

## **DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS**

## **CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS**

### **5.1 – Introdução**

Neste Capítulo serão discutidos os resultados obtidos e já apresentados no Capítulo anterior. Como o estudo baseou-se praticamente nos betões, será feita uma análise mais profunda nestes, tratando mais superficialmente os resultados das argamassas.

### **5.2 – Discussão dos resultados obtidos nas argamassas**

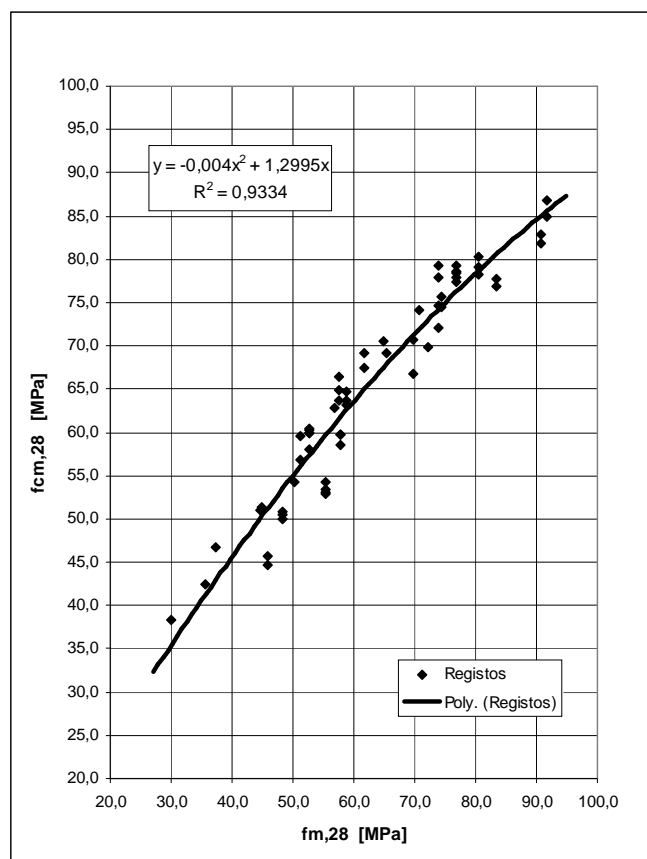
O estudo das argamassas dividiu-se em duas fases: estudo das argamassas no estado fresco e no estado endurecido. A primeira fase consistiu em obter uma argamassa com certos parâmetros reológicos ( $G_m=5,3$  a  $5,9$  e  $R_m=1,14$  a  $1,30\text{ s}^{-1}$ ) que conduzisse a um betão auto-compactável com um diâmetro médio de espalhamento entre 600 mm e 700 mm e um tempo de escoamento entre 10 e 20 segundos no Funil-V. A segunda fase consistiu em ensaiar provetes de 40 mm de aresta à compressão.

#### **5.2.1 – Estado fresco**

A argamassa estudada apresentou no estado fresco um comportamento adequado à obtenção de betões auto-compactáveis, nomeadamente em termos de capacidade de deformação (ensaio de espalhamento no cone para argamassas) e de velocidade de escoamento (ensaio no Funil-V para argamassas). Estes resultados puderam ser confirmados aquando da amassadura do betão, já que com esta argamassa facilmente se obtiveram os valores pretendidos para os betões, nomeadamente, quanto à capacidade de deformação (ensaio de espalhamento no cone para betões) e velocidade de escoamento (ensaio no Funil-V para betões).

#### **5.2.2 – Estado endurecido**

Os resultados dos ensaios à compressão das argamassas poderiam ter sido dispensados, já que apenas serviram para confirmar a relação entre a resistência da argamassa e a resistência previsível para o betão produzido com essa argamassa com recurso ao método proposto por Nepomuceno [13]. Essa relação pode ser observada no gráfico da Figura 5.1 proposto por Nepomuceno [13]. De facto, verifica-se que uma argamassa com a resistência média à compressão aos 28 dias de 50 MPa, produzirá um betão com resistência média aos 28 dias de 55 MPa. Recordar-se que a argamassa ensaiada apresentou uma resistência de 50,47 MPa aos 28 dias e que o betão com ela produzido apresentou em termos médios 55,64 MPa, também aos 28 dias. Ambos os provetes (argamassas e betões) foram sujeitos a cura normalizada.



**Figura 5.1** – Relação entre as resistências das argamassas e dos betões aos 28 dias [13]

### 5.3 – Discussão dos resultados obtidos nos betões

Serão abordados nos Sub-Capítulos seguintes os resultados obtidos para os betões no seu estado fresco como também no seu estado endurecido. No seu estado fresco, a discussão de resultados será mais profunda devido ao facto de haver muitos mais dados para tratar, enquanto no seu estado endurecido resume-se apenas à discussão da sua resistência à compressão.

#### 5.3.1 – Estado fresco

Com a necessidade de usar o mesmo betão para as várias restrições no ensaio da “Caixa-L” e assim reduzir o número de ensaios a realizar, foi necessário tomar algumas precauções para que esse betão não sofresse alterações significativas, capazes de afectar os resultados obtidos. Nesta medida, uma vez que a mesma amassadura foi ensaiada quatro vezes, fazendo-a passar por cada uma das quatro restrições usadas, foi necessário minimizar a possível perda de pasta que poderia ficar aderente à superfície do cone, da mesa de espalhamento, da Caixa-L ou mesmo do balde usado para transportar o betão. Por outro lado, após cada ensaio na Caixa-L, a mistura era amassada cerca de dois minutos de forma enérgica para se recuperar a trabalhabilidade inicial. Quando necessário, foram efectuados ligeiros acertos do superplastificante, em dosagens praticamente insignificantes, para facilitar a recuperação da trabalhabilidade inicial. De qualquer forma, após cada correcção procedeu-se sempre a uma nova

medição do diâmetro de espalhamento, uma vez que se sabia de antemão que a alteração do diâmetro de espalhamento afectaria o resultado medido na Caixa-L.

Tal como se referiu, as variações do diâmetro de espalhamento são susceptíveis de afectar os resultados no ensaio da Caixa-L, como demonstrou Nepomuceno [13]. Nesta medida, só seria possível comparar os resultados obtidos na passagem pelas diferentes restrições em betões com as mesmas propriedades de escoamento. Com a correcção efectuada nos betões em cada amassadura, foi possível obter diâmetros de espalhamento que apresentavam variações muito pequenas. Ainda assim, foi necessário investigar a forma como se poderia minimizar esse efeito. Essa resposta foi encontrada com recurso à análise efectuada por Nepomuceno na sua tese de doutoramento [13].

Nepomuceno [13] na sua tese de doutoramento relacionou o parâmetro  $H2/H1$  com o diâmetro de espalhamento para cada valor de MN, conforme se ilustra graficamente na Figura 5.2, produzindo equações para cada um dos valores de MN adoptados. Recorda-se que a um mesmo valor de MN corresponde sensivelmente um mesmo valor total de agregados ou, indirectamente, um mesmo volume de pasta. Note-se ainda que todos os betões que constam no gráfico da Figura 5.2 cumpriram os parâmetros reológicos relativos à capacidade de deformação e à velocidade de escoamento.

Uma observação mais detalhada da Figura 5.2 permite inferir que a inclinação das rectas que relacionam os parâmetros  $D_m$  e  $H2/H1$  mantém um padrão bem definido, o que pode indiciar que, independentemente da constituição do betão, a inclinação da recta pode traduzir essa relação de um modo satisfatório. Isto significa que conhecido um ponto no gráfico, ou seja, um par de valores de  $D_m$  e  $H2/H1$ , é possível construir a equação da recta que passa por esse ponto e, desta forma, estimar os valores de  $H2/H1$  para outros valores de  $D_m$ .

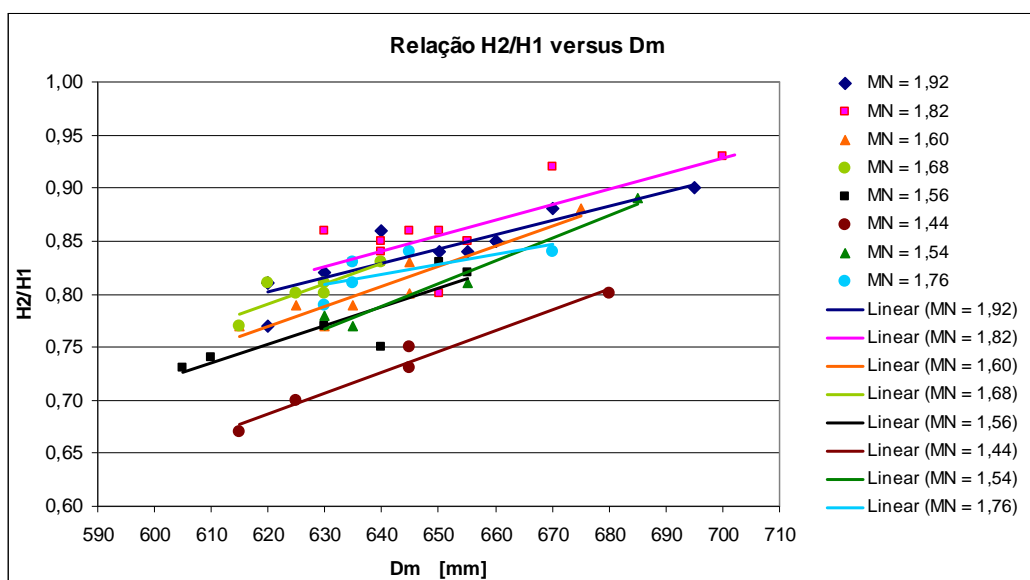


Figura 5.2 – Variação do parâmetro  $H2/H1$  com o diâmetro de espalhamento [13]

No presente trabalho optou-se por determinar a inclinação média das rectas apresentadas por Nepomuceno. Os resultados obtidos são ilustrados no Quadro 5.1

**Quadro 5.1** - Inclinação média das rectas de todos os valores de MN

<b>MN</b>	<b>i (inclinação)</b>
1,92	0,001348
1,82	0,001460
1,76	0,000942
1,68	0,001870
1,60	0,001898
1,56	0,001789
1,54	0,002134
1,44	0,001956
<b>Média = 0,001675</b>	

Assim, por exemplo, a equação da recta que passa pelo par de valores  $D_m=700$  mm e  $H_2/H_1=0,79$  pode ser determinada da seguinte forma:

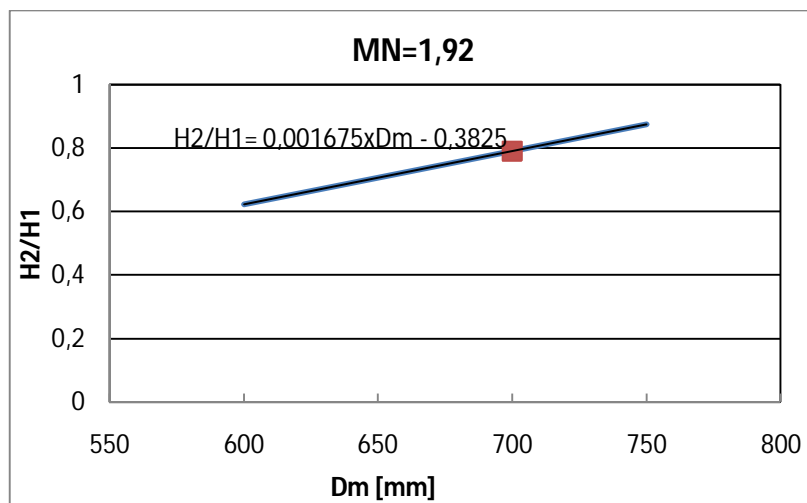
$$H_2/H_1 = 0,001675 \times D_m + C \quad (5.1)$$

Substituindo os valores de  $H_2/H_1$  e  $D_m$  na expressão obtêm-se um valor para a constante C igual a - 0,3825. Por fim, a equação toma a seguinte forma:

$$H_2/H_1 = 0,001675 \times D_m - 0,3825 \quad (5.2)$$

Desta forma é possível estimar o valor aproximado de  $H_2/H_1$  quando se varia o valor de  $D_m$ , como também se pode verificar graficamente pela Figura 5.3.

Posteriormente, apresentam-se no Quadro 5.2 ao Quadro 5.5 os dados relativos à constante C para todos os 16 pares de valores de  $H_2/H_1$  e  $D_m$  obtidos nos ensaios, bem como a respectiva equação da recta associada ao respectivo valor de MN.



**Figura 5.3** – Exemplo da determinação da recta através do Excel

**Quadro 5.2** – Dados relativos à constante C para a restrição 1

<b>Restrição 1 (34 mm)</b>				
<b>Dm</b>	<b>H2/H1</b>	<b>MN</b>	<b>C (Equação da recta)</b>	<b>Equação da recta</b>
664,5	0,784	1,92	-0,3288	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,3288$
677,0	0,804	1,84	-0,3296	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,3296$
665,0	0,767	1,76	-0,3466	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,3466$
613,0	0,708	1,68	-0,3190	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,3190$

**Quadro 5.3** – Dados relativos à constante C para a restrição 2

<b>Restrição 2 (64 mm)</b>				
<b>Dm</b>	<b>H2/H1</b>	<b>MN</b>	<b>C (equação da recta)</b>	<b>Equação da recta</b>
608,5	0,770	1,92	-0,2490	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2490$
705,0	0,853	1,84	-0,3280	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,3280$
615,5	0,780	1,76	-0,2507	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2507$
623,0	0,714	1,68	-0,3290	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,3290$

**Quadro 5.4** – Dados relativos à constante C para a restrição 3

<b>Restrição 3 (94 mm)</b>				
<b>Dm</b>	<b>H2/H1</b>	<b>MN</b>	<b>C (equação da recta)</b>	<b>Equação da recta</b>
666,5	0,900	1,92	-0,2161	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2161$
695,0	0,913	1,84	-0,2508	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2508$
660,0	0,827	1,76	-0,2787	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2787$
607,5	0,772	1,68	-0,2451	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2451$

**Quadro 5.5** – Dados relativos à constante C para a restrição 4

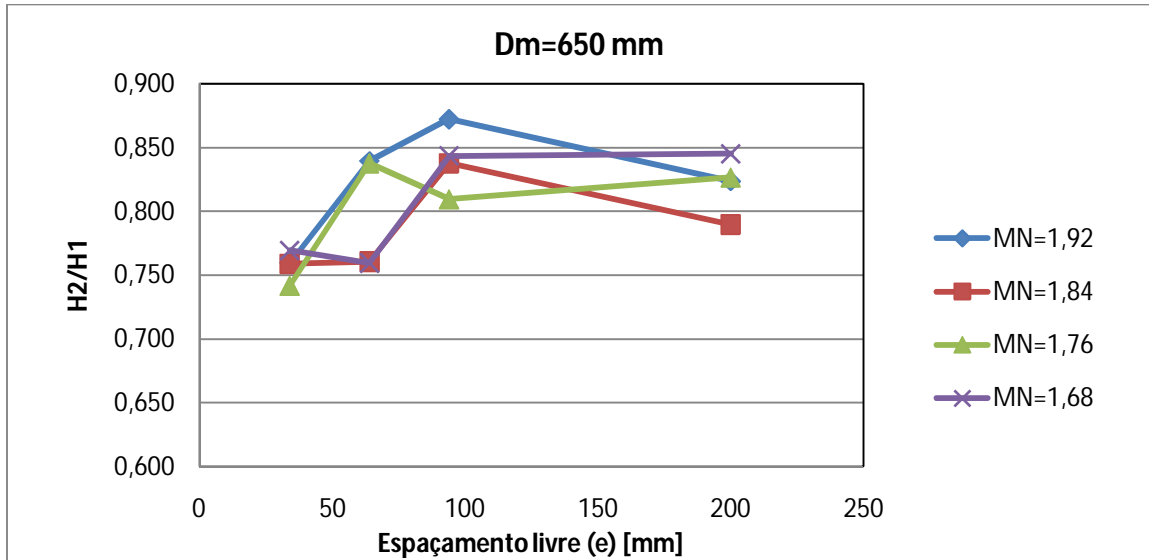
<b>Restrição 4 (200 mm)</b>				
<b>Dm</b>	<b>H2/H1</b>	<b>MN</b>	<b>c (equação da recta)</b>	<b>Equação da recta</b>
655,5	0,833	1,92	-0,2647	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2647$
705,0	0,882	1,84	-0,2989	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2989$
636,5	0,804	1,76	-0,2618	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2618$
696,5	0,923	1,68	-0,2433	$H2/H1 = 0,001675 \times Dm - 0,2433$

Face ao exposto, para as análises que se seguem, faz todo o sentido que os valores de H2/H1 correspondam a betões com o mesmo diâmetro de espalhamento, sendo escolhido neste caso um Dm = 650 mm pois é o valor intermédio do intervalo [600 mm, 700 mm] em que se considera um betão auto-compactável. Sendo assim, apresenta-se no Quadro 5.6 os resultados de H2/H1 na “Caixa-L” estimados através das respectivas equações das rectas para um diâmetro médio de 650 mm e para os diversos valores de MN e respectivas restrições.

Por definição, o parâmetro MN representa o produto entre os parâmetros Vp/Vs e Vm/Vg. Uma vez que o parâmetro Vp/Vs foi assumido como constante ( $Vp/Vs = 0,80$ ), a valores maiores de MN corresponderão valores maiores de Vm/Vg e, em consequência, menores volumes absolutos de agregados grossos. Deste modo, no presente estudo, foi possível avaliar a relação entre os valores de H2/H1 obtidos nas diferentes restrições quando se utilizam diferentes volumes de agregados grossos. Essa análise é ilustrada na Figura 5.4, onde no eixo das abcissas é representado o espaçamento livre entre varões na Caixa-L e no eixo das ordenadas o respectivo valor de H2/H1 obtido nesse mesmo ensaio.

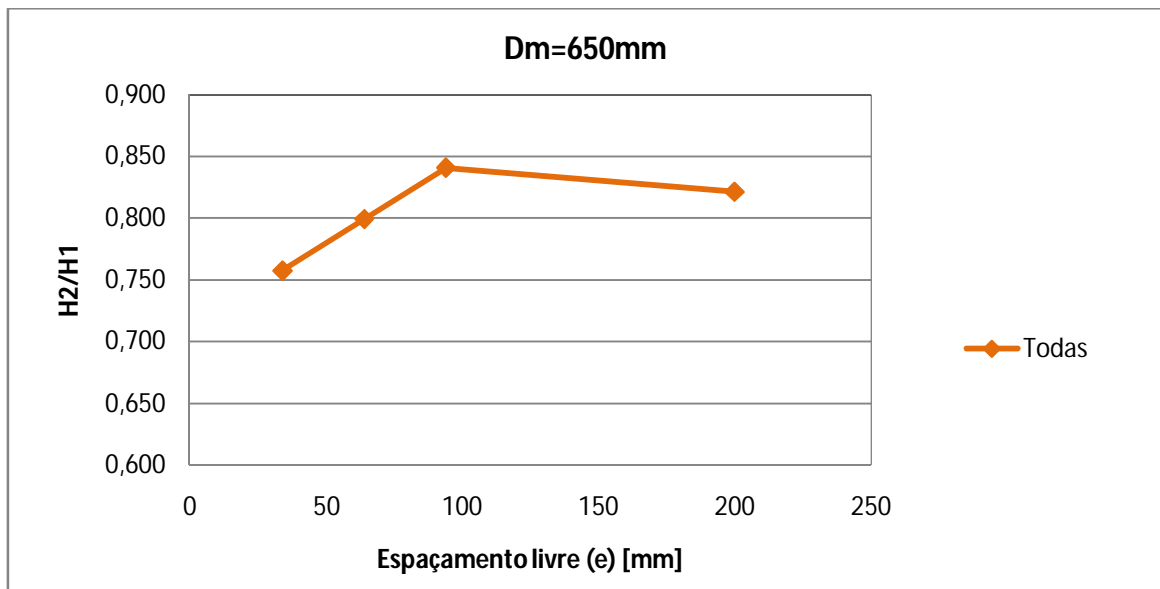
**Quadro 5.6** – Valores estimados de H2/H1 para um Dm=650mm

<b>Dm=650 mm</b>	<b>e [mm]</b>	<b>(H2/H1)</b>
<b>MN 1,92</b>	R1 (34 mm)	0,760
	R2 (64 mm)	0,839
	R3 (94 mm)	0,872
	R4 (200 mm)	0,824
<b>MN 1,84</b>	R1 (34 mm)	0,759
	R2 (64 mm)	0,761
	R3 (94 mm)	0,838
	R4 (200 mm)	0,790
<b>MN 1,76</b>	R1 (34 mm)	0,742
	R2 (64 mm)	0,838
	R3 (94 mm)	0,810
	R4 (200 mm)	0,827
<b>MN 1,68</b>	R1 (34 mm)	0,770
	R2 (64 mm)	0,760
	R3 (94 mm)	0,843
	R4 (200 mm)	0,845



**Figura 5.4** – Espaçamento livre (e) Vs H2/H1 para cada MN

Na análise efectuada no presente trabalho os resultados podem ser considerados ainda escassos para uma conclusão mais acertada relativamente ao efeito que a variação do parâmetro MN produz na relação entre os valores de H2/H1 e o espaçamento livre entre varões. Ainda assim, é possível observar na Figura 5.4, em termos médios, uma tendência para o aumento do valor de H2/H1 quando o espaçamento livre entre varões aumenta, o que seria aliás previsível. Nesta medida, optou-se por efectuar uma análise em termos médios, independentemente do valor de MN. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.5 e ilustram a tendência já referida.



**Figura 5.5** – Espaçamento livre (e) Vs H2/H1 para todos os valores de MN

A análise da Figura 5.5 mostra uma evidência clara e aparentemente linear de aumento do valor de  $H2/H1$  com o aumento do espaçamento livre entre varões na Caixa-L, quando se adoptaram restrições de 34, 64 e 94 mm. Não obstante, parece evidenciar-se uma redução do valor de  $H2/H1$  quando foram retiradas todas as restrições, ou seja, quando o espaço livre para escoamento corresponde à largura total da Caixa-L (200 mm). Este facto, era de todo imprevisível e presumivelmente poderá dever-se a uma alteração no próprio regime de escoamento, que ao passar de um regime laminar para um regime turbulento, propicia um maior contacto entre as partículas, com conseqüente perda de energia interna necessária ao escoamento.

Na prossecução dos objectivos do presente trabalho, realizou-se uma análise entre os valores de  $H2/H1$  obtidos na Caixa-L para as diferentes restrições. Essa análise foi efectuada, introduzindo-se o conceito de Factor de Conversão, ou seja, um factor que permita converter o valor de  $H2/H1$  obtido numa determinada restrição para o valor correspondente de outra restrição. Os factores de conversão (FC) entre a restrição R1 e as restantes restrições, para cada valor de MN, são apresentados do Quadro 5.7 ao Quadro 5.9. As Figuras 5.6 e 5.7 ilustram graficamente os resultados obtidos.

**Quadro 5.7 – Factores de conversão entre as restrições R1 e R2**

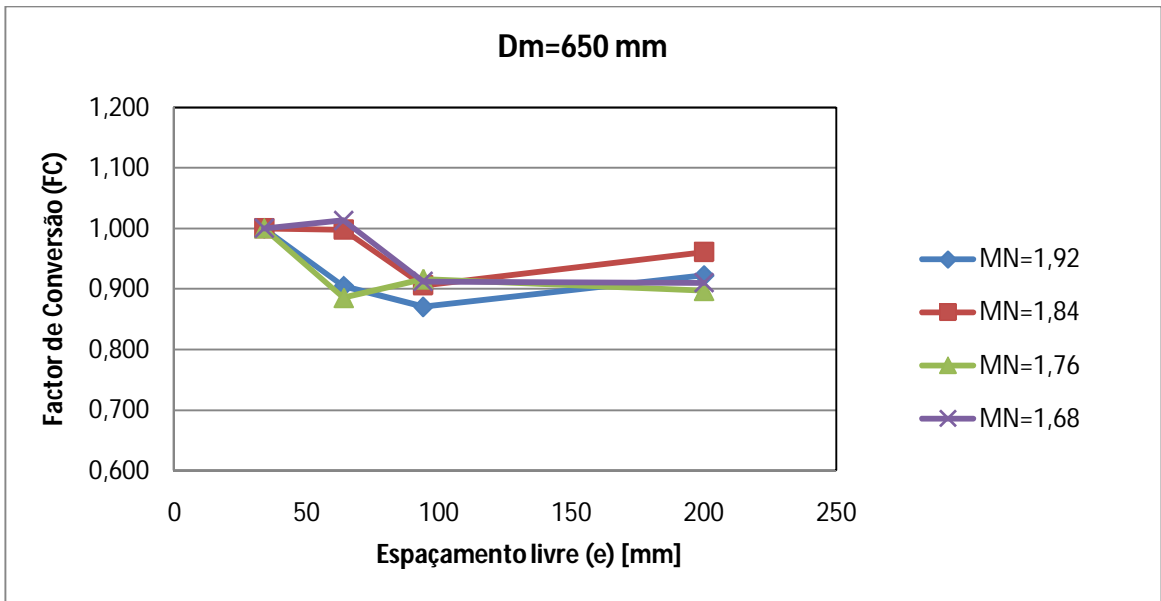
R1-R2				
MN	$(H2/H1)_1$	$(H2/H1)_2$	FC	$FC_{R2/R1}$
1,920	0,760	0,839	0,905	0,951
1,840	0,759	0,761	0,998	
1,760	0,742	0,838	0,886	
1,680	0,770	0,760	1,013	

**Quadro 5.8 – Factores de conversão entre as restrições R1 e R3**

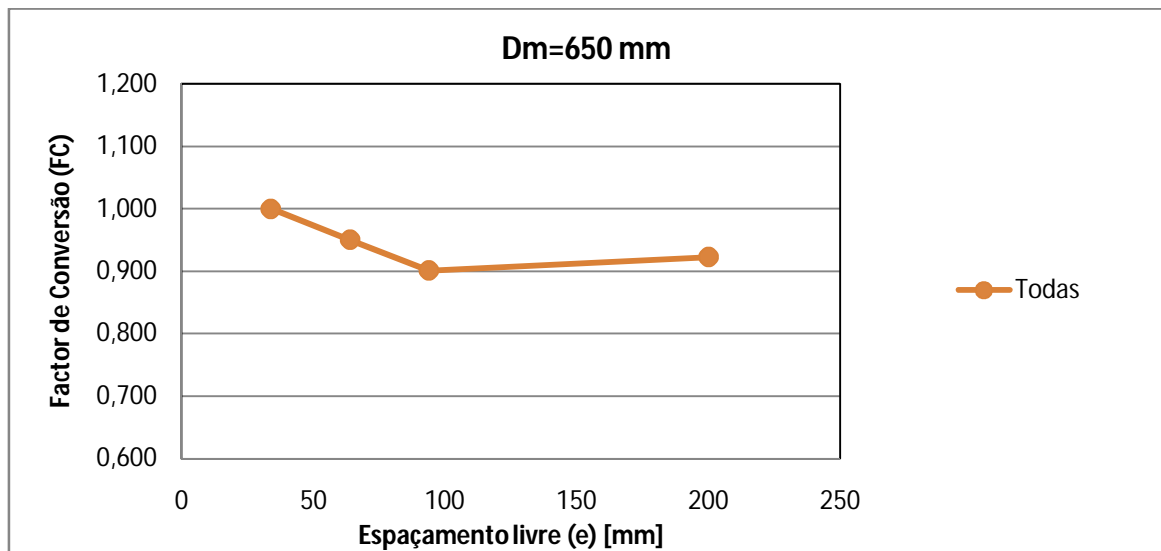
R1-R3				
MN	$(H2/H1)_1$	$(H2/H1)_3$	FC	$FC_{R3/R1}$
1,920	0,760	0,872	0,871	0,901
1,840	0,759	0,838	0,906	
1,760	0,742	0,810	0,916	
1,680	0,770	0,843	0,912	

**Quadro 5.9 – Factores de conversão entre as restrições R1 e R4**

R1-R4				
MN	$(H2/H1)_1$	$(H2/H1)_4$	FC	$FC_{R4/R1}$
1,920	0,760	0,824	0,922	0,923
1,840	0,759	0,790	0,961	
1,760	0,742	0,827	0,897	
1,680	0,770	0,845	0,910	



**Figura 5.6** – Espaçamento livre (e) Vs FC para cada MN



**Figura 5.7** – Espaçamento livre (e) Vs FC para todos os valores de MN

Observando as Figuras 5.6 e 5.7, verifica-se que existe uma tendência inversa daquela já explicada para os valores de  $H2/H1$ , como seria de esperar. A análise efectuada aos factores de conversão permitiu observar que a partir da restrição R3 (94 mm) o valor de FC tende a subir ligeiramente. Não obstante, no âmbito do presente trabalho, assumiu-se esse pequeno acréscimo como sendo pouco significativo, conduzindo à opção de eliminar a restrição R4, assumindo-se que o valor estabiliza a partir da restrição R3. De qualquer forma, por se considerar que os resultados são ainda em número insuficiente para conclusões mais acertadas, optou-se por assumir que o factor de conversão a adoptar para a restrição R3 deverá corresponder ao valor mais elevado obtido para as duas restrições R3 e R4, ou seja, o valor do factor de conversão correspondente à restrição R3 assume o valor do factor de conversão correspondente à restrição R4 por este ser

maior (mais conservador). Em consequência, obtiveram-se os factores de conversão que se ilustram no Quadro 5.10.

**Quadro 5.10** – Factores de conversão finais para as diversas restrições

Factor de Conversão	Equações
FC1 = 1,000	$(H2/H1)_{R1} = FC1 \times (H2/H1)_{R1}$
FC2 = 0,951	$(H2/H1)_{R1} = FC2 \times (H2/H1)_{R2}$
FC3 = 0,923	$(H2/H1)_{R1} = FC3 \times (H2/H1)_{R3}$

A utilidade dos factores de conversão pode ser traduzida da forma que se segue. Se o objectivo for o de obter um betão auto-compactável para uma estrutura em que o espaçamento livre entre varões seja semelhante ao proporcionado pela restrição R3, o valor de H2/H1 para esta restrição deve ser igual ou superior a 0,80. Para se estimar o valor de H2/H1 para a restrição R1, bastará multiplicar o valor de H2/H1 a obter na restrição R3 pelo factor de conversão correspondente (FC=0,923). O mesmo acontece para o caso de uma estrutura em que o espaçamento livre seja igual a R2, alterando apenas o facto de multiplicarmos o valor pretendido para a restrição R2 pelo correspondente factor de conversão (0,951).

### 5.3.2 – Estado endurecido

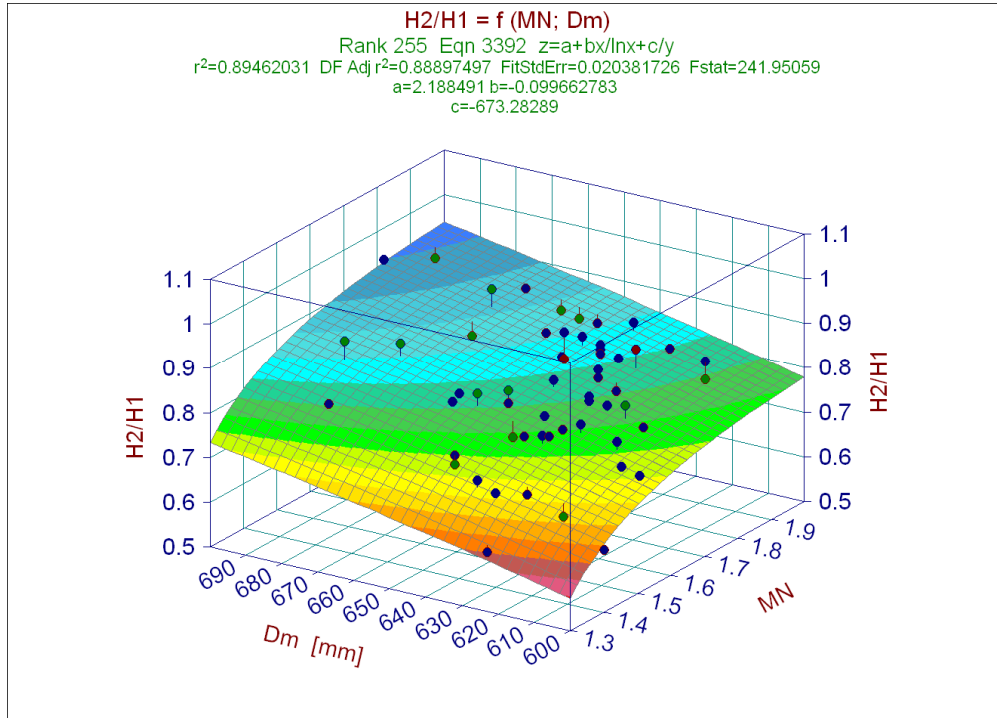
A discussão dos resultados obtidos nos betões no estado endurecido resume-se aos ensaios de compressão de provetes. Observando os Quadros 4.10 e 4.11 do Capítulo anterior, nota-se que, à excepção do betão com um  $V_m/V_g=2,3$  que obteve uma resistência média à compressão aos 28 dias de 53,33 MPa, todos os outros obtiveram uma resistência média à compressão aos 28 dias superior a 55 MPa, comprovando a correlação proposta por Nepomuceno [13] e apresentada na Figura 5.1, onde uma resistência média à compressão de 50,47 em provetes de argamassas conduz a um betão com uma resistência média à compressão de aproximadamente 55 MPa.

### 5.4 – Proposta de adequação do método de Nepomuceno

Na sua tese de doutoramento, Nepomuceno [13] propôs um modelo matemático que permite estimar o parâmetro de auto-compactabilidade H2/H1 medido na Caixa-L para a restrição R1 (espaçamento livre de 34 mm entre varões de 12 mm de diâmetro), em função do parâmetro da mistura MN e do parâmetro associado à capacidade de deformação Dm. Nesse estudo, o tempo de escoamento no Funil-V situou-se entre os 10 e os 20 segundos, o diâmetro médio de espalhamento Dm variou de 600 mm a 700 mm, o parâmetro H2/H1 variou de 0,5 a 1,0, a máxima dimensão do agregado mais grosso do betão foi de 19,1 mm e as curvas granulométricas de referência dos agregados finos e dos agregados grossos mantiveram-se constantes.

No método proposto por Nepomuceno [13], o parâmetro MN representa o produto entre os parâmetros  $V_m/V_g$  e  $V_p/V_s$ . O referido modelo, obtido no programa estatístico TCURVE-3D, é

traduzido graficamente na Figura 5.8 e analiticamente pela Equação 5.4, apresentando um coeficiente de correlação próximo de 0,90. Na Equação 5.4, as constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$  assumem os seguintes valores:  $a= 2,188490958$ ;  $b= -0,09966278$  e  $c= -673,282885$ .



**Figura 5.8** – Modelo matemático para a auto-compactabilidade – “Caixa-L” [13]

$$\left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} = a + b \times \frac{MN}{\ln(MN)} + \frac{c}{Dm} \quad (5.4)$$

A Equação proposta por Nepomuceno [13] pode ser escrita em ordem a MN. No entanto, tratando-se de uma equação de solução indeterminada, recorreu-se de novo ao programa TCURVE-3D para expressar MN em função de Dm e de H2/H1, tendo-se obtido a Equação 5.5, que se assume com o mesmo coeficiente de correlação da ordem de 0,90 e onde as constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$  e  $g$  assumem os seguintes valores:  $a=1,2213966$ ;  $b=-1,3604971$ ,  $c=1,3099101$ ;  $d=-0,0017575777$ ;  $e=-1,0183721$ ;  $f=1,0855295$  e  $g=-0,0015239443$ .

$$MN = \frac{a + b \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} + c \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1}^2 + d \times (Dm)}{1 + e \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} + f \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1}^2 + g \times (Dm)} \quad (5.5)$$

Sabendo que MN é o produto de  $Vp/Vs$  por  $Vm/Vg$ , a Equação 5.5 pode ser escrita em ordem a  $Vm/Vg$ , permitindo calcular o valor da razão  $Vm/Vg$  para a restrição R1, conforme se indica na Equação 5.6.

$$\left(\frac{V_m}{V_g}\right) = \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \times \frac{a + b \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R1} + c \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R1}^2 + d \times (D_m)}{1 + e \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R1} + f \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R1}^2 + g \times (D_m)} \quad (5.6)$$

No âmbito da presente dissertação foram estabelecidas relações empíricas entre os valores de H2/H1 obtidos na Caixa-L para as restrições R2 e R3 e os valores de H2/H1 obtidos na Caixa-L para a restrição R1. Essas relações, que são reproduzidas nas Equações 5.7 e 5.8, devem ser encaradas como exploratórias, já que carecem de um maior número de ensaios que permitam melhorar o grau de certeza sobre os factores de conversão (FC) obtidos. Nas Equações 5.7 e 5.8, as siglas *FC2* e *FC3* representam os factores de conversão.

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R1} = FC_2 \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R2} \quad (5.7)$$

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R1} = FC_3 \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R3} \quad (5.8)$$

Partindo do pressuposto que as Equações 5.7 e 5.8 traduzem convenientemente o efeito das diferentes restrições sobre os valores de H2/H1, na ausência de bloqueio nas armaduras e de segregação dinâmica do betão, a Equação 5.6 pode ser escrita para os níveis de restrição R2 e R3, respectivamente, pelas Equações 5.9 e 5.10, onde as constantes *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* e *g* têm o mesmo significado já descrito na Equação 5.2.

$$\left(\frac{V_m}{V_g}\right) = \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \times \frac{a + b \times FC_2 \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R2} + c \times \left(FC_2 \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R2}\right)^2 + d \times (D_m)}{1 + e \times FC_2 \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R2} + f \times \left(FC_2 \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R2}\right)^2 + g \times (D_m)} \quad (5.9)$$

$$\left(\frac{V_m}{V_g}\right) = \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \times \frac{a + b \times FC_3 \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R3} + c \times \left(FC_3 \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R3}\right)^2 + d \times (D_m)}{1 + e \times FC_3 \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R3} + f \times \left(FC_3 \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{R3}\right)^2 + g \times (D_m)} \quad (5.10)$$

Com o intuito de facilitar a implementação prática das opções anteriormente descritas, procedeu-se à adequação da folha de cálculo proposta por Nepomuceno [13], introduzindo a possibilidade do cálculo automático do parâmetro *Vm/Vg*, uma vez definido o obstáculo que melhor traduz a obstrução na estrutura a betonar (R1, R2 ou R3) e ainda os valores de *Dm* e de H2/H1 pretendidos. O parâmetro *Vp/Vs* resulta do cálculo da argamassa previamente estudada,



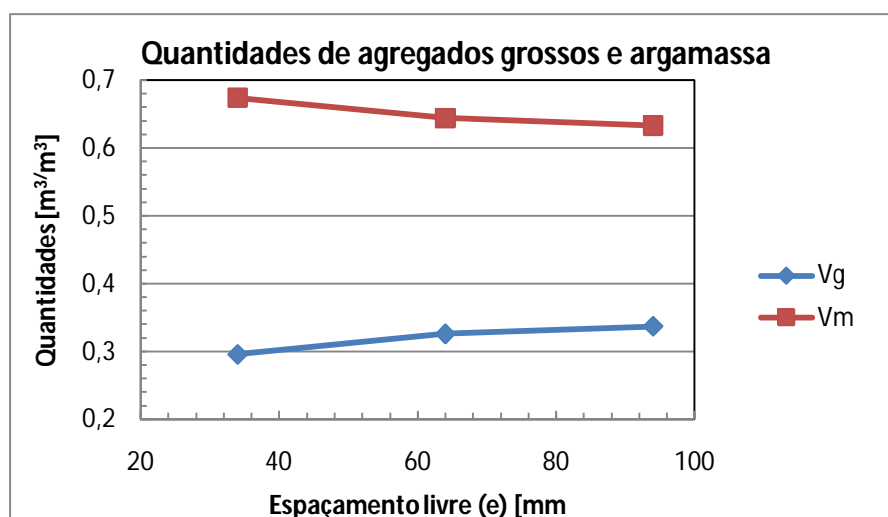
No sentido mais lato do termo, poderá afirmar-se que a adequação proposta permite obter um betão com a mesma trabalhabilidade quando este é sujeito a diferentes níveis de restrição impostos por diferentes espaçamentos entre as armaduras.

No Quadro 5.12 apresentam-se os resultados de uma simulação da resposta da folha de cálculo para um betão estudado para três aplicações diferentes, traduzidas por três valores diferentes do espaçamento livre entre armaduras, correspondentes às restrições R1, R2 e R3. O betão apresenta em comum os mesmos materiais, a mesma resistência e a mesma trabalhabilidade. O cálculo detalhado desses betões é apresentado no Anexo.A.2.

**Quadro 5.12** – Análise comparativa de betões com a mesma trabalhabilidade e resistência

	Vm [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Vg [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Vp [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Vs [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	W [l/m <sup>3</sup> ]	C [Kg/m <sup>3</sup> ]	FC [Kg/m <sup>3</sup> ]	Sp [l/m <sup>3</sup> ]
R1	0,674	0,296	0,228	0,285	159,40	286,01	371,64	2,38
R2	0,644	0,326	0,217	0,272	152,21	273,10	354,86	2,27
R3	0,633	0,337	0,214	0,267	149,61	268,43	348,79	2,23

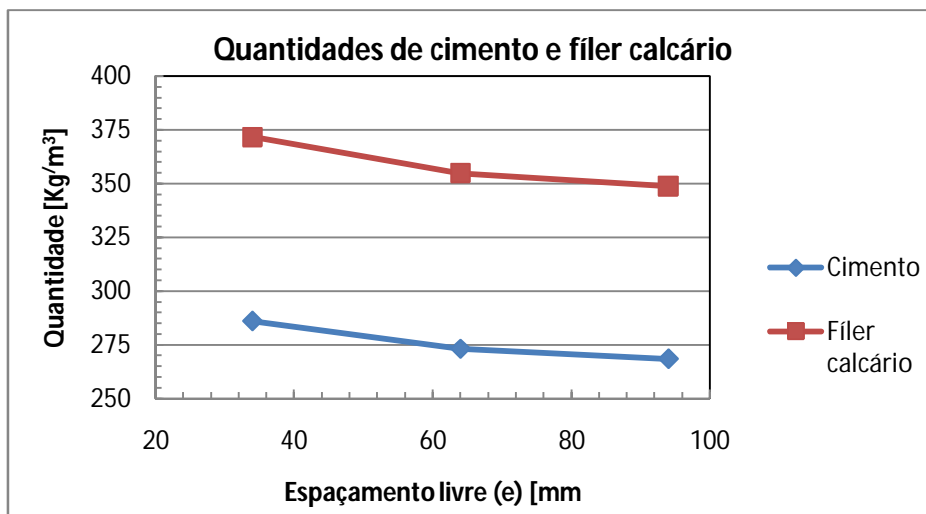
Os resultados apresentados no Quadro 5.12 são ilustrados graficamente na Figura 5.9, expressando as variações dos volumes absolutos de agregados grossos (Vg) e de argamassa (Vm), em função do espaçamento livre entre varões. Na Figura 5.9 observa-se que o volume absoluto de agregados grossos da mistura registou um aumento de 10,14%, quando se passou da restrição R1 (34 mm) para a restrição R2 (64 mm) e de 13,85% quando se passou da restrição R1 (34 mm) para a restrição R3 (94 mm). Em consequência, o volume absoluto de argamassa reduziu 4,45% e 6,08%, quando se passou, respectivamente, da restrição R1 para as restrições R2 e R3.



**Figura 5.9** – Variação das dosagens de Vg e Vm em função do espaçamento livre entre varões

Na Figura 5.10 analisa-se a redução das dosagens em massa de cimento e de filer calcário quando se fez variar o espaçamento livre entre varões. Note-se que na passagem da restrição R1 para a restrição R3 houve uma redução de aproximadamente 18 kg/m<sup>3</sup> de cimento e

de 23 kg/m<sup>3</sup> de fíler calcário. Do Quadro 5.12 também é possível constatar uma redução de 0,15 l/m<sup>3</sup> de adjuvante na passagem da restrição R1 para a restrição R3.



**Figura 5.10** – Relação entre quantidades de C e FC com o espaçamento livre entre varões

A comparação entre os resultados obtidos neste estudo e as indicações fornecidas pela JCSE [3,12], que se transcrevem novamente no Quadro 5.13, permitem concluir que ambos apresentam um quadro de requisitos funcionais com três níveis de auto-compactabilidade. As principais diferenças residem nas condições estruturais e na forma de obtenção dos agregados grossos. Nas condições estruturais, o intervalo de valores para espaçamento mínimo entre varões no nível de auto-compactabilidade 1 ou R1 é muito semelhante, sendo já nos outros dois níveis muito diferentes. O método da JSCE [3, 12] considera que o espaçamento mínimo entre varões a partir de 200 mm já não influencia a composição do betão enquanto neste trabalho se considera que é a partir dos 93 mm de espaçamento mínimo entre os varões que a composição do betão e respectivos requisitos de auto-compactabilidade não se alteram. Já na forma de obtenção dos agregados grossos, o método da JSCE [3, 12] estabelece intervalos de volume de agregados grossos para cada nível de auto-compactabilidade, enquanto no presente trabalho esse valor é determinado pelas equações desenvolvidas em função dos parâmetros de auto-compactabilidade pretendidos.

Na comparação entre a proposta aqui desenvolvida e o método proposto pela JSCE [3, 12] é possível estabelecer-se o seguinte paralelismo:

- a) No Quadro 5.12, para a restrição R1, que se situa entre os 34 mm e os 63 mm, o volume absoluto de agregados grossos obtido foi de 0,296 m<sup>3</sup>. No caso da JSCE (Quadro 5.13), para uma restrição entre os 35 e os 60 mm, o intervalo admissível para o volume de agregados grossos situa-se entre os 0,28 e os 0,30 m<sup>3</sup>. O intervalo obtido neste estudo enquadra-se na proposta da JSCE.
- b) No Quadro 5.12, para a restrição R2, que se situa entre os 64 mm e os 93 mm, o volume absoluto de agregados grossos obtido foi de 0,326 m<sup>3</sup>. No caso da JSCE (Quadro 5.13), para

essa restrição entre os 60 e os 200 mm, o intervalo admissível para o volume de agregados grossos situa-se entre os 0,30 e os 0,33 m<sup>3</sup>. Também neste caso, o resultado obtido neste estudo se enquadra na proposta da JSCE.

- c) No Quadro 5.12, para a restrição R3, que corresponde a uma restrição superior a 93 mm, o volume absoluto de agregados grossos obtido foi de 0,337 m<sup>3</sup>. No caso da JSCE (Quadro 5.13), para uma restrição superior ou igual a 200 mm, o intervalo admissível para o volume de agregados grossos situa-se entre os 0,32 e os 0,35 m<sup>3</sup>. Mais uma vez, os resultados obtidos no presente trabalho enquadram-se na proposta de JSCE.

**Quadro 5.13 - Requisitos funcionais e de auto-compactabilidade [3]**

Nível de Auto-compactabilidade		1	2	3
Condições estruturais	Espaçamento mínimo entre varões, em mm	35 a 60	60 a 200	≥ 200
	Densidade de armadura nos elementos estruturais, em kg/m <sup>3</sup>	≥ 350	100 a 350	≤ 100
Altura de enchimento no ensaio da “Caixa-U” ou “Caixa” (H), em mm		≥ 300 Obstáculo R1	≥ 300 Obstáculo R2	≥ 300 Obstáculo R3
Volume de agregado grosso, por unidade de volume de betão (Vg), em m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		0,28 a 0,30	0,30 a 0,33	0,32 a 0,35
Diâmetro médio de espalhamento do betão no ensaio “Slump-flow” (Dm), em mm		600 a 700	600 a 700	500 a 650
Resistência à segregação	Tempo de escoamento no ensaio de fluidez do betão (t), em segundos	9 a 20	7 a 13	4 a 11
	Tempo que o betão demora a atingir um diâmetro de espalhamento de 500 mm (T50), em segundos	5 a 20	3 a 15	3 a 15

Por fim, em resultado do estudo efectuado no presente trabalho, apresenta-se no Quadro 5.14 a síntese da adequação do estudo da composição dos betões visando a sua aplicação a elementos estruturais com diferentes requisitos de auto-compactabilidade, em consequência da variação da restrição na passagem pelas armaduras.

**Quadro 5.14 – Níveis de auto-compactabilidade e parâmetros de cálculo**

Parâmetros de cálculo		Nível de auto-compactabilidade		
		R1	R2	R3
Condições estruturais	Espaçamento mínimo entre varões, em mm	34 a 63	64 a 93	≥ 93
	Máxima dimensão do agregado mais grosso presente no betão, em mm	19,1	19,1	19,1
Propriedades do betão fresco	Tempo de escoamento do betão no Funil-V (t), em segundos	10 a 20	10 a 20	10 a 20
	Diâmetro médio de espalhamento do betão “Slump-flow” (Dm), em mm	600 a 700	600 a 700	600 a 700
	Parâmetro H2/H1 na “Caixa-L”, em mm	≥ 0,80 Obstáculo R1	≥ 0,80 Obstáculo R2	≥ 0,80 Obstáculo R3
Parâmetros da argamassa	Parâmetros Vp/Vs e “família de finos”	Estudos em argamassas em função dos materiais disponíveis e resistência média pretendida		
	Parâmetros Vw/Vp e Sp/p%	Estudos em argamassas visando as propriedades reológicas adequadas ao betão auto-compactável		
	Fracções unitárias dos agregados finos	As fracções unitárias dos diferentes agregados finos resultam da melhor aproximação à curva de referência estabelecida para os agregados finos.		
Parâmetros do betão	Fracções unitárias dos agregados grossos	As fracções unitárias dos diferentes agregados grossos resultam da melhor aproximação à curva de referência estabelecida para os agregados grossos.		
	Volume de vazios do betão Vv, em m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Em betões sem introdutores de ar, salvo melhor indicação, adoptar o valor fixo de 0,030 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		
	Relação entre o volume de agregado grosso e o volume de argamassa, Vm/Vg, em m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	A razão Vm/Vg é estimada em função da razão Vp/Vs da argamassa, das propriedades pretendidas para o betão no estado fresco (Dm e H2/H1) e do obstáculo seleccionado (R1, R2 ou R3).		

## **5.5 – Avaliação da otimização técnica e económica**

### **5.5.1 – Introdução**

Neste Sub-Capítulo serão determinados os custos de produção (custo apenas da matéria-prima) de betões auto-compactáveis, tendo em conta o espaçamento livre entre varões, isto é, para cada restrição. Os custos de produção do betão auto-compactável serão comparados com os custos de produção de betões convencionais vibrados de resistência equivalente.

### **5.5.2– Preços dos materiais constituintes dos betões**

Os custos da produção dos betões auto-compactáveis e convencionais serão comparados apenas pelos respectivos somatórios dos custos dos seus materiais constituintes. Assim apresentam-se de seguida os custos dos diferentes materiais utilizados na produção dos betões.

- Cimento Portland CEM I 42,5R  
Fonte: Cimpor  
Preço: 95 €/ tonelada (IVA não incluído)  
Preço: 114 €/ tonelada (20% IVA incluído)  
Nota: Transporte incluído
- Fíler calcário  
Fonte: OMYA-COMITAL  
Preço: 25 €/ tonelada (IVA não incluído)  
Preço: 30 €/ tonelada (20% IVA incluído)  
Nota: Transporte incluído
- Superplastificante SIKA ViscoCrete 3005  
Fonte: SIKA Portugal  
Preço: 2,84 €/ litro (IVA não incluído)  
Preço: 3,41 €/ litro (20% IVA incluído)  
Nota: Transporte incluído
- Areia 0/2  
Fonte: Betão Liz (Canhoso)  
Preço: 11,65 €/ tonelada (IVA não incluído)  
Preço: 13,98 €/ tonelada (20% IVA incluído)  
Nota: Transporte incluído
- Areia 0/4  
Fonte: Betão Liz (Canhoso)  
Preço: 12,20 €/ tonelada (IVA não incluído)

Preço: 14,64 €/ tonelada (20% IVA incluído)

Nota: Transporte incluído

- Brita 3/6

Fonte: Betão Liz (Canhoso)

Preço: 8,51 €/ tonelada (IVA não incluído)

Preço: 10,21 €/ tonelada (20% IVA incluído)

Nota: Transporte incluído

- Brita 6/15

Fonte: Betão Liz (Canhoso)

Preço: 8,51 €/ tonelada (IVA não incluído)

Preço: 10,21 €/ tonelada (20% IVA incluído)

Nota: Transporte incluído

- Cinzas Volantes

Fonte: Betão Liz (Canhoso)

Preço: 14,20 €/ tonelada (IVA não incluído)

Preço: 17,04 €/ tonelada (20% IVA incluído)

Nota: Transporte incluído

### 5.5.3– Custo de produção de betão auto-compactável

No quadro 5.15 apresenta-se o custo (IVA incluído) por metro cúbico dos três betões analisados no item anterior, onde as suas composições foram determinadas especificamente para cada restrição.

**Quadro 5.15** – Análise comparativa de custos de produção de betões auto-compactáveis

	Brita 3/6 [kg/m <sup>3</sup> ]	Brita 6/15 [kg/m <sup>3</sup> ]	Areia 0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	Areia 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]	Água [l/m <sup>3</sup> ]	C [kg/m <sup>3</sup> ]	FC [kg/m <sup>3</sup> ]	Sp [l/m <sup>3</sup> ]	Custo [€/m <sup>3</sup> ]
R1	440,97	359,46	263,01	482,90	159,40	286,01	371,64	2,38	70,79
R2	486,32	396,43	251,14	461,11	152,21	273,10	354,86	2,27	68,80
R3	502,73	409,80	246,85	453,22	149,61	268,43	348,79	2,23	68,09

Analisando os custos para os três betões expostos no Quadro 5.14, verificamos uma redução de cerca de 2,70 €/m<sup>3</sup> no custo de produção de um betão específico da restrição R1 para um betão específico da restrição R3. Aparentemente, este valor parece reduzido, mas tendo em conta uma estrutura com muitos metros cúbicos de betão, este valor pode ser significativo.

### 5.5.4– Custos de produção de betões correntes

O custo de produção do betão corrente teve como referência um betão da classe C40/50, com classe de abaixamento S3 e classe de exposição XC4. Este betão terá aos 28 dias uma resistência à compressão média de 55 MPa em cubos de 15 cm de aresta ( $f_{cm}$ ), considerando um desvio padrão médio de 3,0 MPa, conforme se ilustra na Equação 5.11.

$$f_{cm} = 50 + 1,645 \times 3,0 = 54,94 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

No Quadro 5.16 é ilustrada a composição média do betão C40/50 e o respectivo custo (IVA incluído) por metro cúbico.

**Quadro 5.16 – Custo de produção de um Betão C40/50**

	<b>Brita 3/6</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Brita 6/15</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Areia 0/2</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Areia 0/4</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Água</b> [l/m <sup>3</sup> ]	<b>C</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>CV</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Sp</b> [l/m <sup>3</sup> ]	<b>Custo</b> [€/m <sup>3</sup> ]
<b>C40/50</b>	510	530	250	480	175	260	135	3,76	65,83

### 5.5.5– Análise comparativa dos custos de produção

Analisando os Quadros 5.15 e 5.16, o custo de produção (apenas de matéria-prima) do betão C40/50 é 2,26 €/m<sup>3</sup> menos dispendioso que um betão auto-compactável com composição específica para a restrição R3 e 4,96 €/m<sup>3</sup> menos dispendioso que um betão auto-compactável com composição específica para a restrição R1. Este é um facto que não se pode contrariar, o betão corrente em termos de custo de matéria-prima continua a ser menos dispendioso que o betão auto-compactável. Ainda assim foi possível reduzir a diferença entre o custo de produção de betões auto-compactáveis específicos para a restrição R3 e o custo de produção dos betões convencionais vibrados. Então, através da optimização das misturas de betões auto-compactáveis tendo em conta as condições estruturais do elemento a betonar é possível reduzir custos, tornando este betão mais competitivo face aos betões convencionais vibrados.

## 5.5 – Conclusões

Como conclusões finais deste Capítulo, é de salientar, em primeiro lugar, que o objectivo principal deste trabalho foi atingido, visto que se conseguiu otimizar misturas tendo em conta o aspecto técnico-económico em função das características do elemento a betonar.

Indo por partes e começando pelo início, concluí-se que a escolha da razão W/C tendo em conta a resistência à compressão pretendida para o betão de 55 MPa foi acertada, uma vez que se obteve aos 28 dias um valor 50,47 MPa para os provetes das argamassas e que segundo a Figura 5.1 desenvolvida por Nepomuceno [13] conduz a uma resistência à compressão em betões aos 28 dias de 55 MPa, sendo este valor atingido experimentalmente.

O estudo do betão no estado fresco permitiu que se relacionasse o parâmetro H2/H1 obtido na Caixa-L na restrição R1 com o parâmetro H2/H1 obtido na Caixa-L nas restantes restrições através dos factores de conversão (FC). Estes factores de conversão permitem, independentemente das características do elemento a betonar, utilizar em laboratório apenas a restrição R1 para verificar a auto-compactabilidade de betão.

Tendo por base a folha de cálculo desenvolvida por Nepomuceno [13] para o cálculo das misturas desenvolveu-se uma nova folha de cálculo onde a principal novidade é o facto de se poder introduzir a restrição mais adequada à estrutura, determinando automaticamente o parâmetro  $V_m/V_g$  e a composição da mistura.

Para a análise dos custos de produção dos betões auto-compactáveis foram determinadas três composições de betões especificamente para cada restrição e o seu respectivo custo. Concluiu-se que houve uma redução de cerca de  $2,70 \text{ €/m}^3$  da composição específica da restrição R1 para a composição específica da restrição R3. Isso seria de esperar uma vez que a restrição R3 tem um espaçamento livre entre varões maior, permitindo aumentar o volume de agregados grossos e diminuir o volume de materiais finos reduzindo assim o custo de produção. Esta redução poderá parecer muito pequena, mas nos dias que correm e com a competitividade que existe no mercado, certamente que é uma redução considerável.

Ainda relativamente a custos, concluiu-se que o custo de produção de betões convencionais vibrados continua a ser inferior quando comparado com o custo de produção de betões auto-compactáveis. Ainda assim a diferença reduz consideravelmente se compararmos o custo de produção de um betão auto-compactável específico para a restrição R3 e o custo de produção de um betão convencional vibrado. E tendo em conta que o betão auto-compactável dispensa mão-de-obra especializada por não necessitar de vibração mecânica para a sua compactação, deverá ser estudado o custo global da produção destes betões, pois será certo que a diferença entre esses custos será diferente.

Por fim, o presente estudo permitiu encurtar distâncias entre os custos (matéria-prima) de produção de betões convencionais e betões auto-compactáveis, através da optimização técnico-económica de misturas de betões auto-compactáveis tendo em conta a taxa de armaduras na estrutura a betonar.