteriormente.

- Verificação das disposições regulamentares impostas pela NP\_ENV206 [23] (Cláusula 5.3) quanto à dosagem mínima de cimento (vejam-se os Quadros 3.14 e 3.15);
- Concluir acerca da dosagem de cimento a utilizar.



### VII – Volume das partículas de cimento ( $V_c$ )

$$V_c = \frac{C}{\delta_c}$$

Onde:

$V_c$  - volume das partículas de cimento, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $\delta_c$  - massa volúmica do cimento, em  $kg/m^3$ ;  
C - dosagem de cimento determinada no ponto anterior, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão.



↓

### VIII - Volume do total das partículas sólidas do betão ( $V_s$ )

$$V_s = 1 - I_v$$

Onde:

$V_s$  - é o volume do total das partículas sólidas do betão, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $I_v$  - é o índice de vazios de Faury, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;

↓

### IX - Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total (C%)

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100$$

Onde:

C% é a percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;  
 $V_c$  é o volume das partículas de cimento, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_s$  é o volume do total das partículas sólidas do betão, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.

↓

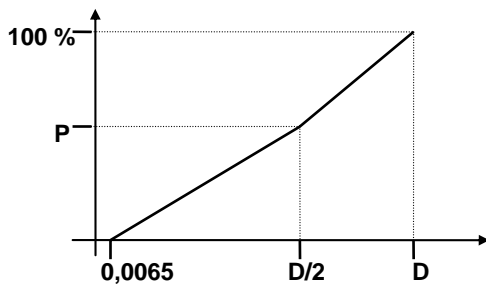
### X - Granulometria

- Curvas granulométricas → % passados versus abertura dos peneiros
- Módulos de finura dos inertes:

$$MF = \frac{\sum \text{Retidos acumulados nos peneiros } n^\circ (100) + (50) + (30) + (16) + (8) + (4) + (3/8)'' + (3/4)'' + (1,5)'' + (3)''}{100}$$

↓

### XI - Curva de referência de Faury



• A curva de referência de Faury depende das características dos materiais constituintes e do grau de consistência do betão (vejam-se os Quadros 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13)

$$P = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:

A, B - são valores tabelados (Quadro 4.4);  
R é o raio médio do molde, em mm;  
D é a máxima dimensão do inerte, em mm.

↓

### XII - Determinação das percentagens dos componentes sólidos

- Proceder ao ajustamento das curvas granulométricas dos inertes à curva de referência (veja-se a Secção 4.10.4)

↓

### XIII - Módulo de finura de Faury para curva de referência de Faury ( $MF_{ref}$ )

- O módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury ( $MF_{ref}$ ) é determinado por consulta do Quadro 4.5, uma vez conhecido o valor da máxima dimensão do inerte (D) e do parâmetro "a" determinado da seguinte forma:

$$a = A + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:

A, B, R e D têm o mesmo significado já definido no traçado da curva de referência



**XIV - Módulo de finura de Faury para a composição (MF<sub>real</sub>)**

- O módulo de finura de Faury para a composição (MF<sub>real</sub>) é proporcional à percentagem com que cada componente sólido (inerte) entra na mistura, e pode ser determinado pela expressão:

$$MF_{real} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^n (I_i \% \cdot MF_i)$$

Onde:

- I<sub>i</sub>% é a percentagem do volume das partículas do inerte i em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;
- MF<sub>i</sub> é o módulo de finura do inerte i;
- n é o número de inertes.

- Note-se que o módulo de finura do cimento é nulo.



**XV - Aproximação do módulo de finura da mistura ao módulo de finura da curva de referência.**

Inerte	Inicial			Acerto	
	MF <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> % / 100	I' <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I' <sub>i</sub> % / 100
Areia					
Brita 1					
Brita 2					
Brita 3					
			Σ		Σ



**XVI - Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual**

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem acumulada de material que passa nos peneiros (entre parêntesis a percentagem final com que entram na mistura)					Curva real (100 %)	Curva de referência (100 %)	Erro percentual por peneiro
	Cimento (C%)	Inerte 1 (I' <sub>1</sub> %)	Inerte 2 (I' <sub>2</sub> %)	....	Inerte n (I' <sub>n</sub> %)			
---								
38,10								
25,40								
19,10								
12,70								
9,52								
4,76								
2,38								
1,190								
0,590								
0,297								
0,149								
0,074								
<b>Erro médio percentual (E<sub>r</sub>%) =</b>								



**XVII - Massa de cada componente sólido**

- A massa de cada componente sólido (inerte) é determinada pela expressão:

$$I_i = \frac{I'_i \% \times V_s}{100} \times \delta_i$$

Onde:

- I'<sub>i</sub>% - percentagem final (corrigida) do volume das partículas do inerte i em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;
- V<sub>s</sub> - volume do total das partículas sólidas do betão, em m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de betão;
- δ<sub>i</sub> - massa volúmica do inerte i, em kg/m<sup>3</sup>.





**XVIII - Apresentação final da composição do betão para a produção de 1 metro cúbico de amassadura**

Areia =     xxx     kg  
Brita 1 =    xxx     kg  
Brita 2 =    xxx     kg  
  :  
  :  
Cimento =   xxx     kg  
Água =     xxx     litros

*Massa volúmica do betão fresco* =    xxxx     kg / m<sup>3</sup>



## 5.2 – Betões com adjuvantes redutores de água

### FLUXOGRAMA N.º 2

(inertes, cimento, água e adjuvante redutor de água)



#### I. Limitação da máxima dimensão do inerte mais grosso

##### I.1 – Efeito de parede

- Em peças correntes de betão armado, o efeito de parede não ocorre quando:

$$\frac{R}{D} > 0,75 \Leftrightarrow D < \frac{4}{3} \cdot R$$

Onde:

R é o raio médio do molde,  
D é a máxima dimensão do inerte.

- Quando se utilizam inertes com máxima dimensão não superior a 25,4 mm e não se conhece o projecto estrutural, poderá adoptar-se  $R/D=1$ .

##### I.2 - Efeito de segregação

###### I.2.1 - Segundo Faury

- O efeito de segregação não se dá quando:

$$\begin{aligned} D < 1,2 \cdot \rho & \text{ para inertes britados,} \\ D < 1,4 \cdot \rho & \text{ para inertes rolados.} \end{aligned}$$

Onde:

$\rho$  é raio médio da malha da armadura ou da fenda mais fechadas,  
D é a máxima dimensão do inerte mais grosso.

###### I.2.2 – De acordo com a NP-ENV 206 [23]– Cláusula 5.4

- O efeito de segregação não se dá quando:

$$\begin{aligned} D &\leq 1/4 \text{ da menor dimensão do elemento estrutural;} \\ D &\leq \text{distância livre entre armaduras menos 5 mm;} \\ D &\leq 1,3 \times \text{recobrimento (excepto para a classe de exposição 1).} \end{aligned}$$



#### II – Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão para o estudo da composição

- O valor médio da tensão de rotura é determinado por estimativa a partir do valor característico que define a classe de resistência do betão (veja-se a Secção 3.1.5);
- O parâmetro ( $\lambda$ ), quando necessário, deve ser determinado em função do plano de amostragem previsto para a verificação da conformidade do betão (Cláusula 11.3.5.4 da NP\_ ENV206 [23]);
- Os parâmetros ( $S_n$ ) ou ( $cv$ ), quando necessários, devem ser arbitrados tendo em consideração o nível médio de resistência do betão e o nível de controle de produção previstos (veja-se a Figura 3.1 e os Quadros 3.5, 3.6 e 3.7).





### III – Razão A/C máxima

- Estimativa do valor da razão A/C para obtenção da resistência média pretendida (veja-se a Figura 4.2);
- Verificação das disposições regulamentares impostas pela NP\_ENV206 [23] (Cláusula 5.3) quanto à razão A/C máxima (veja-se os Quadros 3.14 e 3.15);
- Concluir acerca da razão A/C.



### IV – Estimativa do índice de vazios ( $I_v$ )

- Fórmula de Faury:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:

$I_v$  é o índice de vazios de Faury, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $K, K'$  são valores tabelados ( veja-se o Quadro 4.2);  
 $R$  é o raio médio do molde, em mm;  
 $D$  é a máxima dimensão do inerte mais grosso, em mm.

- Nota: no caso do betão simples  $R/D = \infty$



### V – Água de amassadura (A)

$$A = (I_v - V_v) \times 1000$$

Onde:

$A$  – é a dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada  $m^3$  de betão;  
 $I_v$  - é o índice de vazios, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_v$  - é o volume de vazios, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão (consultar Quadro 4.1).



### VI – Dosagem de adjuvante ( $A_e$ ) e redução da água de amassadura

- A determinação da percentagem de redução de água de amassadura ( $R_a\%$ ) proporcionada por uma determinada dosagem de adjuvante redutor de água de amassadura (expressa em litros ou kg por cada kg de cimento) deverá basear-se em estudos prévios;
- A dosagem de adjuvante ( $A_e$ ) será, de acordo com o critério adoptado no presente fluxograma, proporcional à dosagem de cimento;
- A nova dosagem de água de amassadura ( $A'$ ) será determinada pela expressão:

$$A' = A \cdot (1 - R_a\% / 100)$$

Onde:

$A'$  - é a nova dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada  $m^3$  de betão,  
 $A$  - é a quantidade de água em litros por cada  $m^3$  de betão determinada no ponto anterior,  
 $R_a\%$  - é a percentagem de redução de água proporcionada pelo adjuvante (reductor de água).



### VII – Correção do índice de vazios ( $I'_v$ )

- O novo valor do índice de vazios ( $I'_v$ ) é dado pela expressão:

$$I'_v = A' + V_v$$

Onde:

$A'$  é a nova dosagem de água de amassadura, expressa em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_v$  é o volume de vazios previamente determinado, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.

- Foi desprezado o acréscimo do índice de vazios devido à eventual adição de adjuvante líquido.





### VIII - Dosagem de cimento (C)

- Estimativa da dosagem de cimento (C)

$$C = A' / (\text{razão A/C})$$

Onde:

C – dosagem de cimento, expressa em kg por cada m<sup>3</sup> de betão.  
 A' – nova dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada m<sup>3</sup> de betão.  
 (razão A/C) – razão água/cimento em massa, adoptada anteriormente.

- Verificação das disposições regulamentares impostas pela NP\_ENV206 [23] (Cláusula 5.3) quanto à dosagem mínima de cimento (vejam-se os Quadros 3.14 e 3.15);
- Concluir acerca da dosagem de cimento a utilizar.



### IX – Volume das partículas de cimento (V<sub>c</sub>)

$$V_c = \frac{C}{\delta_c}$$

Onde:

V<sub>c</sub> - volume das partículas de cimento, expresso em m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de betão;  
 δ<sub>c</sub> - massa volúmica do cimento, em kg/m<sup>3</sup>;  
 C - dosagem de cimento determinada no ponto anterior, expressa em kg por cada m<sup>3</sup> de betão.



### X - Volume do total das partículas sólidas do betão (V<sub>s</sub>)

$$V_s = 1 - I'_v$$

Onde:

V<sub>s</sub> - é o volume do total das partículas sólidas do betão, em m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de betão;  
 I'<sub>v</sub> - é o índice de vazios de Faury corrigido, expresso em m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de betão;



### XI - Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total (C%)

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100$$

Onde:

C% é a percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;  
 V<sub>c</sub> é o volume das partículas de cimento, expresso em m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de betão;  
 V<sub>s</sub> é o volume do total das partículas sólidas do betão, em m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de betão.



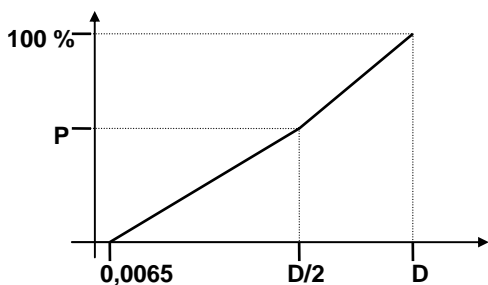
### XII – Granulometria

- Curvas granulométricas → % passados versus abertura dos peneiros
- Módulos de finura dos inertes:

$$MF = \frac{\sum \text{Retidos acumulados nos peneiros } n^\circ (100) + (50) + (30) + (16) + (8) + (4) + (3/8)'' + (3/4)'' + (1,5)'' + (3)''}{100}$$



**XIII - Curva de referência de Faury**



• A curva de referência de Faury depende das características dos materiais constituintes e do grau de consistência do betão (vejam-se os Quadros 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13)

$$P = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:  
 A, B – são valores tabelados (Quadro 4.4);  
 R é o raio médio do molde, em mm;  
 D é a máxima dimensão do inerte, em mm.

**XIV – Determinação das percentagens dos componentes sólidos**

• Proceder ao ajustamento das curvas granulométricas dos inertes à curva de referência (veja-se a Secção 4.10.4).

**XV - Módulo de finura de Faury para curva de referência de Faury (MF<sub>ref</sub>)**

• O módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury (MF<sub>ref</sub>) é determinado por consulta do Quadro 4.5, uma vez conhecido o valor da máxima dimensão do inerte (D) e do parâmetro “a” determinado da seguinte forma:

$$a = A + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:  
 A, B, R e D têm o mesmo significado já definido no traçado da curva de referência

**XVI - Modulo de finura de Faury para a composição (MF<sub>real</sub>)**

• O módulo de finura de Faury para a composição (MF<sub>real</sub>) é proporcional à percentagem com que cada componente sólido (inerte) entra na mistura, e pode ser determinado pela expressão:

$$MF_{real} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^n (I_i\% \cdot MF_i)$$

Onde:  
 I<sub>i</sub>% é a percentagem do volume das partículas do inerte i em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;  
 MF<sub>i</sub> é o módulo de finura do inerte i;  
 n é o numero de inertes.

• Note-se que o módulo de finura do cimento é nulo.

**XVII – Aproximação do módulo de finura da mistura ao módulo de finura da curva de referência.**

Inerte	Inicial			Acerto	
	MF <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> % / 100	I' <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I' <sub>i</sub> % / 100
Areia					
Brita 1					
Brita 2					
Brita 3					
			Σ		Σ



**XVIII - Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual**

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem acumulada de material que passa nos peneiros (entre parêntesis a percentagem final com que entram na mistura)							
	Cimento (C%)	Inerte 1 (I <sub>1</sub> %)	Inerte 2 (I <sub>2</sub> %)	....	Inerte n (I <sub>n</sub> %)	Curva real (100 %)	Curva de referência (100 %)	Erro percentual por peneiro
---								
38,10								
25,40								
19,10								
12,70								
9,52								
4,76								
2,38								
1,190								
0,590								
0,297								
0,149								
0,074								
<b>Erro médio percentual (E<sub>r</sub>%) =</b>								



**XIX - Massa de cada componente sólido**

• A massa de cada componente sólido (inerte) é determinada pela expressão:

$$I_i = \frac{I'_i \% \times V_s}{100} \times \delta_i$$

Onde:

- I'<sub>i</sub>% - percentagem final (corrigida) do volume das partículas do inerte i em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;
- V<sub>s</sub> - volume do total das partículas sólidas do betão, em m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de betão;
- δ<sub>i</sub> - massa volúmica do inerte i, em kg/m<sup>3</sup>.



**XX - Apresentação final da composição do betão para a produção de 1 metro cúbico de amassadura**

- Areia = xxx kg
- Brita 1 = xxx kg
- Brita 2 = xxx kg
- ⋮
- ⋮
- Cimento = xxx kg
- Água = xxx litros
- Adjuvante = xxx litros ou kg

Massa volúmica do betão fresco = xxxx kg / m<sup>3</sup>



## 5.3 – Betões com aditivos e adjuvantes redutores de água

### FLUXOGRAMA N.º 3

(inertes, cimento, aditivo, água e adjuvante redutor de água)



#### I. Limitação da máxima dimensão do inerte mais grosso

##### I.1 – Efeito de parede

- Em peças correntes de betão armado, o efeito de parede não ocorre quando:

$$\frac{R}{D} > 0,75 \Leftrightarrow D < \frac{4}{3} \cdot R$$

Onde:

R é o raio médio do molde,  
D é a máxima dimensão do inerte.

- Quando se utilizam inertes com máxima dimensão não superior a 25,4 mm e não se conhece o projecto estrutural, poderá adoptar-se  $R/D=1$ .

##### I.2 - Efeito de segregação

###### I.2.1 - Segundo Faury

- O efeito de segregação não se dá quando:

$$\begin{aligned} D &< 1,2 \cdot \rho && \text{para inertes britados,} \\ D &< 1,4 \cdot \rho && \text{para inertes rolados.} \end{aligned}$$

Onde:

$\rho$  é raio médio da malha da armadura ou da fenda mais fechadas,  
D é a máxima dimensão do inerte mais grosso.

###### I.2.2 – De acordo com a NP-ENV 206 [23]– Cláusula 5.4

- O efeito de segregação não se dá quando:

$$\begin{aligned} D &\leq 1/4 \text{ da menor dimensão do elemento estrutural;} \\ D &\leq \text{distância livre entre armaduras menos 5 mm;} \\ D &\leq 1,3 \times \text{recobrimento (excepto para a classe de exposição 1).} \end{aligned}$$



#### II – Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão para o estudo da composição

- O valor médio da tensão de rotura é determinado por estimativa a partir do valor característico que define a classe de resistência do betão (veja-se a Secção 3.1.5);
- O parâmetro ( $\lambda$ ), quando necessário, deve ser determinado em função do plano de amostragem previsto para a verificação da conformidade do betão (Cláusula 11.3.5.4 da NP\_ ENV206 [23]);
- Os parâmetros ( $S_n$ ) ou ( $cv$ ), quando necessários, devem ser arbitrados tendo em consideração o nível médio de resistência do betão e o nível de controle de produção previstos (veja-se a Figura 3.1 e os Quadros 3.5, 3.6 e 3.7).





### III – Razão (A/L) e razão (A/C) máximas

- Estimativa do valor da razão A/L para obtenção da resistência média pretendida (veja-se a Figura 4.2);
- Determinação da razão A/C a partir da razão A/L:

$$(\text{razão A/C}) = (\text{razão A/L}) / (1 - A_{o/L}\% / 100)$$

Onde:

Razão A/C - é a razão água/cimento, em massa;  
Razão A/L - é a razão água/(material cimentício), em massa;  
 $A_{o/L}\%$  - é a percentagem de aditivo em relação à massa total de material cimentício.

- Verificação das disposições regulamentares impostas pela NP\_ENV206 [23] (Cláusula 5.3) quanto à razão A/C máxima (vejam-se os Quadros 3.14 e 3.15);
- Concluir acerca da razão A/C e da razão A/L a utilizar.



### IV – Estimativa do índice de vazios ( $I_v$ )

- Fórmula de Faury:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:

$I_v$  é o índice de vazios de Faury, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
K, K' são valores tabelados ( veja-se o Quadro 4.2);  
R é o raio médio do molde, em mm;  
D é a máxima dimensão do inerte mais grosso, em mm.

- Nota: no caso do betão simples  $R/D = \infty$



### V – Água de amassadura (A)

$$A = (I_v - V_v) \times 1000$$

Onde:

A - é a dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada  $m^3$  de betão;  
 $I_v$  - é o índice de vazios, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_v$  - é o volume de vazios, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão (consultar Quadro 4.1).



### VI – Dosagem de adjuvante ( $A_e$ ) e redução da água de amassadura

- A determinação da percentagem de redução de água de amassadura ( $R_a\%$ ) proporcionada por uma determinada dosagem de adjuvante redutor de água de amassadura (expressa em litros ou kg por cada kg de cimento ou de materiais cimentícios) deverá basear-se em estudos prévios;
- A dosagem de adjuvante ( $A_e$ ) será, de acordo com o critério adoptado no presente fluxograma, proporcional à dosagem de material cimentício;
- A nova dosagem de água de amassadura ( $A'$ ) será determinada pela expressão:

$$A' = A \cdot (1 - R_a\% / 100)$$

Onde:

$A'$  - é a nova dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada  $m^3$  de betão,  
A - é a quantidade de água em litros por cada  $m^3$  de betão determinada no ponto anterior,  
 $R_a\%$  - é a percentagem de redução de água proporcionada pelo adjuvante (reductor de água).





#### VII – Correção do índice de vazios ( $I'_v$ )

- O novo valor do índice de vazios ( $I'_v$ ) é dado pela expressão:

$$I'_v = A' + V_v$$

Onde:

$A'$  é a nova dosagem de água de amassadura, expressa em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_v$  é o volume de vazios previamente determinado, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.

- Foi desprezado o acréscimo do índice de vazios devido à eventual adição de adjuvante líquido.



#### VIII - Dosagem de material cimentício (L)

- Estimativa da dosagem de material cimentício (L)

$$L = A' / (\text{razão } A/L)$$

Onde:

L – dosagem de material cimentício, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão.  
 $A'$  – nova dosagem de água de amassadura, expressa em litros por cada  $m^3$  de betão.  
(razão A/L) – razão água/(material cimentício) em massa, adoptada anteriormente.



#### IX - Dosagem de aditivo ( $A_o$ )

- A dosagem de aditivo em massa ( $A_o$ ) é normalmente expressa em percentagem da massa total de material cimentício ( $A_{o/L}\%$ );
- A dosagem de aditivo em massa é determinada por:

$$A_o = L \cdot A_{o/L}\% / 100$$

Onde:

$A_o$  – dosagem de aditivo, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão;  
L - dosagem de material cimentício, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão;  
 $A_{o/L}\%$  - Percentagem de aditivo em relação à massa total de material cimentício.



#### X - Dosagem de cimento (C)

- Estimativa da dosagem de cimento (C):

$$C = L - A_o$$

Onde:

C - dosagem de cimento, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão;  
L - dosagem de materiais cimentícios, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão;  
 $A_o$  - dosagem de aditivo, expressa em kg por cada  $m^3$  de betão.

- Verificação das disposições regulamentares impostas pela NP\_ENV206 [23] (Cláusula 5.3) quanto à dosagem mínima de cimento (vejam-se os Quadros 3.14 e 3.15);
- Concluir acerca da dosagem de cimento (C) a utilizar.



**XI – Volume das partículas de cimento ( $V_c$ )**

$$V_c = \frac{C}{\delta_c}$$

Onde:

$V_c$  - volume das partículas de cimento, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $\delta_c$  - massa volúmica do cimento, em  $kg/m^3$ ;  
 $C$  - dosagem de cimento determinada no ponto anterior, expressa em  $kg$  por cada  $m^3$  de betão.

**XII – Volume das partículas de aditivo ( $V_o$ )**

$$V_o = A_o / \delta_o$$

Onde:

$V_o$  - volume das partículas de aditivo, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $A_o$  - dosagem de aditivo determinada no ponto anterior, expressa em  $kg$  por cada  $m^3$  de betão  
 $\delta_o$  - massa volúmica do aditivo em  $kg/m^3$ ;

**XIII – Volume do total das partículas de material cimentício ( $V_L$ )**

$$V_L = V_c + V_o$$

Onde:

$V_L$  - volume do total das partículas de material cimentício, em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_c$  - volume das partículas de cimento, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_o$  - volume das partículas de aditivo, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.

**XIV - Volume do total das partículas sólidas do betão ( $V_s$ )**

$$V_s = 1 - I'_v$$

Onde:

$V_s$  - é o volume do total das partículas sólidas do betão, em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $I'_v$  - é o índice de vazios de Faury corrigido, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;

**XV - Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total ( $C\%$ )**

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100$$

Onde:

$C\%$  é a percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;  
 $V_c$  é o volume das partículas de cimento, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_s$  é o volume do total das partículas sólidas do betão, em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.

**XVI - Percentagem do volume de aditivo em relação ao volume sólido total ( $A_o\%$ )**

$$A_o\% = \frac{V_o}{V_s} \times 100$$

Onde:

$A_o\%$  é a percentagem do volume das partículas de aditivo em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;  
 $V_o$  é o volume das partículas de aditivo, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;  
 $V_s$  é o volume do total das partículas sólidas do betão, em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.



↓

**XVII - Percentagem do volume de material cimentício em relação ao volume sólido total (L%)**

$$L\% = \frac{V_L}{V_s} \times 100$$

Onde:

L% é a percentagem do volume do total das partículas de material cimentício em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;

$V_L$  é o volume do total das partículas de material cimentício, em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;

$V_s$  é o volume do total das partículas sólidas do betão, em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão.

↓

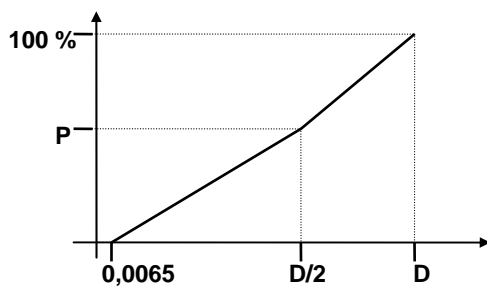
**XVIII – Granulometria**

- Curvas granulométricas → % passados versus abertura dos peneiros
- Módulos de finura dos inertes:

$$MF = \frac{\sum \text{Retidos acumulados nos peneiros } n^\circ (100) + (50) + (30) + (16) + (8) + (4) + (3/8)'' + (3/4)'' + (1,5)'' + (3)''}{100}$$

↓

**XIX - Curva de referência de Faury**



- A curva de referência de Faury depende das características dos materiais constituintes e do grau de consistência do betão (vejam-se os Quadros 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13)

$$P = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:

A, B – são valores tabelados (Quadro 4.4);

R é o raio médio do molde, em mm;

D é a máxima dimensão do inerte, em mm.

↓

**XX – Determinação das percentagens dos componentes sólidos**

- Proceder ao ajustamento das curvas granulométricas dos inertes à curva de referência (veja-se a Secção 4.10.4).

↓

**XXI - Módulo de finura de Faury para curva de referência de Faury ( $MF_{ref}$ )**

- O módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury ( $MF_{ref}$ ) é determinado por consulta do Quadro 4.5, uma vez conhecido o valor da máxima dimensão do inerte (D) e do parâmetro “a” determinado da seguinte forma:

$$a = A + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Onde:

A, B, R e D têm o mesmo significado já definido no traçado da curva de referência



**XXII - Módulo de finura de Faury para a composição (MF<sub>real</sub>)**

- O módulo de finura de Faury para a composição (MF<sub>real</sub>) é proporcional à percentagem com que cada componente sólido (inerte) entra na mistura, e pode ser determinado pela expressão:

$$MF_{real} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^n (I_i\% \cdot MF_i)$$

Onde:

- I<sub>i</sub>% é a percentagem do volume das partículas do inerte i em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;
- MF<sub>i</sub> é o módulo de finura do inerte i;
- n é o numero de inertes.

- Note-se que o módulo de finura dos materiais cimentíceos é nulo.



**XXIII - Aproximação do módulo de finura da mistura ao módulo de finura da curva de referência.**

Inerte	Inicial			Acerto	
	MF <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I <sub>i</sub> % / 100	I' <sub>i</sub> %	MF <sub>i</sub> x I' <sub>i</sub> % / 100
Areia					
Brita 1					
Brita 2					
Brita 3					
			Σ		Σ



**XXIV - Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual**

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem acumulada de material que passa nos peneiros (entre parêntesis a percentagem final com que entram na mistura)						Curva real (100 %)	Curva de referência (100 %)	Erro percentual por peneiro
	Cimento (C%)	Aditivo (A <sub>o</sub> %)	Inerte 1 (I' <sub>1</sub> %)	Inerte 2 (I' <sub>2</sub> %)	....	Inerte n (I' <sub>n</sub> %)			
---									
38,10									
25,40									
19,10									
12,70									
9,52									
4,76									
2,38									
1,190									
0,590									
0,297									
0,149									
0,074									
	<b>Erro médio percentual (E<sub>r</sub>%) =</b>								



**XXV - Massa de cada componente sólido**

- A massa de cada componente sólido (inerte) é determinada pela expressão:

$$I_i = \frac{I'_i\% \times V_s}{100} \times \delta_i$$

Onde:

- I'<sub>i</sub>% - percentagem final (corrigida) do volume das partículas do inerte i em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;
- V<sub>s</sub> - volume do total das partículas sólidas do betão, em m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de betão;
- δ<sub>i</sub> - massa volúmica do inerte i, em kg/m<sup>3</sup>.





**XXVI - Apresentação final da composição do betão para a produção de 1 metro cúbico de amassadura**

Areia =	xxx	kg
Brita 1 =	xxx	kg
Brita 2 =	xxx	kg
:		
:		
Cimento =	xxx	kg
Aditivo =	xxx	kg
Água =	xxx	litros
Adjuvante =	xxx	litros ou kg
<i>Massa volúmica do betão fresco =</i>	<u>xxxx</u>	kg / m <sup>3</sup>



## **Segunda Parte**

### **EXEMPLOS PRÁTICOS**



## CAPÍTULO 6 – EXEMPLOS PRÁTICOS

### 6.1 – Exemplo prático n.º 1

#### 6.1.1 – Enunciado

Elabore o estudo da composição de um betão C30/37 para aplicar numa estrutura de betão armado sujeita a um ambiente húmido, sem gelo. A especificação do betão, os materiais disponíveis e as condições de fabrico são as que se apresentam a seguir:

**Normas:** NP\_ENV206.

**Betão:** C30/37.

**Aplicação:** Estrutura de betão armado.

**Classe de exposição:** Ambiente húmido, sem gelo.

**Local de fabrico:** Em estaleiro (obra).

**Medição dos componentes:** Componentes medidos em peso.

**Nível de controle da produção:** Bom.

**Plano de amostragem:** Colheita de 9 provetes em cada lote de betão.

**Trabalhabilidade (consistência):** Classe de Abaixamento S2.

**Meios de compactação:** Vibração mecânica normal (agulha vibratória).

**Notas:**

**Efeito de parede:** Desprezar e considerar ( $R/D = 1$ ).

**Efeito de segregação:** considerar que não ocorre para os inertes fornecidos.

**Materiais disponíveis:**

**Cimento:** Portland composto, tipo II, classe 32,5, classificado de acordo com a NP2064 [22]

(a ficha técnica do cimento é apresentada no Anexo A.2).

**Água:** Potável, obtida a partir da rede pública de abastecimento.

**Inertes:** As granulometrias, módulos de finura, massas volúmicas e outras características dos inertes são apresentadas no Anexo A.1.

**Inertes finos:** Areia natural rolada (do rio).

**Inertes grossos:** Britados de granito: brita1 e brita2.

## **6.1.2 – Resolução do exercício utilizando o Fluxograma n.º 1**

### **6.1.2.1 – Limitação da máxima dimensão do inerte mais grosso**

#### Efeito de parede

Será adoptada a relação R/D = 1, conforme definido nos dados essenciais de base

#### Efeito de segregação

De acordo com os dados fornecidos, não se prevê que ocorra o efeito de segregação quando se utilizam os inertes fornecidos.

### **6.1.2.2 – Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão para o estudo da composição**

O valor médio da tensão de rotura será determinado por estimativa a partir do valor característico da tensão de rotura à compressão do betão referida a provetes cúbicos de 150 mm de aresta, tal como previsto na Cláusula 11.3.5.4 da NP\_ENV206 [23].

Valores característicos da tensão de rotura à compressão para o betão em estudo:

Betão C30/37

$f_{ck,cub15} = 37 \text{ MPa}$  (cubos de 150 mm de aresta),

$f_{ck,cil} = 30 \text{ MPa}$  (cilindros  $\phi = 150 \text{ mm}$  e  $h = 300 \text{ mm}$ ).

A Cláusula 11.3.5.4 da NP\_ENV206 [23] acima referida determina, para o plano de amostragem previsto (9 provetes em cada lote), que a verificação da conformidade da tensão de rotura à compressão seja efectuada a partir das seguintes expressões:

$$\bar{X}_n \geq f_{ck,cub15} + \lambda \cdot S_n \quad (6.1)$$

$$X_{min} \geq f_{ck,cub15} - K \quad (6.2)$$

Sendo neste caso:

$$n = 9 \Rightarrow \lambda = 1,67 \text{ e } K = 3 \text{ (critério 1 da Cláusula 11.3.5.4)}$$

$$f_{ck,cub15} = 37 \text{ MPa,}$$

$$S_n \cong 4,4 \text{ MPa} \quad (\text{obtido por estimativa a partir do Quadro 3.6, admitindo que os componentes serão medidos em peso e que o nível de controle da produção será bom}).$$

Obtém-se:

$$\bar{X}_9 \geq 37 + 1,67 \cdot 4,4$$

$$X_{min} \geq 37 - 3$$

Ou seja:

$$\bar{X}_9 \geq 44,4 \text{ MPa}$$

$$X_{min} \geq 34 \text{ MPa}$$

### Conclusão

Será considerado um valor médio aproximado para a tensão de rotura potencial à compressão em provetes cúbicos de 150 mm de aresta de  $f_{cm,cub15} \cong 45 \text{ MPa}$ .

### 6.1.2.3 – Razão A/C máxima

#### Em função da resistência

A obtenção de uma tensão de rotura média à compressão da ordem dos 45 MPa em cubos de 150 mm de aresta pressupõe, tendo em consideração o gráfico apresentado na Figura 4.3 e o tipo de materiais utilizados, uma razão A/C de aproximadamente 0,415.

Propõe-se a utilização da razão A/C = 0,41, o que provavelmente conduzirá a valores da resistência ligeiramente acima daqueles esperados.

#### Verificação das disposições regulamentares

A NP\_ENV206 [23] estabelece, na sua Cláusula 5.3, o valor máximo da razão A/C a adoptar em função da classe de exposição ambiental (requisitos de durabilidade).

A consulta dos Quadros 3.14 e 3.15 conduz aos seguintes parâmetros:

Classe de exposição = 2a) => Razão A/C máxima = 0,60

#### Conclusão

Adopta-se a Razão A/C = 0,41, considerando-se verificadas as disposições regulamentares a este respeito.

### 6.1.2.4 – Estimativa do índice de vazios ( $I_v$ )

Para a estimativa do índice de vazios será utilizada a fórmula proposta por Faury:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (6.3)$$

Sendo neste caso:

D = 25,4 mm,

R/D = 1,

K = 0,37; K' = 0,003 (Obtidos por consulta do Quadro 4.2, considerando-se a trabalhabilidade mole, areia rolada e inerte grosso britado)

De onde se obtém:

$$I_v = 0,206 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão}$$

#### 6.1.2.5 – Água de amassadura (A)

A dosagem de água de amassadura será estimada a partir do índice de vazios e do valor do volume de vazios, pela expressão:

$$A = (I_v - V_v) \times 1000 \quad (6.4)$$

Sendo:

$$I_v = 0,206 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão};$$

$$V_v = 0,015 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão (obtido por consulta do Quadro 4.1).}$$

De onde se conclui que:

$$A = (0,206 - 0,015) \times 1000$$

$$A = 191 \text{ litros por cada m}^3 \text{ de betão.}$$

#### 6.1.2.6 – Dosagem de cimento (C)

A dosagem de cimento será estimada a partir dos valores já conhecidos para a razão A/C e dosagem de água (A).

Assim, a dosagem de cimento (C) será dada por:

$$C = A / (\text{razão A/C}) \quad (6.5)$$

Onde:

$$A = 191 \text{ litros por cada m}^3 \text{ de betão};$$

$$\text{Razão A/C em massa} = 0,41;$$

Concluindo-se que:

$$C = 466 \text{ kg por cada m}^3 \text{ de betão}$$

### Verificação das disposições regulamentares

A NP\_ENV206 [23] estabelece, na sua Cláusula 5.3, a dosagem mínima de cimento a adoptar no fabrico do betão em função da classe de exposição ambiental (requisitos de durabilidade).

A consulta dos Quadros 3.14 e 3.15 conduz aos seguintes parâmetros:

Classe de exposição = 2a),

Dosagem mínima de cimento = 280 kg por cada m<sup>3</sup> de betão.

### Conclusão

A dosagem de cimento proposta para a obtenção do nível de resistência desejado respeita os requisitos mínimos estabelecidos pela NP\_ENV206 [23], pelo que se consideram cumpridas as disposições regulamentares a este respeito.

#### **6.1.2.7 – Volume das partículas de cimento (V<sub>c</sub>)**

O volume das partículas de cimento pode ser determinado pela expressão:

$$V_c = \frac{C}{\delta_c} \quad (6.6)$$

Onde:

C = 466 kg por cada m<sup>3</sup> de betão,

$\delta_c$  = 3050 kg/m<sup>3</sup>

Obtém-se, deste modo:

$$V_c = 0,1528 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão}$$

### 6.1.2.8 – Volume do total das partículas sólidas do betão ( $V_s$ )

O volume total das partículas sólidas do betão é dado por:

$$V_s = 1 - I_v \quad (6.7)$$

Onde:

$$I_v = 0,206 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão.}$$

De onde vem que:

$$V_s = 0,794 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão}$$

### 6.1.2.9 – Percentagem do volume de cimento em relação ao volume sólido total

A percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão é dado pela expressão:

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100 \quad (6.8)$$

Onde:

$$V_c = 0,1528 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão,}$$

$$V_s = 0,794 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão.}$$

De onde se conclui que:

$$C\% = 19,24 \%$$

### 6.1.2.10 – Curva de referência de Faury

A curva de referência de Faury é na realidade definida por dois segmentos de recta identificados por três pontos. As coordenadas desses pontos dependem do grau de consistência pretendido, dos meios disponíveis para trabalhar o betão e, certamente, do tipo de materiais inertes disponíveis. Assim, de acordo com Faury, esses pontos são definidos do seguinte modo:

$$\begin{aligned} \text{Ponto 1: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = 0,0065 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 0,0\% \end{cases} \\ \text{Ponto 2: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = D/2 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = P_{D/2} \% = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \end{cases} \quad (6.9) \\ \text{Ponto 3: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = D \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 100,0\% \end{cases} \end{aligned}$$

Sendo:

$$D = 25,4 \text{ mm} \Rightarrow D/2 = 12,7 \text{ mm};$$

$$R/D = 1;$$

$A = 30$ ;  $B = 2$  (Obtidos por consulta do Quadro 4.4, considerando-se a trabalhabilidade mole, areia rolada e inerte grosso britado)

Obtém-se:

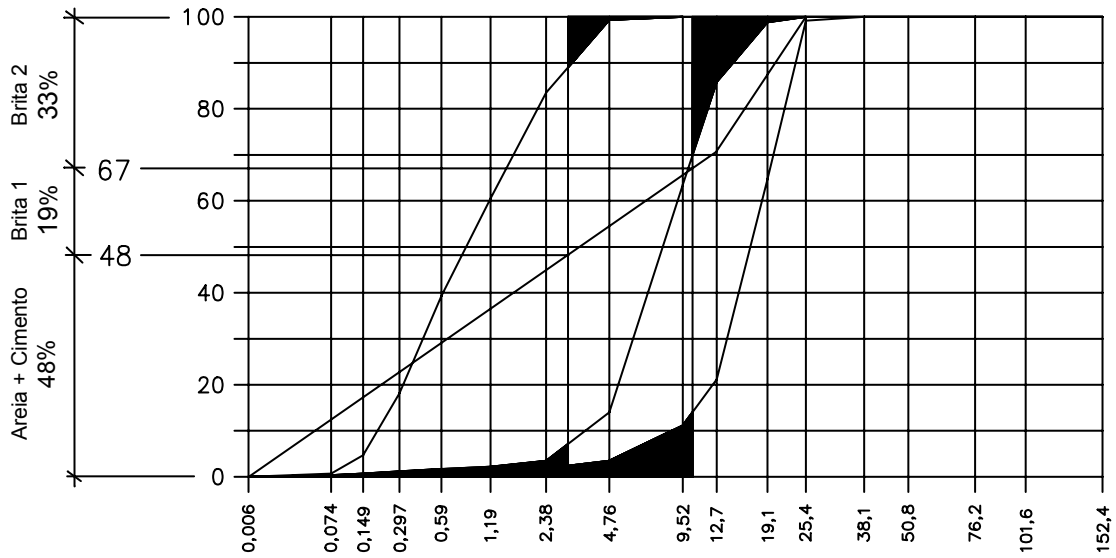
$$\text{Ponto 1: } \begin{cases} \text{Abcissa} = 0,0065 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 0,0\% \end{cases}$$

$$\text{Ponto 2: } \begin{cases} \text{Abcissa} = 12,7 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 70,47\% \end{cases}$$

$$\text{Ponto 3: } \begin{cases} \text{Abcissa} = 25,4 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 100,0\% \end{cases}$$

### 6.1.2.11 – Determinação das percentagens dos componentes sólidos

O ajustamento das curvas granulométricas dos inertes à curva de referência encontra-se desenhado no gráfico apresentado na Figura 6.1.



**Figura 6.1** – Ajustamento da curva granulométrica dos inertes à curva de ref. de Faury

As percentagens assim determinadas são apresentadas a seguir:

$$\text{Areia + Cimento} = 48\% \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Cimento} = 19,24\% \\ \text{Areia rolada} = 28,76\% \end{array} \right.$$

Brita 1 = 19 %

Brita 2 = 33 %

### 6.1.2.12 – Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury

O módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury ( $MF_{ref}$ ) será determinado por consulta do Quadro 4.5, em função da máxima dimensão do inerte (D) e do parâmetro “a”, determinado pela expressão:

$$a = A + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (6.10)$$

Onde:

$$D = 25,4 \text{ mm};$$

$$R/D = 1;$$

A = 30; B = 2 (Obtidos por consulta do Quadro 4.4, considerando-se a trabalhabilidade mole, areia rolada e inerte grosso britado)

Concluindo-se que:

$$a = 38 \text{ e } D = 25,4 \text{ mm.}$$

Assim, por consulta do Quadro 4.5 obtém-se:

$$MF_{ref} = 4,44$$

### 6.1.2.13 – Aproximação do módulo de finura da mistura ( $MF_{real}$ ) ao módulo de finura da curva de referência Faury ( $MF_{ref}$ )

O tratamento dos dados é feito no Quadro 6.1, que a seguir se apresenta:

**Quadro 6.1** – Aproximação da curva real do betão à curva de referência de Faury

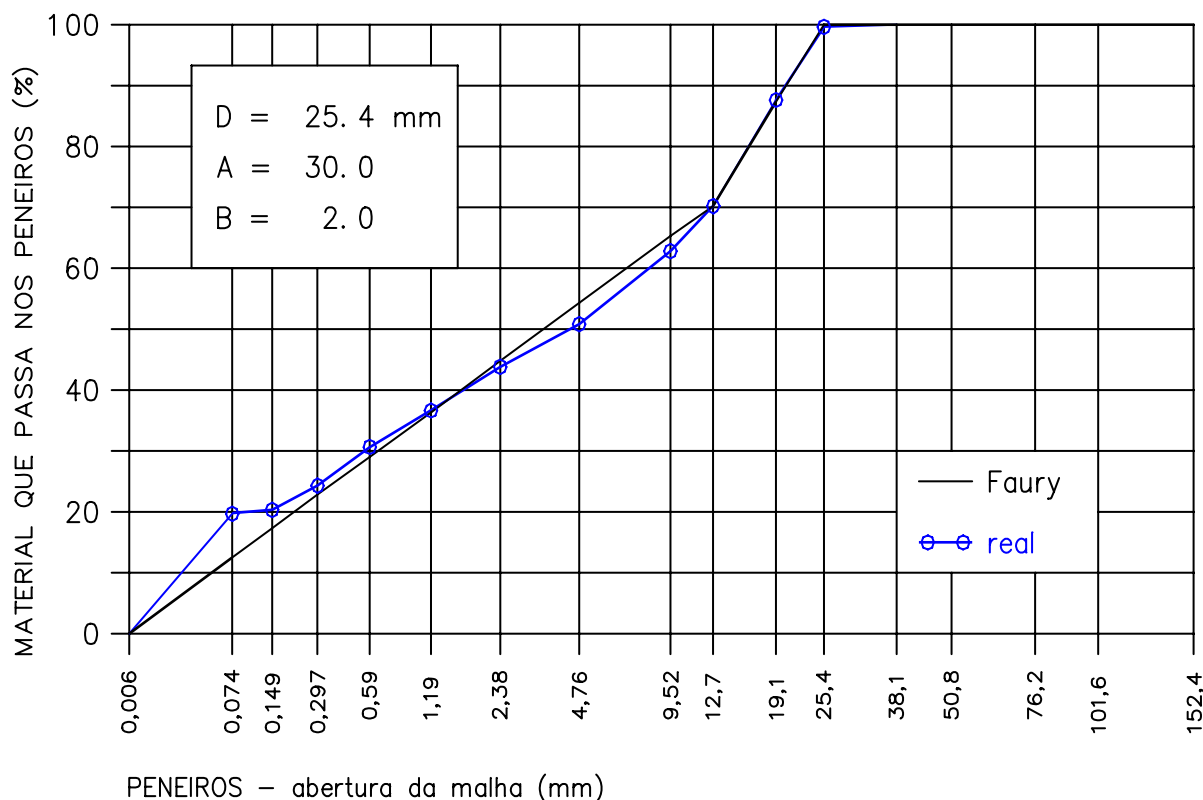
Inerte	Inicial			Acerto	
	$MF_i$	$I_i \%$	$MF_i \times I_i \% / 100$	$I'_i \%$	$MF_i \times I'_i \% / 100$
Areia	2,945	28,76	0,847	27,00	0,795
Brita 1	6,146	19,00	1,168	20,00	1,229
Brita 2	7,146	33,00	2,358	33,76	2,412
		$\Sigma$	<b>4,373</b>		$\Sigma$ <b>4,436 Ok!</b>

### 6.1.2.14 – Comparação da curva real com a curva de referência de Faury e determinação do erro médio percentual

O tratamento dos dados é feito no Quadro 6.2 e na Figura 6.2, tal como a seguir se apresenta:

**Quadro 6.2** - Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem acumulada de material que passa nos peneiros (entre parêntesis a percentagem final com que entram na mistura)				Curva real (100,00 %)	Curva de referência (100,00 %)	Erro percentual por peneiro
	Cimento (19,24 %)	Areia (27,00 %)	Brita 1 (20,00 %)	Brita 2 (33,76 %)			
25,40	100,00	100,00	100,00	99,10	99,70	100,00	0,30
19,10	100,00	100,00	98,86	64,62	87,83	87,36	0,47
12,70	100,00	100,00	85,90	21,13	70,55	70,47	0,19
9,52	100,00	100,00	63,45	11,15	62,69	65,41	2,72
4,76	100,00	99,31	13,92	3,49	50,02	54,37	4,35
2,38	100,00	83,53	3,43	1,86	43,11	44,77	1,66
1,190	100,00	60,51	2,21	1,52	36,53	36,40	0,13
0,590	100,00	39,37	1,66	1,24	30,62	29,04	1,58
0,297	100,00	18,13	1,17	0,91	24,68	22,77	1,91
0,149	100,00	4,64	0,74	0,60	20,84	17,28	3,56
0,074	100,00	0,63	0,39	0,29	19,59	12,43	7,16
<b>Erro médio percentual (E,%) =</b>							<b>2,18 %</b>



**Figura 6.2** – Representação gráfica da curva real e da curva de referência de Faury

### 6.1.2.15 – Massa de cada componente sólido

A massa de cada componente sólido inerte é determinada pela expressão:

$$I_i = \frac{I'_i \% \times V_s}{100} \times \delta_i \quad (6.11)$$

Onde:

- $I'_i$  (%) - percentagem final (corrigida) do volume das partículas do inerte  $i$  em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;
- $V_s$  - volume do total das partículas sólidas do betão, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;
- $\delta_i$  - massa volúmica do inerte  $i$ , em  $kg/m^3$ .

Assim sendo, obtém-se as seguintes quantidades:

$$\text{Areia} = \frac{27,00 \% \times 0,794}{100} \times 2395 \cong 513 \text{ kg por cada } m^3 \text{ de betão}$$

$$\text{Brita 1} = \frac{20,00 \% \times 0,794}{100} \times 2700 \cong 429 \text{ kg por cada } m^3 \text{ de betão}$$

$$\text{Brita 2} = \frac{33,76 \% \times 0,794}{100} \times 2700 \cong 724 \text{ kg por cada } m^3 \text{ de betão}$$

### 6.1.2.16 – Apresentação final da composição do betão

Componentes necessários para produzir 1 metro cúbico de betão:

Areia natural rolada =	513	kg
Brita 1 (granito britado) =	429	kg
Brita 2 (granito britado) =	724	kg
Cimento tipo II / 32,5 =	466	kg
Água =	<u>191</u>	litros

$$\text{Massa volúmica do betão fresco} = 2323 \text{ kg / } m^3$$

### 6.1.3 – Aplicação do programa de cálculo computacional “BECOMP”

#### LISTAGEM DO PROGRAMA DE CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES “BECOMP”

```
=====
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
Núcleo de Aglomerantes e Betões
=====
```

#### PROGRAMA BECOMP: Cálculo da composição de um betão

-----

BETÃO C30/37  
CLASSE DE ABAIXAMENTO S2  
EXEMPLO PRÁTICO N.º1

#### ENTRADA DE DADOS:

-----

Número de inertes : 3

Dosagem de cimento : 466.00 kg/m3

Dosagem de adjuvante : 0.00 ml/kg cimento

Dosagem de cinzas volantes : 0.00 kg/m3

Massas volúmicas (kg/m3):

AREIA ROLADA	:	2395.00
BRITA 1	:	2700.00
BRITA 2	:	2700.00
cimento	:	3050.00

Água de amassadura : 191.0 litros/m3

Volume de vazios : 15.0 litros/m3

Malha do primeiro peneiro que retém material : 25.400 mm

Granulometrias dos inertes (% que passa nos peneiros):

AREIA ROLADA - peneiro de 25.400 mm	:	100.00 %
peneiro de 19.100 mm	:	100.00 %
peneiro de 12.700 mm	:	100.00 %
peneiro de 9.520 mm	:	100.00 %
peneiro de 4.760 mm	:	99.31 %
peneiro de 2.380 mm	:	83.53 %
peneiro de 1.190 mm	:	60.51 %
peneiro de 0.590 mm	:	39.37 %
peneiro de 0.297 mm	:	18.13 %
peneiro de 0.149 mm	:	4.64 %
peneiro de 0.074 mm	:	0.63 %

BRITA 1	- peneiro de 25.400 mm	: 100.00 %
	peneiro de 19.100 mm	: 98.86 %
	peneiro de 12.700 mm	: 85.90 %
	peneiro de 9.520 mm	: 63.45 %
	peneiro de 4.760 mm	: 13.92 %
	peneiro de 2.380 mm	: 3.43 %
	peneiro de 1.190 mm	: 2.21 %
	peneiro de 0.590 mm	: 1.66 %
	peneiro de 0.297 mm	: 1.17 %
	peneiro de 0.149 mm	: 0.74 %
	peneiro de 0.074 mm	: 0.39 %
BRITA 2	- peneiro de 25.400 mm	: 99.10 %
	peneiro de 19.100 mm	: 64.62 %
	peneiro de 12.700 mm	: 21.13 %
	peneiro de 9.520 mm	: 11.15 %
	peneiro de 4.760 mm	: 3.49 %
	peneiro de 2.380 mm	: 1.86 %
	peneiro de 1.190 mm	: 1.52 %
	peneiro de 0.590 mm	: 1.24 %
	peneiro de 0.297 mm	: 0.91 %
	peneiro de 0.149 mm	: 0.60 %
	peneiro de 0.074 mm	: 0.29 %

Parâmetros da curva de Faury - A : 30.00  
B : 2.00

Raio médio do molde (R/D) : 1.00

#### RESULTADOS:

-----

Máxima dimensão do inerte arbitrada

Módulos de finura:

AREIA ROLADA	: 2.945
BRITA 1	: 6.146
BRITA 2	: 7.146

Máxima dimensão do betão : 25.400 mm

Módulo de finura da curva de Faury : 4.426

Percentagens:	AREIA ROLADA	: 27.40 %
	BRITA 1	: 19.37 %
	BRITA 2	: 33.98 %
	cimento	: 19.24 %

Dosagens por m3 de betão:	AREIA ROLADA	: 521.0 kg
	BRITA 1	: 415.3 kg
	BRITA 2	: 728.6 kg
	cimento	: 466.0 kg
	agua	: 191.0 litros

massa volúmica do betão : 2321.9 kg/m3

Relação água/ligante (a/c) : 0.410

Granulometria da curva de Faury:

ponto 1 : D = 0.0065 mm <---> Y = 0 %  
ponto 2 : D = 12.700 mm <---> Y = 70.47 %  
ponto 3 : D = 25.400 mm <---> Y = 100 %

Curva real do betão (comparação com a de Faury):

peneiro de 152.400 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 101.600 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 76.200 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 50.800 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 38.100 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 25.400 mm <--->	passa 99.69 %	(100.00 %)
peneiro de 19.100 mm <--->	passa 87.76 %	( 87.36 %)
peneiro de 12.700 mm <--->	passa 70.47 %	( 70.47 %)
peneiro de 9.520 mm <--->	passa 62.72 %	( 65.41 %)
peneiro de 4.760 mm <--->	passa 50.34 %	( 54.37 %)
peneiro de 2.380 mm <--->	passa 43.43 %	( 44.77 %)
peneiro de 1.190 mm <--->	passa 36.77 %	( 36.40 %)
peneiro de 0.590 mm <--->	passa 30.77 %	( 29.04 %)
peneiro de 0.297 mm <--->	passa 24.75 %	( 22.77 %)
peneiro de 0.149 mm <--->	passa 20.86 %	( 17.28 %)
peneiro de 0.074 mm <--->	passa 19.59 %	( 12.43 %)

Erro médio por peneiro da solução obtida : 2.05 %

Dosagens para uma amassadura de 30.0 litros:

AREIA ROLADA :	15.63 kg
BRITA 1 :	12.46 kg
BRITA 2 :	21.86 kg
cimento :	13.98 kg
agua :	5.73 litros

massa total da amassadura : 69.66 kg

Correcções na amassadura real (+/-) :

cimento .....	kg
agua .....	litros

Abaixamento do cone de Abrams .....

cm

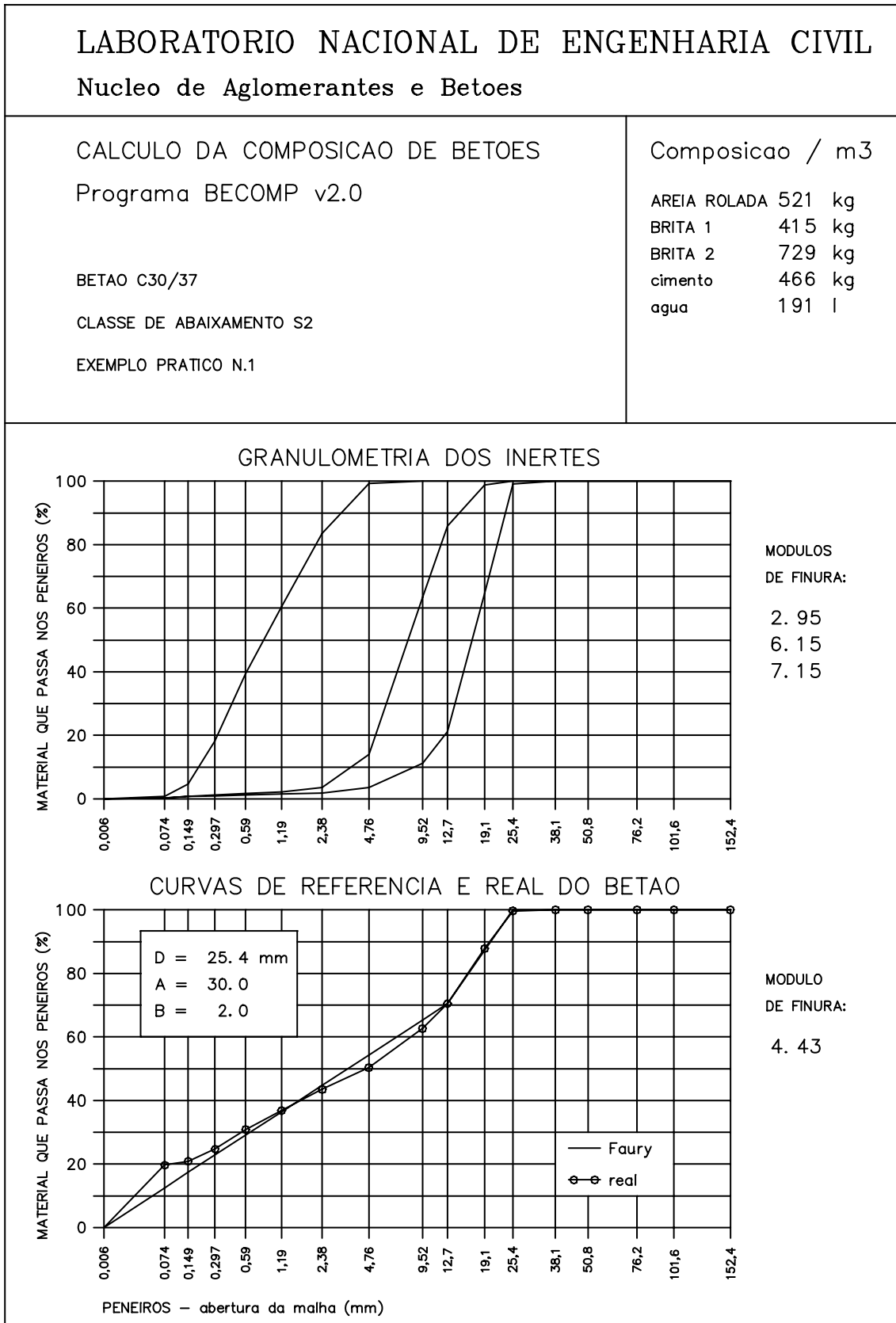


Figura 6.3 - Representação gráfica do cálculo computacional

## 6.2 – Exemplo prático n.º 2

### 6.2.1 – Enunciado

Elabore novamente o estudo da composição do betão solicitado no exemplo prático n.º 1, assumindo, desta feita, as seguintes hipóteses:

- 1) será usado um superplastificante (reductor de água de amassadura), o qual permite uma redução de água de aproximadamente 22 %, na dosagem de 12 ml por cada kg de material cimentício. O adjuvante é denominado Rheobuild 1000, é produzido pela BETTOR-MBT e apresenta uma massa volúmica média de  $\delta_e \cong 1200 \text{ kg/m}^3$ . A ficha técnica do adjuvante é apresentada no Anexo A.4;
- 2) O cimento portland composto tipo II / 32,5, antes utilizado, será substituído pelo cimento portland tipo I / 42,5R, classificado de acordo com a Norma Portuguesa NP 2064 [22]. A ficha técnica do cimento é apresentada no Anexo A.2.
- 3) Serão usadas cinzas volantes da central do Pego na percentagem de 10% do total de material cimentício. A ficha técnica das cinzas volantes é apresentada no Anexo A.3, sendo a massa volúmica média de  $\delta_o = 2290 \text{ kg/m}^3$ .

### 6.2.2 – Resolução do exercício utilizando o Fluxograma n.º 3

#### 6.2.2.1 – Limitação da máxima dimensão do inerte mais grosso

##### Efeito de parede

Será adoptada a relação  $R/D = 1$ , conforme definido nos dados essenciais de base

##### Efeito de segregação

De acordo com os dados fornecidos, não se prevê que ocorra o efeito de segregação quando se utilizam os inertes fornecidos.

### 6.2.2.2 – Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão para o estudo da composição

O valor médio da tensão de rotura será determinado por estimativa a partir do valor característico da tensão de rotura à compressão do betão referida a provetes cúbicos de 150 mm de aresta, tal como previsto na Cláusula 11.3.5.4 da NP\_ENV206 [23].

Valores característicos da tensão de rotura à compressão para o betão em estudo:

Betão C30/37

$f_{ck,cub15} = 37$  MPa (cubos de 150 mm de aresta),

$f_{ck,cil} = 30$  MPa (cilindros  $\phi = 150$  mm e  $h = 300$  mm).

A Cláusula 11.3.5.4 da NP\_ENV206 [23] acima referida determina, para o plano de amostragem previsto (9 provetes em cada lote), que a verificação da conformidade da tensão de rotura à compressão seja efectuada a partir das seguintes expressões:

$$\bar{X}_n \geq f_{ck,cub15} + \lambda \cdot S_n \quad (6.12)$$

$$X_{min} \geq f_{ck,cub15} - K \quad (6.13)$$

Sendo neste caso:

$n = 9 \Rightarrow \lambda = 1,67$  e  $K = 3$  (critério 1 da Cláusula 11.3.5.4)

$f_{ck,cub15} = 37$  MPa,

$S_n \cong 4,4$  MPa (obtido por estimativa a partir do Quadro 3.6, admitindo que os componentes serão medidos em peso e que o nível de controle da produção será bom)

Assim, obtém-se:

$$\bar{X}_9 \geq 37 + 1,67 \cdot 4,4$$

$$X_{min} \geq 37 - 3$$

Ou seja:

$$\bar{X}_9 \geq 44,4 \text{ MPa}$$

$$X_{\min} \geq 34 \text{ MPa}$$

### Conclusão

Será considerado um valor médio aproximado para a tensão de rotura potencial à compressão em provetes cúbicos de 150 mm de aresta de  $f_{cm,cub15} \cong 45 \text{ MPa}$ .

### **6.2.2.3 – Razão A/L e razão A/C máximas**

#### Em função da resistência

A obtenção de uma tensão de rotura média à compressão da ordem dos 45 MPa em cubos de 150 mm de aresta pressupõe, tendo em consideração o gráfico apresentado na Figura 4.2 e o tipo de materiais utilizados, uma razão A/L de aproximadamente 0,47.

#### Verificação das disposições regulamentares

A NP\_ENV206 [23] estabelece, na sua cláusula 5.3, o valor máximo da razão A/C a adoptar em função da classe de exposição ambiental (requisitos de durabilidade).

A consulta dos Quadros 3.14 e 3.15 conduz aos seguintes parâmetros:

Classe de exposição = 2a)

Razão A/C máxima = 0,60

### Conclusão

A razão A/C pode ser inferida a partir da razão A/L, uma vez que se conhece a percentagem de aditivo (cinzas volantes) em relação à massa total de material cimentício ( $A_{o/L}\%$ ), através da expressão:

$$(\text{razão A/C}) = (\text{razão A/L}) / (1 - A_{o/L}\% / 100) \quad (6.14)$$

Onde:

$$A_{o/L}\% = 10 \%$$

$$\text{Razão A/L em massa} = 0,47$$

Assim:

$$\text{Razão A/C} = 0,47 / (1 - 10 / 100)$$

$$\text{Razão A/C} \cong 0,52$$

Conclui-se, portanto, que a razão A/L adoptada (admitindo-se que 10% dos materiais cimentícios serão constituídos por cinzas volantes) poderá ser considerada adequada, à luz dos requisitos impostos na NP\_ENV206 [23], considerando-se verificadas as disposições regulamentares a este respeito.

#### 6.2.2.4 – Estimativa do índice de vazios ( $I_v$ )

Para a estimativa do índice de vazios será utilizada a fórmula proposta por Faury:

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (6.15)$$

Sendo neste caso:

$$D = 25,4 \text{ mm,}$$

$$R/D = 1,$$

$K = 0,37$ ;  $K' = 0,003$  (Obtidos por consulta do Quadro 4.2, considerando-se a trabalhabilidade mole, areia rolada e inerte grosso britado)

De onde se obtém:

$$I_v \cong 0,206 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão}$$

### 6.2.2.5 – Água de amassadura (A)

A dosagem de água de amassadura será estimada a partir do índice de vazios e do valor do volume de vazios, pela expressão:

$$A = (I_v - V_v) \times 1000 \quad (6.16)$$

Sendo:

$$I_v = 0,206 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão;}$$

$$V_v = 0,015 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão (obtido por consulta do Quadro 4.1).}$$

De onde se conclui que:

$$A = (0,206 - 0,015) \times 1000$$

$$A = 191 \text{ litros por cada m}^3 \text{ de betão.}$$

### 6.2.2.6 – Dosagem de adjuvante ( $A_e$ ) e redução da água de amassadura

A percentagem de redução de água ( $R_a\%$ ) proporcionada pelo adjuvante superplastificante, na dosagem de 12 ml por kg de material cimentício, de acordo com os dados fornecidos, será de aproximadamente 22%. Assim, a nova quantidade de água de amassadura será dada pela expressão:

$$A' = A \cdot (1 - R_a\% / 100) \quad (6.17)$$

Onde:

$$A = 191 \text{ litros por cada m}^3 \text{ de betão,}$$

$$R_a\% = 22 \text{ \%}.$$

Obtém-se, deste modo:

$$A' = 191 \cdot (1 - 22 / 100)$$

$$A' \cong 149 \text{ litros por cada m}^3 \text{ de betão}$$

### 6.2.2.7 – Correção do índice de vazios ( $I'_v$ )

O novo valor do índice de vazios ( $I'_v$ ) será dado pela expressão:

$$I'_v = A' + V_v \quad (6.18)$$

Onde:

$$A' = 0,149 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão,}$$

$$V_v = 0,015 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão}$$

Obtém-se então:

$$I'_v = 0,164 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão}$$

Nota: Foi desprezada a contribuição do volume de adjuvante para o índice de vazios.

### 6.2.2.8 – Dosagem de material cimentício (L)

A dosagem de material cimentício será estimada a partir dos valores já conhecidos para a razão A/L e dosagem corrigida de água ( $A'$ ).

Assim, a dosagem de material cimentício (L) será dada por:

$$L = A' / (\text{razão A/L}) \quad (6.19)$$

Sendo:

$$A' = 149 \text{ litros por cada m}^3 \text{ de betão;}$$

$$\text{Razão A/L em massa} = 0,47;$$

Conclui-se que:

$$L \cong 317 \text{ kg por cada m}^3 \text{ de betão}$$

### 6.2.2.9 – Dosagem de aditivo ( $A_o$ )

A dosagem de aditivo em massa é determinada por:

$$A_o = L \cdot A_{o/L} \% / 100 \quad (6.20)$$

Onde:

$L = 317$  kg por cada  $m^3$  de betão,

$A_{o/L} \% = 10$  %

Obtém-se, deste modo:

$$A_o = 317 \cdot 10 / 100 = 31,7$$

$A_o \cong 32$  kg por cada  $m^3$  de betão

### 6.2.2.10 – Dosagem de cimento ( $C$ )

A dosagem de cimento em massa é dada por:

$$C = L - A_o \quad (6.21)$$

Onde:

$L = 317$  kg por cada  $m^3$  de betão,

$A_o = 32$  kg por cada  $m^3$  de betão.

De onde vem que:

$$C = 317 - 32 = 285$$

$C = 285$  kg por cada  $m^3$  de betão

#### Verificação das disposições regulamentares

A NP\_ENV206 [23] estabelece, na sua cláusula 5.3, a dosagem mínima de cimento a adoptar no fabrico do betão em função da classe de exposição ambiental (requisitos de durabilidade).

A consulta dos Quadros 3.14 e 3.15 conduz aos seguintes parâmetros:

Classe de exposição = 2a),

Dosagem mínima de cimento = 280 kg por cada m<sup>3</sup> de betão.

### Conclusão

A dosagem de cimento proposta para a obtenção do nível de resistência desejado respeita os requisitos mínimos estabelecidos pela NP\_ENV206 [23], pelo que se consideram cumpridas as disposições regulamentares a este respeito.

#### **6.2.2.11 – Volume das partículas de cimento (V<sub>c</sub>)**

O volume das partículas de cimento é dado por:

$$V_c = C / \delta_c \quad (6.22)$$

Onde:

C = 285 kg por cada m<sup>3</sup> de betão,

$\delta_c = 3180 \text{ kg/m}^3$ .

De onde vem que:

$$V_c \cong 0,090 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão.}$$

#### **6.2.2.12 – Volume das partículas de aditivo (V<sub>o</sub>)**

O volume das partículas de aditivo (cinzas volantes) pode ser determinado pela expressão:

$$V_o = A_o / \delta_o \quad (6.23)$$

Onde:

A<sub>o</sub> = 32 kg por cada m<sup>3</sup> de betão,

$\delta_o = 2290 \text{ kg/m}^3$ .

De onde vem que:

$$V_o \cong 0,014 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de bet\~{a}o}$$

#### **6.2.2.13 – Volume do total das partículas de material ciment ceo ( $V_L$ )**

O volume ocupado pelo total das partículas de material ciment ceo   dado pela soma dos volumes das partículas de cimento e do aditivo, ou seja:

$$V_L = V_c + V_o \quad (6.24)$$

$$V_L = 0,090 + 0,014$$

$$V_L = 0,104 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de bet\~{a}o}$$

#### **6.2.2.14 – Volume do total das partículas sólidas do betão ( $V_s$ )**

O volume do total das partículas sólidas do betão   dado por:

$$V_s = 1 - I'_v \quad (6.25)$$

Onde:

$$I'_v = 0,164 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de bet\~{a}o.}$$

De onde vem que:

$$V_s = 0,836 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de bet\~{a}o}$$

#### **6.2.2.15 – Percentagem do volume de cimento em rela o ao volume sólido total (C%)**

A percentagem do volume de cimento em rela o ao volume sólido total   dado pela expressão:

$$C\% = \frac{V_c}{V_s} \times 100 \quad (6.26)$$

Onde:

$$V_c = 0,090 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de bet\~{a}o,}$$

$$V_s = 0,836 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de bet\~{a}o.}$$

De onde se conclui que:

$$C\% = 10,77 \%$$

#### **6.2.2.16 – Percentagem do volume de aditivo em relação ao volume sólido total**

A percentagem do volume de aditivo em relação ao volume sólido total ( $A_o\%$ ) é dado pela expressão:

$$A_o\% = \frac{V_o}{V_s} \times 100 \quad (6.27)$$

Onde:

$$V_o = 0,014 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão,}$$

$$V_s = 0,836 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão.}$$

De onde se conclui que:

$$A_o\% = 1,67 \%$$

#### **6.2.2.17 – Percentagem do volume de material cimentício em relação ao volume sólido total (L%)**

A percentagem do volume de material cimentício em relação ao volume sólido total é dado pela expressão:

$$L\% = \frac{V_L}{V_s} \times 100 \quad (6.28)$$

Onde:

$$V_L = 0,104 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão,}$$

$$V_s = 0,836 \text{ m}^3 \text{ por cada m}^3 \text{ de betão.}$$

De onde se conclui que:

$$L\% \cong 12,44 \%$$

### 6.2.2.18 – Curva de referência de Faury

A curva de referência de Faury é na realidade definida por dois segmentos de recta identificados por três pontos. As coordenadas desses pontos dependem do grau de consistência pretendido, dos meios disponíveis para trabalhar o betão e certamente do tipo de materiais inertes disponíveis. Assim, de acordo com Faury, esses pontos são definidos do seguinte modo:

$$\begin{aligned} \text{Ponto 1: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = 0,0065 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 0,0\% \end{cases} \\ \text{Ponto 2: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = D/2 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = P_{D/2} \% = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \end{cases} \quad (6.29) \\ \text{Ponto 3: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = D \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 100,0\% \end{cases} \end{aligned}$$

Sendo:

$$D = 25,4 \text{ mm} \Rightarrow D/2 = 12,7 \text{ mm};$$

$$R/D = 1;$$

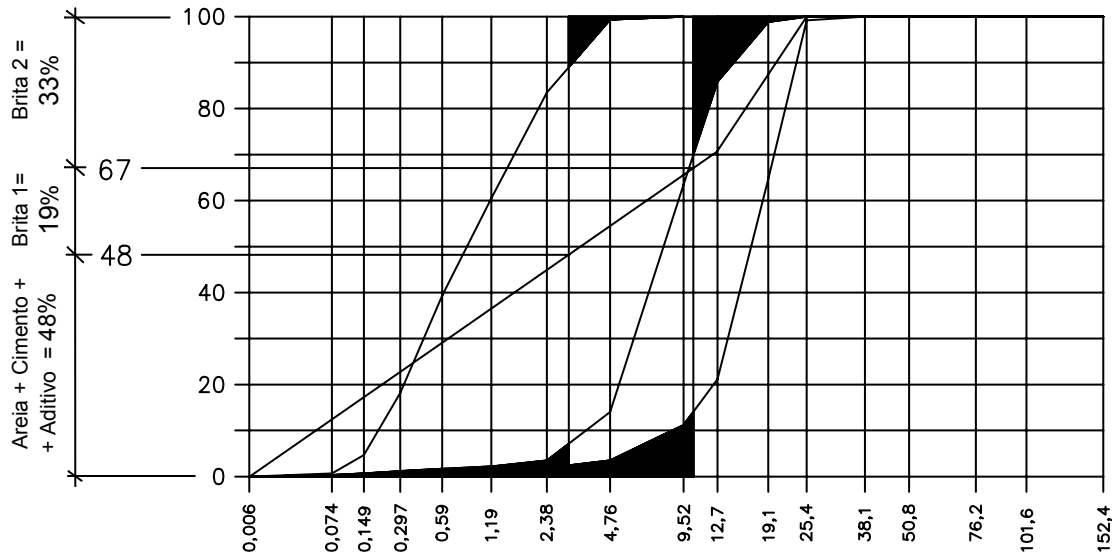
$A = 30$ ;  $B = 2$  (Obtidos por consulta do Quadro 4.4, considerando-se a trabalhabilidade mole, areia rolada e inerte grosso britado)

Obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Ponto 1: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = 0,0065 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 0,0\% \end{cases} \\ \text{Ponto 2: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = 12,7 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 70,47\% \end{cases} \\ \text{Ponto 3: } & \begin{cases} \text{Abcissa} = 25,4 \text{ mm} \\ \text{Ordenada} = 100,0\% \end{cases} \end{aligned}$$

### 6.2.2.19 – Determinação das percentagens dos componentes sólidos

O ajustamento das curvas granulométricas dos inertes à curva de referência encontra-se desenhado no gráfico apresentado na Figura 6.4.



**Figura 6.4** – Ajustamento da curva granulométrica dos inertes à curva de ref. de Faury

As percentagens assim determinadas são apresentadas a seguir:

$$\text{Areia + Cimento + aditivo} = 48\% \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Cimento} = 10,77\% \\ \text{Aditivo (cinzas)} = 1,67\% \\ \text{Areia rolada} = 35,56\% \end{array} \right.$$

Brita 1 = 19 %

Brita 2 = 33 %

### 6.2.2.20 – Módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury

O módulo de finura de Faury para a curva de referência de Faury ( $MF_{ref}$ ) será determinado por consulta do Quadro 4.5, em função da máxima dimensão do inerte (D) e do parâmetro “a”, determinado pela expressão:

$$a = A + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (6.30)$$

Onde:

D = 25,4 mm;

R/D = 1;

A = 30; B = 2 (Obtidos por consulta do Quadro 4.4, considerando-se a trabalhabilidade mole, areia rolada e inerte grosso britado)

Concluindo-se que:

$$a = 38 \text{ e } D = 25,4 \text{ mm.}$$

Assim, por consulta do Quadro 4.5 obtém-se:

$$MF_{ref} = 4,44$$

### 6.2.2.21 – Aproximação do módulo de finura da mistura ( $MF_{real}$ ) ao módulo de finura da curva de referência Faury ( $MF_{ref}$ )

O tratamento dos dados é feito no Quadro 6.3, que a seguir se apresenta:

**Quadro 6.3** – Aproximação da curva real do betão à curva de referência de Faury

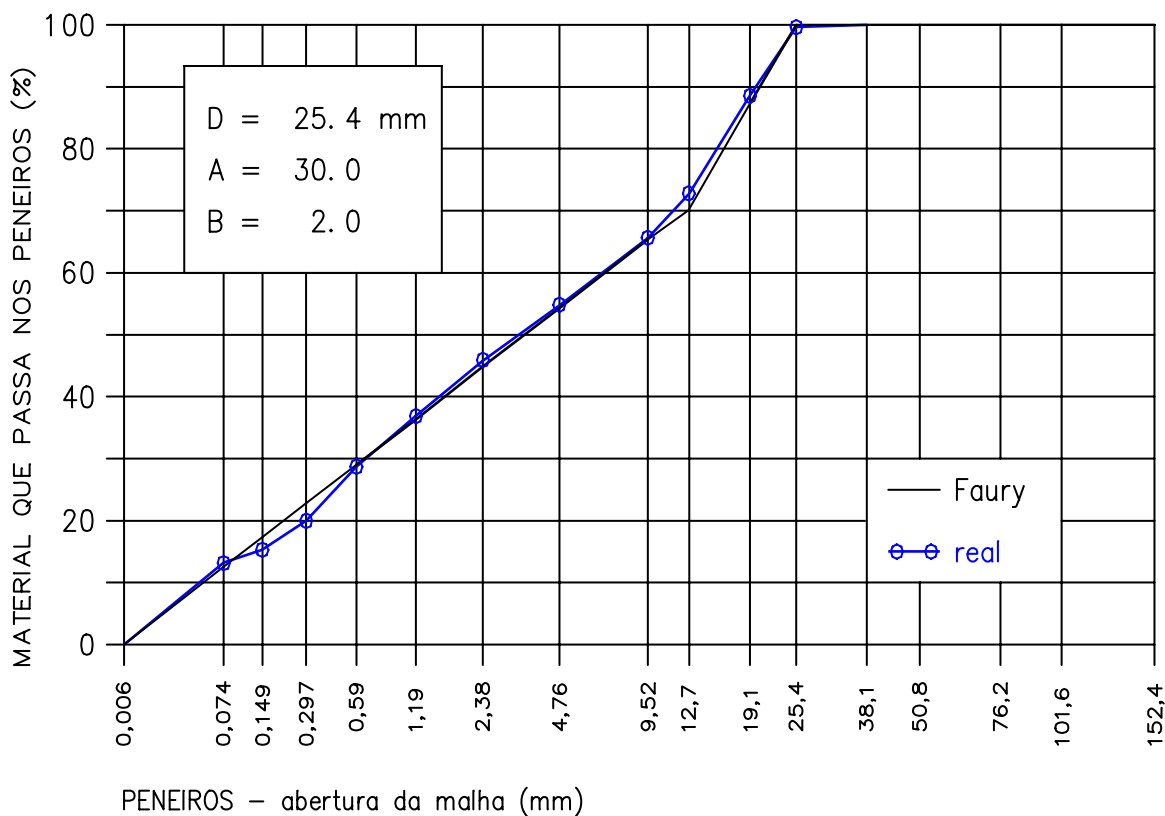
Inerte	Inicial			Acerto	
	$MF_i$	$I_i \%$	$MF_i \times I_i \% / 100$	$I'_i \%$	$MF_i \times I'_i \% / 100$
Areia	2,945	35,56	1,047	39,06	1,150
Brita 1	6,146	19	1,168	17,00	1,045
Brita 2	7,146	33	2,358	31,50	2,251
			$\Sigma$ 4,573		$\Sigma$ 4,446 Ok!

### 6.2.2.22 – Comparação da curva real com a curva de referência de Faury e determinação do erro médio percentual

O tratamento dos dados é feito no Quadro 6.4 e na Figura 6.5, tal como se ilustra a seguir:

**Quadro 6.4** - Comparação da curva real com a curva de referência e determinação do erro médio percentual

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem acumulada de material que passa nos peneiros (entre parêntesis a percentagem final com que entram na mistura)					Curva real (100,00 %)	Curva de referência (100,00 %)	Erro percentual por peneiro
	Cimento (10,77 %)	Cinzas (1,67 %)	Areia (39,06 %)	Brita 1 (17,00 %)	Brita 2 (31,50 %)			
25,40	100,00	100,00	100,00	100,00	99,10	99,72	100,00	0,28
19,10	100,00	100,00	100,00	98,86	64,62	88,66	87,36	1,30
12,70	100,00	100,00	100,00	85,90	21,13	72,76	70,47	2,29
9,52	100,00	100,00	100,00	63,45	11,15	65,80	65,41	0,39
4,76	100,00	100,00	99,31	13,92	3,49	54,70	54,37	0,33
2,38	100,00	100,00	83,53	3,43	1,86	46,24	44,77	1,47
1,190	100,00	100,00	60,51	2,21	1,52	36,93	36,40	0,53
0,590	100,00	100,00	39,37	1,66	1,24	28,49	29,04	0,55
0,297	100,00	100,00	18,13	1,17	0,91	20,01	22,77	2,76
0,149	100,00	100,00	4,64	0,74	0,60	14,57	17,28	2,71
0,074	100,00	100,00	0,63	0,39	0,29	12,84	12,43	0,41
<b>Erro médio percentual (E,%) =</b>								<b>1,18 %</b>



**Figura 6.5** – Representação gráfica da curva real e da curva de referência de Faury

### 6.2.2.23 – Massa de cada componente sólido

A massa de cada componente sólido inerte é determinada pela expressão:

$$I_i = \frac{I'_i \% \times V_s}{100} \times \delta_i \quad (6.31)$$

Onde:

$I'_i \%$  - percentagem final (corrigida) do inerte  $i$  em relação ao volume do total das partículas sólidas do betão;

$V_s$  - volume do total das partículas sólidas do betão, expresso em  $m^3$  por cada  $m^3$  de betão;

$\delta_i$  - massa volúmica do inerte  $i$ , em  $kg/m^3$ .

Assim sendo, obtém-se as seguintes quantidades:

$$\text{Areia} = \frac{39,06 \% \times 0,836}{100} \times 2395 \cong 782 \quad \text{kg por cada } m^3 \text{ de betão}$$

$$\text{Brita 1} = \frac{17,00 \% \times 0,836}{100} \times 2700 \cong 384 \quad \text{kg por cada } m^3 \text{ de betão}$$

$$\text{Brita 2} = \frac{31,50 \% \times 0,836}{100} \times 2700 \cong 711 \quad \text{kg por cada } m^3 \text{ de betão}$$

### 6.2.2.24 – Apresentação final da composição do betão

Componentes necessários para produzir 1 metro cúbico de betão:

Areia natural rolada =	782	kg
Brita 1 (granito britado) =	384	kg
Brita 2 (granito britado) =	711	kg
Cimento tipo I / 42,5R =	285	kg
Cinzas volantes =	32	kg
Adjuvante (Rheobuild 1000) =	3,804	litros (ou 4,565 kg)
Água =	149	litros
<i>Massa volúmica do betão fresco</i> =	<u>2348</u>	<u>kg / m<sup>3</sup></u>

## 6.2.3 – Aplicação do programa de cálculo computacional “BECOMP”

### LISTAGEM DO PROGRAMA DE CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES “BECOMP”

```
=====
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
Núcleo de Aglomerantes e Betões
=====
```

#### PROGRAMA BECOMP: Cálculo da composição de um betão

-----

BETÃO C30/37  
CLASSE DE ABAIXAMENTO S2  
EXEMPLO PRÁTICO N.º2

#### ENTRADA DE DADOS:

-----

Número de inertes : 3

Dosagem de cimento : 285.00 kg/m3

Dosagem de adjuvante : 13.35 ml/kg cimento

Dosagem de cinzas volantes : 32.00 kg/m3

Massas volúmicas (kg/m3):

AREIA ROLADA	:	2395.00
BRITA 1	:	2700.00
BRITA 2	:	2700.00
cimento	:	3180.00
adjuvante	:	1200.00
cinzas	:	2290.00

Água de amassadura : 149.0 litros/m3

Volume de vazios : 15.0 litros/m3

Malha do primeiro peneiro que retém material : 25.400 mm

Granulometrias dos inertes (% que passa nos peneiros):

AREIA ROLADA - peneiro de 25.400 mm	:	100.00 %
peneiro de 19.100 mm	:	100.00 %
peneiro de 12.700 mm	:	100.00 %
peneiro de 9.520 mm	:	100.00 %
peneiro de 4.760 mm	:	99.31 %
peneiro de 2.380 mm	:	83.53 %
peneiro de 1.190 mm	:	60.51 %
peneiro de 0.590 mm	:	39.37 %
peneiro de 0.297 mm	:	18.13 %
peneiro de 0.149 mm	:	4.64 %
peneiro de 0.074 mm	:	0.63 %

BRITA 1 - peneiro de 25.400 mm : 100.00 %  
 peneiro de 19.100 mm : 98.86 %  
 peneiro de 12.700 mm : 85.90 %  
 peneiro de 9.520 mm : 63.45 %  
 peneiro de 4.760 mm : 13.92 %  
 peneiro de 2.380 mm : 3.43 %  
 peneiro de 1.190 mm : 2.21 %  
 peneiro de 0.590 mm : 1.66 %  
 peneiro de 0.297 mm : 1.17 %  
 peneiro de 0.149 mm : 0.74 %  
 peneiro de 0.074 mm : 0.39 %

BRITA 2 - peneiro de 25.400 mm : 99.10 %  
 peneiro de 19.100 mm : 64.62 %  
 peneiro de 12.700 mm : 21.13 %  
 peneiro de 9.520 mm : 11.15 %  
 peneiro de 4.760 mm : 3.49 %  
 peneiro de 2.380 mm : 1.86 %  
 peneiro de 1.190 mm : 1.52 %  
 peneiro de 0.590 mm : 1.24 %  
 peneiro de 0.297 mm : 0.91 %  
 peneiro de 0.149 mm : 0.60 %  
 peneiro de 0.074 mm : 0.29 %

Parâmetros da curva de Faury - A : 30.00  
 B : 2.00

Raio médio do molde (R/D) : 1.00

**RESULTADOS:**

-----

Máxima dimensão do inerte arbitrada

Módulos de finura:

AREIA ROLADA : 2.945  
 BRITA 1 : 6.146  
 BRITA 2 : 7.146

Máxima dimensão do betão : 25.400 mm

Módulo de finura da curva de Faury : 4.426

Percentagens: AREIA ROLADA : 39.47 %  
 BRITA 1 : 14.36 %  
 BRITA 2 : 33.32 %  
 cimento : 10.72 %  
 adjuvante : 0.46 %  
 cinzas : 1.67 %

Dosagens por m3 de betão: AREIA ROLADA : 790.3 kg  
 BRITA 1 : 324.1 kg  
 BRITA 2 : 752.1 kg  
 cimento : 285.0 kg  
 adjuvante : 3.805 l  
 cinzas : 32.0 kg  
 agua : 149.0 litros

massa volúmica do betão : 2337.1 kg/m3

Relação água/ligante (a/c) : 0.470

Granulometria da curva de Faury:

ponto 1 : D = 0.0065 mm <---> Y = 0 %  
ponto 2 : D = 12.700 mm <---> Y = 70.47 %  
ponto 3 : D = 25.400 mm <---> Y = 100 %

Curva real do betão (comparação com a de Faury):

peneiro de 152.400 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 101.600 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 76.200 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 50.800 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 38.100 mm <--->	passa 100.00 %	(100.00 %)
peneiro de 25.400 mm <--->	passa 99.70 %	(100.00 %)
peneiro de 19.100 mm <--->	passa 88.05 %	( 87.36 %)
peneiro de 12.700 mm <--->	passa 71.70 %	( 70.47 %)
peneiro de 9.520 mm <--->	passa 65.15 %	( 65.41 %)
peneiro de 4.760 mm <--->	passa 55.21 %	( 54.37 %)
peneiro de 2.380 mm <--->	passa 46.93 %	( 44.77 %)
peneiro de 1.190 mm <--->	passa 37.56 %	( 36.40 %)
peneiro de 0.590 mm <--->	passa 29.04 %	( 29.04 %)
peneiro de 0.297 mm <--->	passa 20.47 %	( 22.77 %)
peneiro de 0.149 mm <--->	passa 14.98 %	( 17.28 %)
peneiro de 0.074 mm <--->	passa 13.25 %	( 12.43 %)

Erro médio por peneiro da solução obtida : 1.40 %

Dosagens para uma amassadura de 30.0 litros:

AREIA ROLADA :	23.71 kg
BRITA 1 :	9.72 kg
BRITA 2 :	22.56 kg
cimento :	8.55 kg
adjuvante :	0.11 l
cinzas :	0.96 kg
agua :	4.47 litros

Massa total da amassadura : 70.11 kg

Correcções na amassadura real (+/-) :

cimento .....	kg
adjuvante .....	g
cinzas .....	kg
agua .....	litros

Abaixamento do cone de Abrams ..... cm

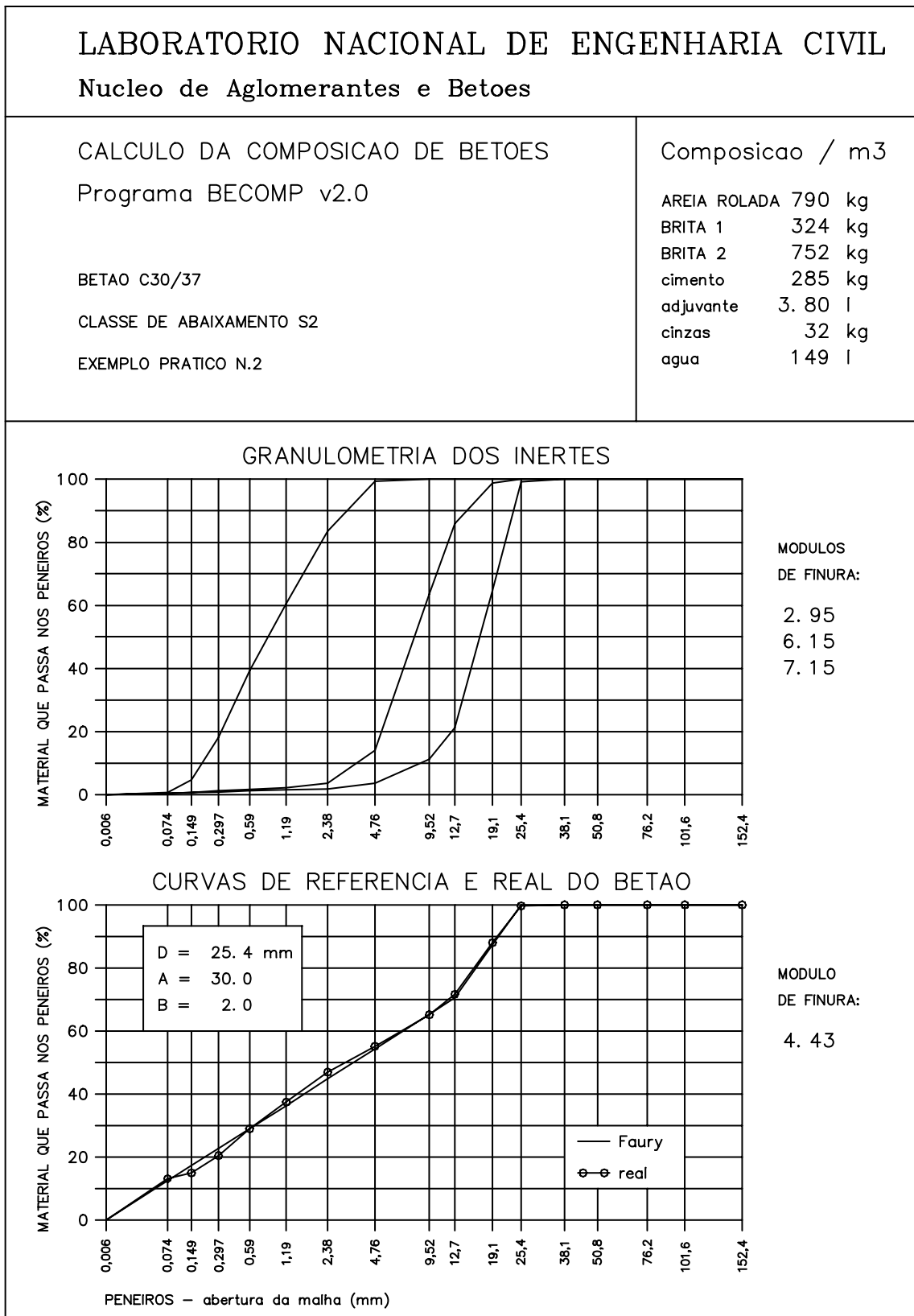


Figura 6.6 – Representação gráfica do cálculo computacional



## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI 214-77 (Reapproved 1989)- Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete. «ACI Manual of Concrete Practice, Part 2: Construction Practices and Inspection Pavements», Detroit 1994 (citado em [18]).
- [2] ACI 363 R-84 – State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete. «ACI Journal – Committee Report», n.º 81-34, Jul. - Aug. 1984.
- [3] ALMEIDA, Ivan R.– Betões de Alta Resistência e Durabilidade, Lisboa, LNEC, 1990.
- [4] APEB – Betão: Propriedades e Controle de Qualidade, Lisboa, APEB – Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, 1993.
- [5] BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G. – Testing of Concrete in Structures, 3.<sup>a</sup> ed., London, Chapman & Hall, 1996.
- [6] CEN – Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Dec. 1992.
- [7] COUTINHO, A de Sousa – Fabrico e Propriedades do Betão, vol. 1, Lisboa, LNEC, 1988.
- [8] COUTINHO, A de Sousa – Fabrico e Propriedades do Betão, vol. 2, Lisboa, LNEC, 1988.
- [9] COUTINHO, A de Sousa; GONÇALVES, Arlindo – Fabrico e Propriedades do Betão, vol. 3, Lisboa, LNEC, 1994.
- [10] ERNTROY, H. C. - The Variation of Works Test Cubes. «Research Report No 10», Cement Concrete Association, London, Nov. 1960 (citado em [18]).
- [11] Especificação LNEC E226-1968 – Betão: Ensaio de compressão.
- [12] Especificação LNEC E228-1968 - Betão: Determinação da Trabalhabilidade Vêbê.

- [13] Especificação LNEC E245-1971 - Inertes para Argamassas e Betões: Análise Granulométrica.
- [14] Especificação LNEC E255-1971 – Betões: Preparação de Provetes para Ensaios de Compressão e de Flexão.
- [15] LOURENÇO, Jorge F. – Metodologia da Composição de Betões, Coimbra, Livraria Almedina, 1989.
- [16] LOURENÇO, Jorge; COUTINHO, José – O Cálculo Automático no Projecto de Composição de Betões, Coimbra, FCTUC, 1989.
- [17] NEPOMUCENO, Miguel – Betão: Estudo da Composição e Propriedades. «Documento de Apoio às Aulas Práticas de Materiais de Construção II», Covilhã, UBI, 1997.
- [18] NEVILLE, A M. – Properties of Concrete, 4ª Edition., London, Longman Group Limited, 1995.
- [19] Norma Portuguesa Definitiva – NP 581 – Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Britas e Godos. IGPAI, Lisboa, 1969.
- [20] Norma Portuguesa Definitiva – NP 87 – Consistência do Betão: Ensaio de Abaixamento. IGPAI, Lisboa, 1964.
- [21] Norma Portuguesa Definitiva – NP 954 – Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Areias. IGPAI, Lisboa, 1973.
- [22] Norma Portuguesa NP 2064 – Cimentos. Definições, Composição, Especificações e Critérios de Conformidade, IPQ, 1991.
- [23] Norma Portuguesa NP ENV206: 1993 - Betão: Comportamento, Produção, Colocação e Critérios de Conformidade – Lisboa, Instituto Português da Qualidade, 1993.

- [24] PORTO EDITORA – Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos (Dec.-Lei n.º 445/89, de 30 de Dezembro), Porto, Porto Editora, 1993.
- [25] PORTO EDITORA – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (Dec. Lei n.º 349-c/83, de 30 de Julho), Porto, Porto Editora, 1993.



## **ANEXOS**



# **ANEXO A.1**

## **Caracterização dos inertes**

\*

(Análises granulométricas)

(Massas volúmicas)

(Perda por desgaste)

(Teor de partículas finas e matérias solúveis)

(Índice volumétrico)





**Universidade da Beira Interior**  
**Departamento de Engenharia Civil**

**Laboratório de Materiais e Estruturas**  
Rua Marquês d'Avila e Bolama - 6200 Covilhã - Portugal  
Telefone: (075) 319700 Telefax: (075) 319888

Requerente: Obra: Lugar / Rua: Localidade: Concelho: Telefone / Fax:	Processo n.º:  Ensaio n.º:  Data: 18-03-1998
---	--

### ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Inerte: Areia natural rolada	Proveniência: F&F, Lda
---------------------------------	---------------------------

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(* 2"	(* 50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(* 1"	(* 25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(* 1/2"	(* 12,70	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8"	9,52	0,00	0,00	100,00	0,00
n.º 4	4,76	11,60	0,69	99,31	0,69
n.º 8	2,38	263,60	15,78	83,53	16,47
n.º 16	1,190	384,60	23,02	60,51	39,49
n.º 30	0,590	353,30	21,14	39,37	60,63
n.º 50	0,297	354,90	21,24	18,13	81,87
n.º 100	0,149	225,30	13,48	4,64	95,36
n.º 200	0,074	67,00	4,01	0,63	99,37
Resíduo		10,60	0,63	0,00	100,00
Totais		1670,90	100,00		

(\* Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 2,945

Ensaiou: Nepomuceno	Observações: Método de Ensaio de acordo com a especificação do LNEC E245 [13]
Verificou: Nepomuceno	
Data: 18-03-1998	



**Universidade da Beira Interior  
Departamento de Engenharia Civil**

**Laboratório de Materiais e Estruturas**  
Rua Marquês d'Avila e Bolama - 6200 Covilhã - Portugal  
Telefone: (075) 319700 Telefax: (075) 319888

Requerente:	Processo n.º:
Obra:	Ensaio n.º:
Lugar / Rua:	Data: 18-03-1998
Localidade:	
Concelho:	
Telefone / Fax:	

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Inerte: Brita 1 - Inerte britado de granito	Proveniência: Pedreira de Joaquim Bartolomeu
--	---

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	48,80	1,14	98,86	1,14
(*) 1/2"	(*)12,70	555,00	12,96	85,90	14,10
3/8"	9,52	961,00	22,44	63,45	36,55
n.º 4	4,76	2120,80	49,53	13,92	86,08
n.º 8	2,38	449,10	10,49	3,43	96,57
n.º 16	1,190	52,20	1,22	2,21	97,79
n.º 30	0,590	23,70	0,55	1,66	98,34
n.º 50	0,297	20,90	0,49	1,17	98,83
n.º 100	0,149	18,40	0,43	0,74	99,26
n.º 200	0,074	14,80	0,35	0,39	99,61
Resíduo		16,90	0,39	0,00	100,00
Totais		4281,60	100,00		

(\*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 6,146

Ensaiou: Nepomuceno	Observações: Método de Ensaio de acordo com a especificação do LNEC E245 [13]
Verificou: Nepomuceno	
Data: 18-03-1998	



**Universidade da Beira Interior  
Departamento de Engenharia Civil**

**Laboratório de Materiais e Estruturas**  
Rua Marquês d'Avila e Bolama - 6200 Covilhã - Portugal  
Telefone: (075) 319700 Telefax: (075) 319888

Requerente: Obra: Lugar / Rua: Localidade: Concelho: Telefone / Fax:	Processo n.º:  Ensaio n.º:  Data: 18-03-1998
---	--

### ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Inerte: Brita 2 - Inerte britado de granito	Proveniência: Pedreira de Joaquim Bartolomeu
--	---

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	100,80	0,90	99,10	0,90
3/4"	19,10	3862,70	34,48	64,62	35,38
(*) 1/2"	(*)12,70	4872,60	43,49	21,13	78,87
3/8"	9,52	1118,50	9,98	11,15	88,85
n.º 4	4,76	858,40	7,66	3,49	96,51
n.º 8	2,38	182,5	1,63	1,86	98,14
n.º 16	1,190	38,30	0,34	1,52	98,48
n.º 30	0,590	31,20	0,28	1,24	98,76
n.º 50	0,297	36,60	0,33	0,91	99,09
n.º 100	0,149	34,70	0,31	0,60	99,40
n.º 200	0,074	34,90	0,31	0,29	99,71
Resíduo		32,60	0,29	0,00	100,00
Totais		11203,80	100,00		

(\*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 7,146

Ensaiou: Nepomuceno	Observações: Método de Ensaio de acordo com a especificação do LNEC E245 [13]
Verificou: Nepomuceno	
Data: 18-03-1998	



**Universidade da Beira Interior**  
**Departamento de Engenharia Civil**

**Laboratório de Materiais e Estruturas**  
Rua Marquês d'Avila e Bolama - 6200 Covilhã - Portugal  
Telefone: (075) 319700 Telefax: (075) 319888

Requerente: Obra: Lugar / Rua: Localidade: Concelho: Telefone / Fax:	Processo n.º:  Ensaio n.º:  Data: 27-03-1998
---	--

**MASSA VOLÚMICA**  
**Areia saturada com a superfície seca**  
Método: Densímetro (balão)

Inerte: Areia natural rolada (Amostra n.º 1 de 2)	Proveniência: F&F, Lda
--	---------------------------

**Leituras:**

P1 – Massa do inerte (provete) saturado com a superfície seca P1 = 544,4 [g]

P2 – Massa do balão + provete + água (até ao traço de referência) P2 = 1558,3 [g]

P3 – Massa do balão + água (até ao traço de referência) P3 = 1238,6 [g]

**Resultados:**

Massa volúmica do inerte saturado com a superfície seca (\*)  $\delta = 2420 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Ensaiou: Nepomuceno	Observações: Ensaio realizado de acordo com a Norma Portuguesa NP-954 [21]  (* ) $\delta = \frac{P1}{P1 + P3 - P2} \times 1000$
Verificou: Nepomuceno	
Data: 27-03-1998	



**Universidade da Beira Interior**  
**Departamento de Engenharia Civil**

**Laboratório de Materiais e Estruturas**  
Rua Marquês d'Avila e Bolama - 6200 Covilhã - Portugal  
Telefone: (075) 319700 Telefax: (075) 319888

Requerente: Obra: Lugar / Rua: Localidade: Concelho: Telefone / Fax:	Processo n.º:  Ensaio n.º:  Data: 27-03-1998
---	--

**MASSA VOLÚMICA**  
**Areia saturada com a superfície seca**  
Método: Densímetro (balão)

Inerte: Areia natural rolada (Amostra n.º 2 de 2)	Proveniência: F&F, Lda
--	---------------------------

**Leituras:**

P1 – Massa do inerte (provete) saturado com a superfície seca	P1 = 547,2 [g]
P2 – Massa do balão + provete + água (até ao traço de referência)	P2 = 1554,8 [g]
P3 – Massa do balão + água (até ao traço de referência)	P3 = 1238,6 [g]

**Resultados:**

Massa volúmica do inerte saturado com a superfície seca (*)	$\delta = 2370 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
---	---

Ensaiou: Nepomuceno	Observações: Ensaio realizado de acordo com a Norma Portuguesa NP-954 [21].  (* ) $\delta = \frac{P1}{P1+P3-P2} \times 1000$
Verificou: Nepomuceno	
Data: 27-03-1998	



**Universidade da Beira Interior**  
**Departamento de Engenharia Civil**

**Laboratório de Materiais e Estruturas**  
Rua Marquês d'Avila e Bolama - 6200 Covilhã - Portugal  
Telefone: (075) 319700 Telefax: (075) 319888

Requerente: Obra: Lugar / Rua: Localidade: Concelho: Telefone / Fax:	Processo n.º:  Ensaio n.º:  Data: 25-03-1998
---	--

**MASSA VOLÚMICA**  
**Inerte grosso saturado com a superfície seca**  
Método: Pesagens hidrostáticas

Inerte: Brita 1 - Inerte britado de granito	Proveniência: Pedreira de Joaquim Bartolomeu
--	---

**Leituras:**

P1 – Massa do inerte saturado com a superfície seca	P1 = 1407,3 [g]
P2 – Massa do cesto vazio, imerso	P2 = 0,0 [g]
P3 – Massa do cesto + inerte, imerso	P3 = 886,2 [g]

**Resultados:**

Massa volúmica do inerte saturado com a superfície seca (*)	$\delta = 2700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
---	---

Ensaiou: Nepomuceno	Observações: Ensaio realizado de acordo com a Norma Portuguesa NP-581 [19].  (* ) $\delta = \frac{P1}{P1+P2-P3} \times 1000$
Verificou: Nepomuceno	
Data: 25-03-1998	



**Universidade da Beira Interior**  
**Departamento de Engenharia Civil**

**Laboratório de Materiais e Estruturas**  
Rua Marquês d'Avila e Bolama - 6200 Covilhã - Portugal  
Telefone: (075) 319700 Telefax: (075) 319888

Requerente: Obra: Lugar / Rua: Localidade: Concelho: Telefone / Fax:	Processo n.º:  Ensaio n.º:  Data: 25-03-1998
---	--

**MASSA VOLÚMICA**  
**Inerte grosso saturado com a superfície seca**  
Método: Pesagens hidrostáticas

Inerte: Brita 2 - Inerte britado de granito	Proveniência: Pedreira de Joaquim Bartolomeu
--	---

**Leituras:**

P1 – Massa do inerte saturado com a superfície seca	P1 = 3404,3 [g]
P2 – Massa do cesto vazio, imerso	P2 = 0,0 [g]
P3 – Massa do cesto + inerte, imerso	P3 = 2142,0 [g]

**Resultados:**

Massa volúmica do inerte saturado com a superfície seca (*)	$\delta = 2700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
---	---

Ensaiou: Nepomuceno	Observações: Ensaio realizado de acordo com a Norma Portuguesa NP-581 [19].  (* ) $\delta = \frac{P1}{P1 + P2 - P3} \times 1000$
Verificou: Nepomuceno	
Data: 25-03-1998	



## **ANEXO A.2**

### **Fichas técnicas dos ligantes**

\*

(Cimento Portland Composto, Tipo II, Classe 32,5)

(Cimento Portland Normal, Tipo I, Classe 42,5R)



**SECIL**

Coordenação Regional Centro

**RESULTADOS DO AUTOCONTROLO  
VALORES MÉDIOS**

FÁBRICA: SECIL

BOLETIM N.º 54  
DATA: 98/01/21REFERÊNCIA: **CIMENTO TIPO – II 32,5****RESULTADOS COM REFERÊNCIA A NOVEMBRO****ENSAIOS MECÂNICOS**

Idade	Resistências (MPa)			
	Flexão		Compressão	
	Mensal	Anual	Mensal	Anual
2 d	4,4	4,0	20,9	19,0
7 d	6,0	5,9	31,5	29,9
28 d	7,3	7,5	41,5	41,1

**ANÁLISE QUÍMICA**

		Mensal	Anual
Perda ao Fogo %	P.F.	7,9	7,3
Resíduo Insolúvel %	RI	3,3	3,0
Óxido de Silício %	SiO <sub>2</sub>	19,10	19,49
Óxido de Alumínio %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,54	4,66
Óxido de Ferro %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,20	3,01
Óxido de Cálcio %	CaO	59,20	59,41
Óxido de Magnésio %	MgO	2,33	2,26
Sulfatos %	SO <sub>3</sub>	2,74	2,95
Óxido de Potássio %	K <sub>2</sub> O	---	---
Óxido de Sódio %	Na <sub>2</sub> O	---	---
Cloretos %	Cl <sup>-</sup>	0,01	0,01
Cal livre %		1,43	1,23
N/D %		1,02	0,97

**ENSAIOS FÍSICOS**

			Mensal	Anual
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )			3,04	3,05
Resíduo (%)	Peneiro (mm)	0,090	---	---
		0,045	14,3	13,0
Superfície Específica de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)			4381	4134
Água na Pasta Normal (%)			26,0	26,4
Tempo de Presa ao Ar (min)	Princípio		144	145
	Fim		189	188
Expansibilidade – Le Chatelier			0,7	0,7
Índice de Brancura (0 a 100)			---	---

**Observações:**

Anual – Valor médio dos últimos 12 meses

<b>SECIL</b> Coordenação Regional Centro	<b>RESULTADOS DO AUTOCONTROLO</b> <b>VALORES MÉDIOS</b>
---	--

FÁBRICA: SECIL

BOLETIM N.º 54  
DATA: 98/01/21

REFERÊNCIA: **CIMENTO TIPO – I 42,5R**  
**RESULTADOS COM REFERÊNCIA A NOVEMBRO**

**ENSAIOS MECÂNICOS**

Idade	Resistências (MPa)			
	Flexão		Compressão	
	Mensal	Anual	Mensal	Anual
2 d	5,9	6,0	33,0	29,8
7 d	7,6	7,9	46,0	43,7
28 d	8,4	9,2	56,6	57,5

**ANÁLISE QUÍMICA**

		Mensal	Anual
Perda ao Fogo %	P.F.	2,5	1,7
Resíduo Insolúvel %	RI	0,9	0,9
Óxido de Silício %	SiO <sub>2</sub>	19,96	20,97
Óxido de Alumínio %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,45	5,03
Óxido de Ferro %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,26	3,19
Óxido de Cálcio %	CaO	63,59	63,10
Óxido de Magnésio %	MgO	3,00	2,71
Sulfatos %	SO <sub>3</sub>	3,24	2,83
Óxido de Potássio %	K <sub>2</sub> O	---	---
Óxido de Sódio %	Na <sub>2</sub> O	---	---
Cloretos %	Cl <sup>-</sup>	0,01	0,01
Cal livre %		1,80	1,53
N/D %		0,44	0,61

**ENSAIOS FÍSICOS**

			Mensal	Anual
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )			3,16	3,18
Resíduo (%)	Peneiro	0,090	---	---
	(mm)	0,045	4,6	3,2
Superfície Específica de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)			3954	3843
Água na Pasta Normal (%)			28,8	28,9
Tempo de Presa ao Ar (min)	Princípio		102	104
	Fim		143	138
Expansibilidade – Le Chatelier			0,6	0,5
Índice de Brancura (0 a 100)			---	---

**Observações:**  
Anual – Valor médio dos últimos 12 meses

## **ANEXO A.3**

**Ficha técnica do aditivo**

**\***

**(Cinzas volantes)**



**CENTRAL TERMOELÉCTRICA DO PEGO**

**SEMANA:** 1997/36

**DIAS:** 01/09/97 – 07/09/97

**ENSAIOS DE CINZAS (SUMÁRIO)**

Data	Humidade (%)	Inqueimados (%)	Granulometria	
			> 75 µm	> 45 µm
18/08/97	0,10	6,1	16,0	27,3
19/08/97	0,10	6,2	16,0	27,0
20/08/97	0,10	6,4	15,5	26,9
21/08/97	0,09	6,1	14,7	26,9
22/08/97	0,10	6,3	15,6	27,0
<b>MÉDIA</b>	0,10	6,2	15,6	27,0
Observações:	CZ 32/97			
Amostra:	Silo Principal	Inqueimados (%)		
		Humidade (%)		

**ANÁLISE QUÍMICA**

Ref: CZ 31/97	Data: 11/08/97 a 15/08/97		
Humidade	0,12	Sílica (SiO <sub>2</sub> )	57,77
Inqueimados	7,20	Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	20,36
Granulometria (d>45 µm)	29,10	Ferro (FeO <sub>3</sub> )	7,64
Granulometria (d>75 µm)	16,00	Sódio (Na <sub>2</sub> O)	1,10
CaO Livre	0,00	Potássio (K <sub>2</sub> O)	2,44
CaO Total	1,82	Magnésio (MgO)	0,65
		Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	0,33
		Cloretos (Cl)	0,00
		Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,16
		Titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,67
Local da Amostra: Silo Principal – Amostra Média			



## **ANEXO A.4**

**Ficha técnica do adjuvante redutor de água**

**\***

**(Superplastificante)**

