

## **DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL**

## **CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1– Introdução**

Para a realização do presente trabalho foi estabelecida a premissa de se utilizarem apenas materiais correntes, disponíveis numa das centrais de betão pronto da região da Covilhã que serviu de referência ao presente estudo, de modo a viabilizar a comparação efectiva entre os custos dos betões auto-compactáveis e dos betões convencionais. Nesta perspectiva, tendo como referência os materiais correntemente usados nessa central, as alterações ocorreram apenas no tipo de adição e de superplastificante usado. A adição de cinza volante utilizada nessa central foi substituída por fíler calcário, enquanto que o plastificante foi substituído por um superplastificante à base de carboxilatos modificados. Todos os restantes materiais são idênticos ou mesmo provenientes dessa central de betão pronto, como sucedeu com as areias usadas. Outra premissa assumida foi a de se utilizar uma gama de resistências normal, de forma a ser mais fácil estabelecer essa comparação. A resistência média escolhida foi de 55 MPa, avaliada em provetes cubos de 150 mm de aresta sujeitos a cura normalizada.

Tendo como objectivo a optimização laboratorial de misturas de betões auto-compactáveis reduzindo os custos de produção, recorrendo a adições de fíler calcário, formulou-se um programa experimental que exprime a metodologia adoptada e descreve os procedimentos adoptados na realização dos ensaios. Os procedimentos destes ensaios foram definidos sempre que aplicável, recorrendo a documentos normativos nacionais. Na falta destes recorreu-se a normalização estrangeira. Uma vez que o objectivo deste trabalho tem como base o método proposto por Nepomuceno [13], faz todo o sentido utilizar a metodologia e os procedimentos de ensaios que este utilizou. Neste sentido o programa experimental adoptado resume-se nas seguintes etapas:

- 1) Selecção e caracterização dos materiais utilizados,
- 2) Definição de curvas granulométricas de referência para os agregados,
- 3) Estudos em argamassas,
- 4) Estudos em betões.

### **3.2– Selecção e caracterização dos materiais utilizados**

#### **3.2.1– Generalidades**

Os materiais utilizados neste trabalho podem ser subdivididos nos seguintes grupos:

- Ligantes,
- Adições Minerais do tipo I (adições quase inertes),
- Agregados finos,
- Agregados grossos,
- Adjuvantes,
- Água.

### **3.2.2– Ligantes**

Neste trabalho utilizou-se apenas um tipo de ligante, o Cimento Portland (CEM I 42,5R). Após a recepção deste material determinou-se a massa específica de acordo com a especificação do LNEC E 64-1960 [10].

### **3.2.3– Adições minerais do tipo I**

A adição mineral do tipo I escolhida foi o fíler calcário, uma vez que este material tem sido muito utilizado em betões auto-compactáveis noutros países e encontrava-se disponível no Laboratório. Este material foi fornecido pela companhia Mineira de Talcos de Portugal – COMITAL – Soure, sendo designado comercialmente por MICRO 100 AB. Após a recepção deste material determinou-se a massa específica de acordo com a especificação do LNEC E 64-1960 [10].

### **3.2.4– Agregados**

Tendo em conta a especificidade do estudo da composição de betões auto-compactáveis, Nepomuceno [13] definiu na sua metodologia uma máxima dimensão do agregado de 19,1 mm (com referência à série granulométrica normalizada). Deste modo seleccionou-se dois agregados finos e dois agregados grossos, isto é, duas areias e duas britas com fusos granulométricos diferentes entre si. Após a sua recepção foram realizados para cada um deles os seguintes ensaios:

- A determinação da massa volúmica dos agregados saturados de água e com a superfície seca, de acordo com as normas portuguesas NP 954 [15] e NP 581 [14];
- A determinação da absorção de água, em conformidade com a norma Portuguesa NP-581 [14] e especificação do LNEC E248-1971 [6];
- A análise granulométrica, efectuada de acordo com os procedimentos descritos na especificação do LNEC E245-1971 [5].

#### **3.2.4.1- Agregados finos**

A escolha das areias para este trabalho recaiu numa areia natural fina proveniente da Figueira da Foz com a designação comercial de Areia 0/2 e numa areia de grão intermédio proveniente de Abrantes, com a designação comercial de Areia 0/4. Estas foram gentilmente cedidas pela central de produção de betão (Betão Liz).

#### **3.2.4.2- Agregados grossos**

Quanto aos agregados grossos, foram utilizados inertes britados de granito com origem na Quinta da Caçoa – Fundão, gentilmente cedidos pela pedreira Bartolomeu e que apresentam características idênticas àsquelas usadas na central de betão pronto (Betão Liz). Estes têm a designação comercial de Brita 3/6 e Brita 6/15, esta última com a dimensão máxima de 19,1mm.

### **3.2.5- Adjuvantes**

O adjuvante definido para este trabalho tem apenas a função de redutor de água, excluindo assim os introdutores de ar. A escolha recaiu sobre um adjuvante redutor de água de alta gama (superplastificante) em conformidade com a especificação do LNEC E374 [9], fornecido pela empresa Sika, com a designação comercial Sika Viscocrete 3005. Este material é recomendado pelo fabricante para betões auto-compactáveis e possui uma base química constituída por carboxilatos modificados.

### **3.2.6- Água de amassadura**

Em conformidade com a especificação do LNEC E372 [8], utilizou-se água potável da rede pública de abastecimento, seguindo a recomendação usual nestas situações.

## **3.3– Definição das curvas granulométricas de referência para os agregados**

### **3.3.1– Generalidades**

A metodologia adoptada impõe o estudo separado das argamassas e dos betões. Desta forma houve a necessidade de se definir a melhor associação entre as duas areias que constituem os agregados finos, assim como a melhor associação entre as duas britas que constituem os agregados grossos. De acordo com a metodologia proposta por Nepomuceno [13], a melhor associação entre as duas areias é aquela que melhor se aproximar da curva de referência proposta para os agregados finos, conforme se indicou no Capítulo 2. Raciocínio similar de aplica aos agregados grossos, utilizando desta feita a curva de referência para os agregados grossos.

Nepomuceno [13] considerou que a melhor associação para as duas areias e para duas britas, seria aquela que proporcionasse a máxima compacidade através do método da baridade e, conseqüentemente, um mínimo de vazios. Deste modo seria necessário uma menor quantidade de pasta para preencher os vazios, isto é, para uma mesma quantidade de pasta, representaria um maior afastamento das partículas e por sua vez um menor atrito entre estas.

### **3.3.2– Curvas de referência para os agregados finos**

As fracções granulométricas dos agregados finos (Areia 0/2 e Areia 0/4) foram aquela que conduziram a uma maior aproximação à curva de referência utilizada por Nepomuceno [13]. Assim, com a percentagem de passados de cada areia, determinou-se a curva de real da mistura através da melhor percentagem que cada areia contribuiu.

### **3.3.3– Curvas de referência para os agregados grossos**

A curva de referência dos agregados grossos foi determinada de forma semelhante à dos agregados finos.

### **3.4– Estudos em argamassas**

#### **3.4.1– Introdução**

O betão auto-compactável pode ser definido como um material compósito, constituído por agregados grossos dispersos numa matriz formada pela argamassa [13]. Tal argamassa tem um papel muito importante, pois deverá possuir propriedades reológicas que proporcionem uma adequada deformabilidade e coesão da mistura, obtendo-se assim um betão auto-compactável [13]. Essa importância reflecte-se também na resistência dos betões auto-compactáveis que depende sobretudo da resistência da matriz da argamassa [13]. Assim, serão estudadas neste trabalho as propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido. Pelas razões já referidas, as argamassas serão estudadas separadamente, assumindo assim um papel muito importante na obtenção de betões auto-compactáveis [13]. Este estudo conduziu ao desenvolvimento de um programa experimental estruturado em três fases: estimativa dos parâmetros das argamassas, avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco e avaliação das propriedades no estado endurecido.

#### **3.4.2– Estimativa dos parâmetros das argamassas**

Uma vez definidos os materiais a utilizar inicia-se o estudo das argamassas, estimando os valores iniciais dos seus parâmetros. Segundo o método proposto por Nepomuceno [13], o primeiro passo é definir a razão W/C mais apropriada tendo em conta a resistência pretendida nos betões. Neste método a razão W/C dos betões é igual à razão W/C das argamassas. Então, uma vez definida a resistência média pretendida para um betão, é possível estimar a razão W/C desse betão que coincide com a razão W/C da argamassa. A Figura 2.11 do Capítulo 2 representa graficamente a relação entre a resistência à compressão do betão e a razão W/C para o cimento Portland CEM I 42,5R. Esta correlação foi usada para estimar a razão W/C.

De seguida é necessário adoptar um valor para o parâmetro  $V_p/V_s$  (razão em volume absoluto entre as quantidades totais de materiais finos e de agregados finos na mistura) que poderá variar entre 0,6 e 0,8. No presente trabalho adoptou-se um valor de 0,8 para  $V_p/V_s$ . Com o parâmetro  $V_p/V_s$  e a razão W/C da argamassa já definidos, determinamos a percentagem de substituição do cimento pela adição, através da correlação demonstrada na Figura 2.14 apresentada no Capítulo anterior.

Definidos estes parâmetros, procede-se a determinação experimental dos parâmetros  $V_w/V_p$  (relação em volume absoluto entre as quantidades de água e de materiais finos) e  $S_p/p\%$  (relação percentual em massa entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos) que conduzem às propriedades reológicas pretendidas, isto é,  $G_m$  entre 5,3 e 5,9 e  $R_m$  entre 1,14 e 1,30  $s^{-1}$ . Estes valores podem ser estimados inicialmente através das correlações apresentadas nas Figuras 2.22 e 2.24 apresentadas também no Capítulo 2.

Estimados todos os parâmetros, pode-se dar início ao cálculo das argamassas, que podem ser determinadas manualmente ou através da folha de cálculo Excel desenvolvida por Nepomuceno [13].

### **3.4.2.1– Cálculo das argamassas**

O procedimento de cálculo adoptado para as argamassas é idêntico ao procedimento utilizado por Nepomuceno [13] e que se encontra demonstrado no Capítulo 2. Da mesma forma, a folha de cálculo (Excel) utilizada neste trabalho é exactamente a mesma que utilizou Nepomuceno [13] e encontra-se apresentada também no Quadro 2.5 do Capítulo 2.

### **3.4.3– Avaliação das propriedades da argamassa no estado fresco**

#### **3.4.3.1– Generalidades**

Sendo o estudo das argamassas feito separadamente dos betões, então, as argamassas que passariam à fase seguinte deveriam possuir propriedades reológicas que conduzissem à obtenção de betões auto-compactáveis. Para atingir este objectivo foi adoptado neste programa experimental a seguinte abordagem:

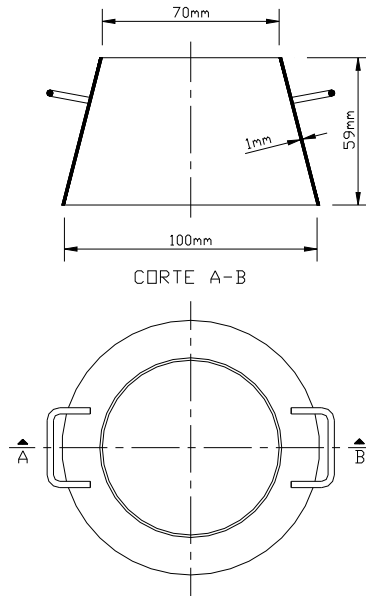
- 1) Selecção e caracterização dos equipamentos de ensaio;
- 2) Definição do intervalo admissível para a variação dos parâmetros reológicos das argamassas que conduzem à obtenção de betões auto-compactáveis;
- 3) Definição dos procedimentos experimentais com o objectivo de obter argamassas com o comportamento reológico pré-definido;
- 4) A realização de ensaios laboratoriais, onde foi estudada uma família de finos com um  $V_p/V_s=0,8$ . Definida a família de finos e o  $V_p/V_s$ , serão determinados experimentalmente os parâmetros  $V_w/V_p$  e  $Sp/p\%$  que conduzem às propriedades reológicas estabelecidas.

Os pontos acima referenciados foram definidos segundo a metodologia que Nepomuceno [13] adoptou na sua dissertação de Doutoramento, servindo como base deste trabalho.

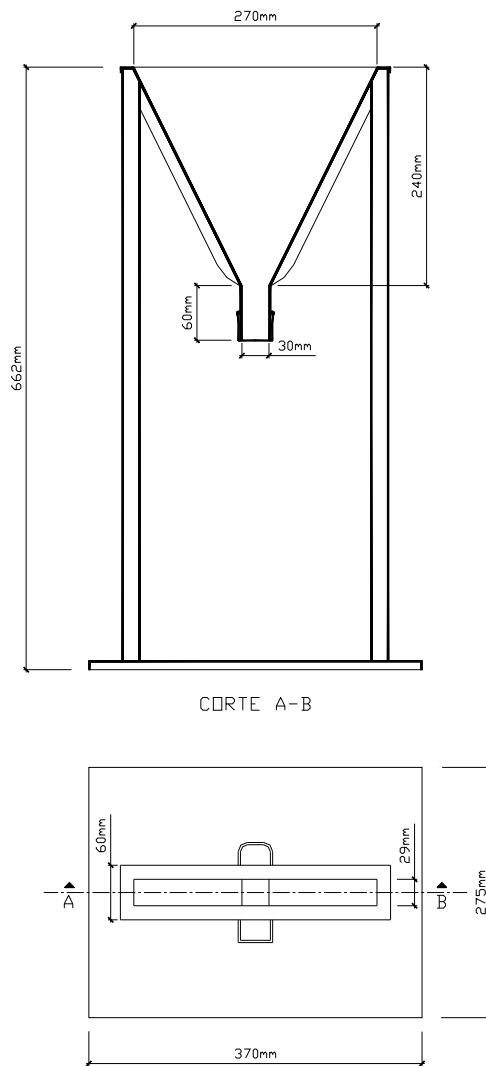
#### **3.4.3.2– Selecção e caracterização dos equipamentos de ensaio**

Para a avaliação (de forma indirecta) dos parâmetros reológicos das argamassas, tensão de corte e viscosidade plástica, foram utilizados o “ensaio de espalhamento” e o “ensaio da fluidez”. A tensão de corte está relacionada com a deformabilidade que pode ser medida através do diâmetro de espalhamento de um tronco cónico da argamassa, enquanto a viscosidade plástica está relacionada com a fluidez, que pode ser medida através do tempo de escoamento num funil de faces planas.

Os equipamentos utilizados para a execução destes ensaios foram exactamente os mesmos que Nepomuceno [13] utilizou durante a sua campanha experimental. As Figuras 3.1 e 3.2 demonstram as dimensões dos equipamentos utilizados, nomeadamente o “cone de espalhamento” e o “Funil-V” respectivamente.



**Figura 3.1 - Cone para o ensaio de espalhamento em argamassas [13]**



**Figura 3.2 - Funil-V para o ensaio de fluidez das argamassas [13]**

### 3.4.3.3– Definição do comportamento reológico pretendido

Os parâmetros reológicos das argamassas podem ser avaliados com o recurso aos ensaios de espalhamento e fluidez, sendo expressos em termos de área de espalhamento relativa (Gm) e velocidade relativa de escoamento (Rm), respectivamente.

Nepomuceno [13] definiu um intervalo de variação ou “alvo” que se encontra ilustrado na Figura 2.20 apresentada no Capítulo 2, onde se verifica que o valor de Gm varia entre 5,3 e 5,9 e o valor de Rm varia entre 1,14 e 1,30, o que equivale, respectivamente, a um diâmetro de espalhamento entre 251 mm e os 263 mm e uma variação do tempo de escoamento entre os 7,69 e os 8,77 segundos. Os intervalos de Gm e Rm propostos por este autor também serão adoptados neste trabalho.

### 3.4.3.4– Procedimento adoptado para o acerto da reologia das misturas

Quando se obtém os valores de Gm e Rm para uma certa argamassa e esta combinação não se encontra dentro do intervalo “alvo”, é necessário fazer correcções. Estas correcções consistem na variação de  $V_w/V_p$  mantendo-se constante o valor de  $S_p/p\%$ , ou vice-versa. Assim, esta acção permite-nos aproximações sucessivas aos valores pretendidos. A Figura 3.3 ilustra, esquematicamente, as alterações nos parâmetros reológicos das argamassas quando se aumenta o  $V_w/V_p$  mantendo-se constante o valor de  $S_p/p\%$ . Da mesma forma a Figura 3.4 ilustra essas alterações quando se aumenta  $S_p/p\%$  mantendo-se constante o valor de  $V_w/V_p$ .

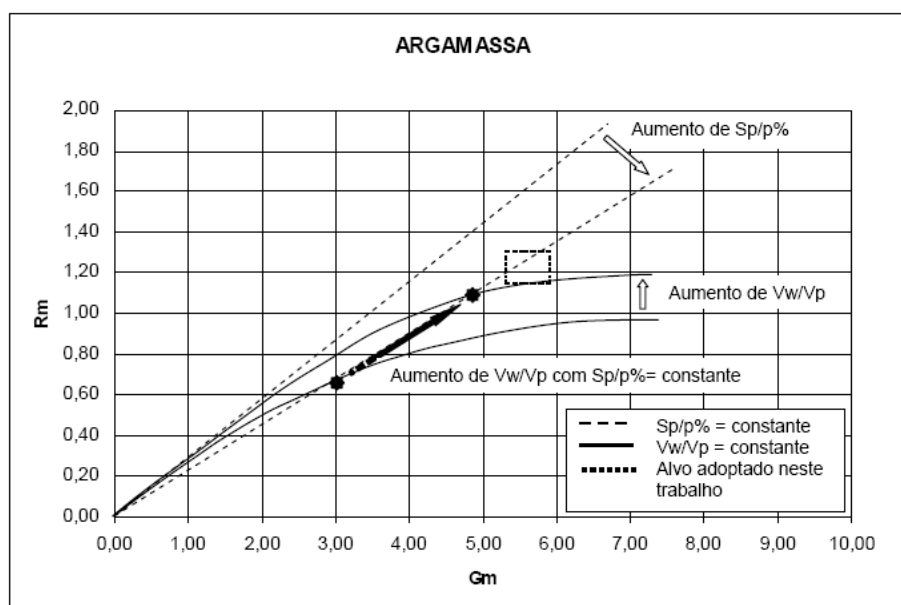


Figura 3.3 - Alterações na reologia com o aumento do  $V_w/V_p$  mantendo  $S_p/p\%$  constante [13]

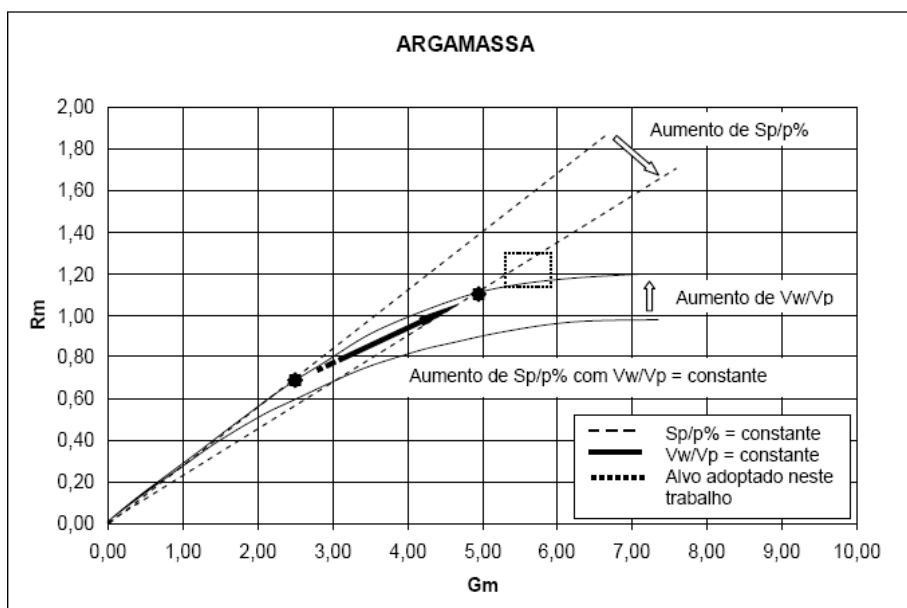


Figura 3.4 - Alterações na reologia com o aumento do Sp/p% mantendo Vw/Vp constante [13]

### 3.4.3.5– Ensaios Laboratoriais

#### 3.4.3.5.1– Generalidades

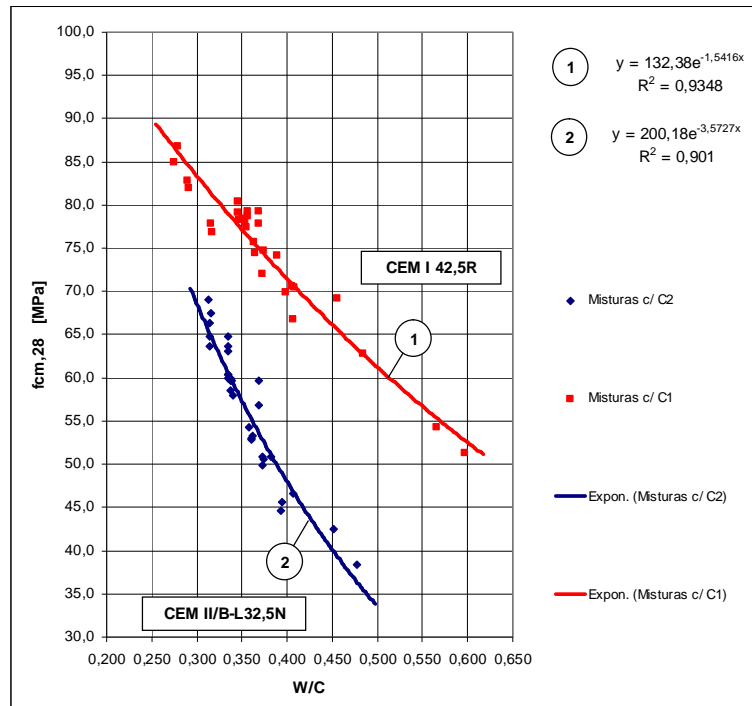
A metodologia adoptada neste trabalho pressupõe a utilização de parâmetros chave para o estudo da composição das argamassas, nomeadamente: a família de finos,  $V_p/V_s$ ,  $V_w/V_p$  e  $Sp/p\%$ . Os dois primeiros são utilizados de modo a controlar a resistência das argamassas e são determinados a priori, enquanto os dois últimos são determinados experimentalmente de modo a que se atinja o comportamento reológico pretendido.

Será estudada neste trabalho apenas uma família de finos, constituída por fíler calcário e Cimento Portland Normal (CEM I 42,5R). Em relação ao parâmetro  $V_p/V_s$ , este manter-se-á constante com o valor de 0,8. O comportamento reológico pretendido para as argamassas já foi definido no Sub-Capítulo 3.4.3.3, com a definição do intervalo de variação para os parâmetros  $G_m$  e  $R_m$ . O procedimento para a determinação de  $V_w/V_p$  e  $Sp/p\%$  que conduz à obtenção de argamassas com comportamento reológico predefinido foi estabelecido no Sub-Capítulo 3.4.3.4.

Como já foi referido anteriormente, o objectivo deste trabalho baseia-se no estudo técnico-económico de betões auto-compactáveis, fazendo-os passar pela “Caixa-L” com diferentes obstáculos. A maior ou menor facilidade que um betão auto-compactável tem para contornar estes obstáculos está directamente ligada à sua trabalhabilidade e não à sua resistência. Sendo assim, a escolha da resistência para os betões a estudar tem um papel secundário, focando-se o estudo na trabalhabilidade que estes devem possuir para poderem ultrapassar tais obstáculos. Ainda assim, decidiu-se definir uma resistência média para os betões, utilizando assim as correlações determinadas por Nepomuceno [13]. Então, para a família de finos em estudo foram determinados inicialmente os parâmetros chave das argamassas da seguinte forma:

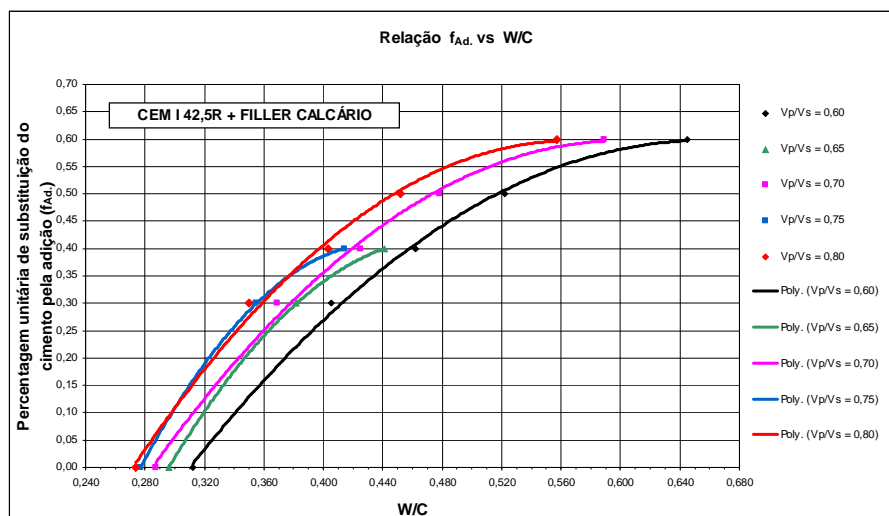
### Família de finos – CEM I 42,5R e Filer Calcário

Inicialmente definiu-se uma resistência média à compressão de  $55 \pm 3$  MPa e um valor para o parâmetro  $V_p/V_s=0,80$ . Para determinar a percentagem unitária de substituição do cimento pela adição é necessário determinar a priori a razão W/C pela correlação apresentada na Figura 2.11, que por conveniência será ilustrada novamente na Figura 3.5.



**Figura 3.5 - Relação entre  $f_{cm, 28}$  e a razão W/C [13]**

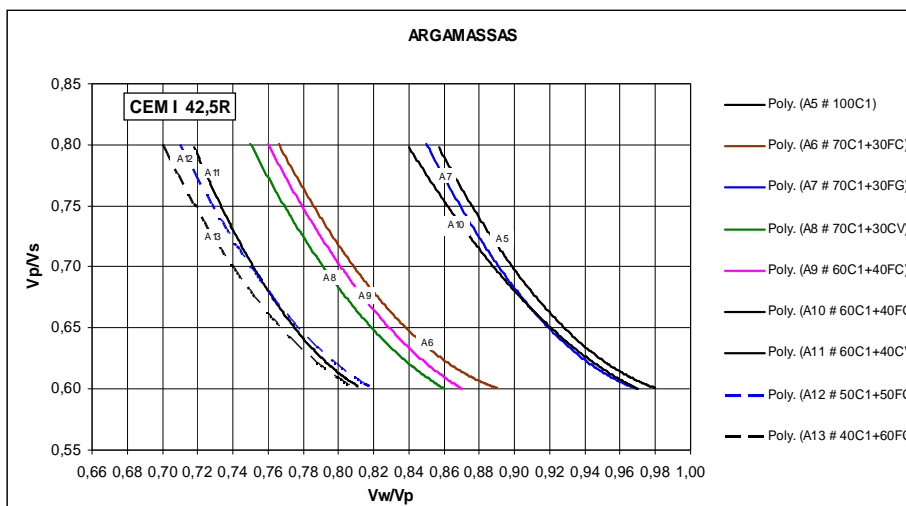
Da Figura 3.5 obteve-se um valor aproximado de 0,57 para a razão W/C, podendo neste momento determinar-se o valor da percentagem unitária de substituição do cimento pela adição pela correlação demonstrada na Figura 2.14 e que por conveniência é apresentada na Figura 3.6.



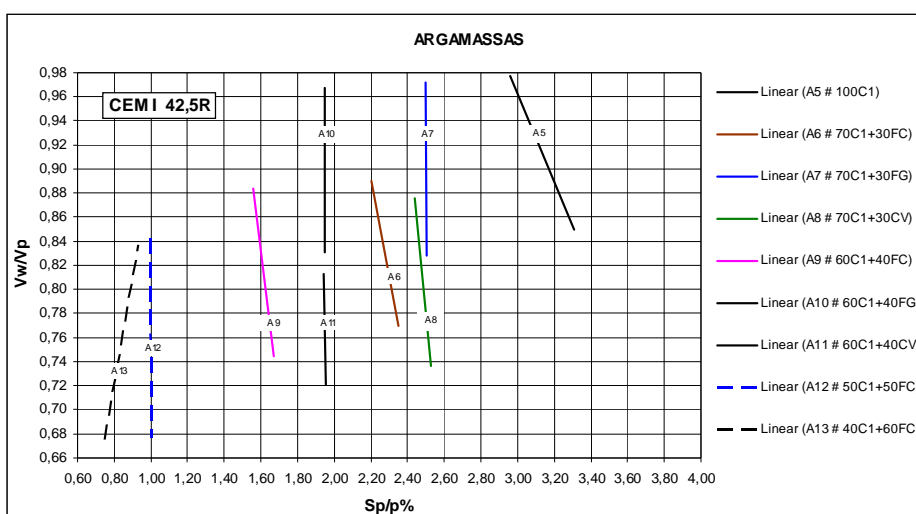
**Figura 3.6 - Relação  $f_{Ad}$  versus W/C para famílias com CEM I 42,5R e filler calcário [13]**

Na Figura 3.6 verifica-se que para uma razão  $W/C=0,57$  não existe correspondência na curva  $V_p/V_s=0,80$ . Mas atendendo à tendência da curva pode-se estimar um valor de percentagem unitária de substituição de cimento pela adição de 0,60.

Uma vez definidos estes parâmetros, determina-se experimentalmente os valores de  $V_w/V_p$  e  $S_p/p\%$  conducentes às propriedades reológicas pretendidas. Como estimativa inicial pode-se utilizar as correlações representadas nas Figuras 2.22 e 2.24, que novamente se apresenta nas Figuras 3.7 e 3.8.



**Figura 3.7** - Relação  $V_p/V_s$  versus  $V_w/V_p$  para famílias com CEM I 42,5R [13]



**Figura 3.8** - Relação  $V_w/V_p$  Versus  $S_p/p\%$  para as famílias com CEM I 42,5R [13]

Das duas figuras apresentadas anteriormente obteve-se um valor aproximado de 0,70 para o parâmetro  $V_w/V_p$  e 0,78 para o parâmetro  $S_p/p\%$ . Em trabalhos já realizados no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da UBI, onde foi utilizado o superplastificante Sika Viscocrete 3005, verificou-se que comparativamente ao superplastificante Sika Viscocrete 3000 utilizado por Nepomuceno, era necessária uma menor quantidade deste (cerca 50%) para obter o mesmo efeito. Por esta razão optou-se por reduzir o parâmetro  $S_p/p\%$  para 0,3.

Por fim, definidos todos os parâmetros chaves, determinou-se através da folha de Excel as quantidades dos constituintes das argamassas.

De seguida serão descritos os procedimentos adoptados para o acondicionamento e medição dos constituintes das argamassas como também para os ensaios realizados às argamassas no estado fresco.

#### **3.4.3.5.2– Acondicionamento e medição dos materiais**

Após a sua recepção, os agregados finos foram armazenados no interior do laboratório em compartimentos adequados. O cimento e o filler calcário foram armazenados em barricas bem seladas e protegidas da humidade. Fornecido em recipientes de 5 litros, o superplastificante Sika Viscocrete 3005 encontrava-se devidamente selado e rotulado. Estes foram armazenados num compartimento fechado, ao abrigo da luz e do calor.

Quanto à medição dos materiais, cada amassadura experimental foi calculada para um volume de 1,60 litros. Todos os materiais foram medidos em massa, incluindo o superplastificante e a água da amassadura. O equipamento de medição dos materiais utilizado foi uma balança electrónica com uma divisão de escala de 0,1 gramas e capacidade máxima de 6 kg. Os materiais finos apresentavam-se na altura da pesagem no estado seco enquanto os agregados grossos apresentavam-se saturados com a superfície seca.

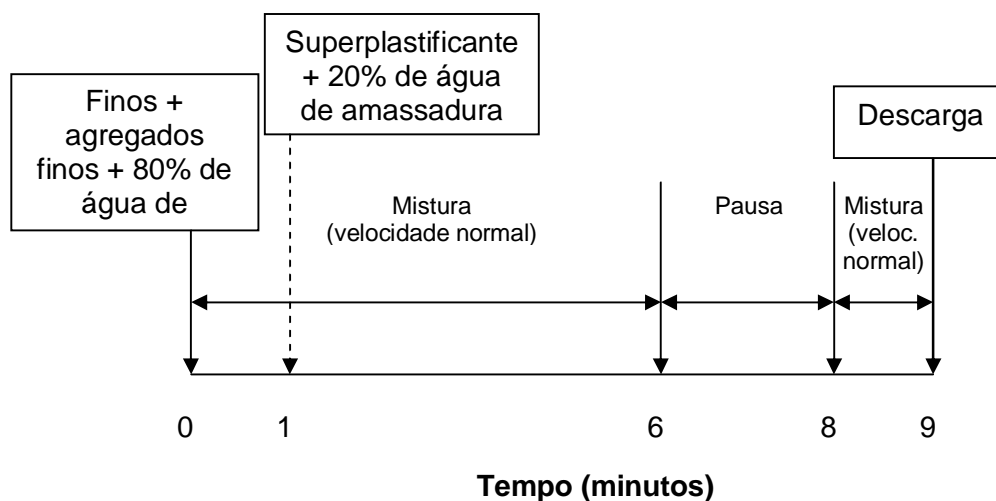
#### **3.4.3.5.3– Procedimentos de amassadura**

A misturadora utilizada para a realização das amassaduras encontra-se ilustrada na Figura 3.9. Trata-se de uma misturadora programável destinada à produção de pastas e argamassas normalizadas. Todo o processo de paragem e arranque da misturadora foi controlado manualmente apesar de esta possuir mecanismos automáticos.



**Figura 3.9** - Misturadora utilizada na produção das argamassas

Neste trabalho foi definida a sequência de amassadura que Nepomuceno [13] utilizou no seu trabalho, encontrando-se ilustrada na Figura 3.10. O tempo da mistura foi controlada com um cronómetro que parava sempre que a mistura era interrompida para a limpeza das pás.



**Figura 3.10** - Sequência de amassadura adoptada neste trabalho [13]

#### **3.4.3.5.4– Procedimentos de ensaio**

Os dois ensaios realizados às argamassas para avaliar as propriedades reológicas foram o ensaio de espalhamento e o ensaio de fluidez. Na falta de disposições normativas nacionais ou estrangeiras, optou-se por descrever sumariamente os procedimentos adoptados, assim como a interpretação dos resultados.

##### **3.4.3.5.4.1– Ensaio de espalhamento**

Para este ensaio é necessário que o cone de espalhamento seja colocado sobre de uma superfície lisa, desempenada, nivelada e sem saliências que influenciem o movimento da argamassa enquanto se deforma. Tanto o cone como a superfície foram limpos com um pano humedecido antes do início do ensaio. Depois de terminada a amassadura, encheu-se completamente o cone com argamassa e alisou-se a superfície mas sem aplicar qualquer tipo de vibração ou compactação, como se pode observar na Figura 3.11.

O passo seguinte foi levantar o cone para que a argamassa pudesse deformar-se e espalhar-se sobre a superfície, atingindo o seu diâmetro máximo, que coincide no instante em o movimento cessa (Figura 3.12).

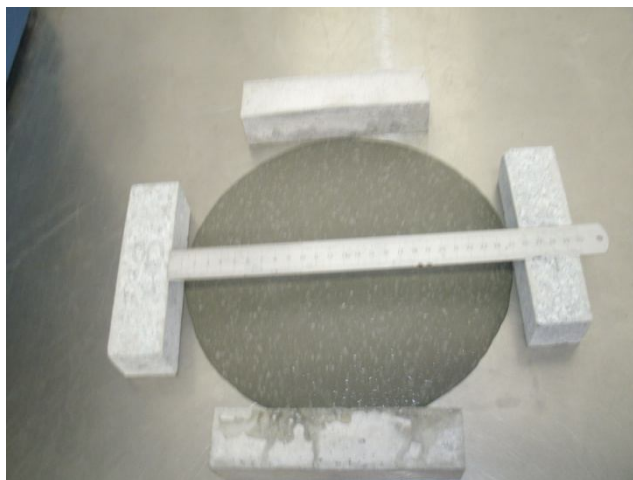
Ao cessar o movimento da argamassa, determinou-se o seu diâmetro médio de espalhamento ( $D_m$ ), que corresponde à média dos diâmetros medidos em duas direcções perpendiculares (Figura 3.13).



**Figura 3.11** - Cone de espalhamento já preenchido de argamassa



**Figura 3.12** - Argamassa espalhada sobre a superfície



**Figura 3.13** - Medição do diâmetro da argamassa segundo uma direcção

O resultado deste ensaio pode ser expresso directamente pelo diâmetro médio de espalhamento. Por outro lado, este também pode ser expresso através da determinação da área de espalhamento relativa, traduzida pela expressão utilizada no método desenvolvido por Okamura et al [3, 12, 17, 18].

$$G_m = \left( \frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (3.1)$$

Onde:

$G_m$  é a área de espalhamento relativa;

$D_m$  é o Diâmetro médio de espalhamento, em mm;

$D_0$  é o diâmetro inicial na base do cone, mm.

#### 3.4.3.5.4.2– Ensaio de Fluidiez

Antes de se realizar o enchimento procedeu-se à limpeza do funil com um pano humedecido e colocou-se o mesmo sobre uma superfície firme e nivelada. Foram adoptadas precauções para assegurar que durante o ensaio não se verificassem oscilações no funil que influenciem o escoamento da argamassa.

Verificadas estas condições deu-se início ao enchimento do funil (Figura 3.14). Uma vez cheio, a superfície da argamassa foi alisada mas sem ser aplicada qualquer vibração ou outro modo de compactação.

De seguida, a comporta inferior foi aberta e iniciou-se o escoamento da argamassa, que coincidiu com o momento em que o cronómetro começou a contar. O tempo de escoamento terminou quando, observando o funil de cima para baixo, surgiu o primeiro raio de luz. Na Figura 3.15 pode-se observar o escoamento da argamassa pela comporta inferior.



**Figura 3.14** - Enchimento do Funil-V com argamassa



**Figura 3.15** - escoamento da argamassa no Funil-V

O resultado deste ensaio pode ser expresso directamente pelo tempo de escoamento ( $t$ ), expresso em segundos. Por outro lado, este também pode ser expresso através da determinação da velocidade relativa de escoamento, traduzida pela expressão utilizada no método desenvolvido por Okamura et al [3, 12, 17, 18].

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (3.2)$$

Onde:

$R_m$  é a velocidade relativa de escoamento, em  $s^{-1}$ ;

$t$  é o tempo de escoamento, em segundos.

#### **3.4.4– Avaliação das propriedades da argamassa no estado endurecido**

Este Sub-Capítulo descreve os ensaios de compressão de provetes de 40 mm de aresta na prensa apresentada nas Figuras 3.16 e 3.17. Estes provetes foram apenas ensaiados aos 28 dias para se poder comparar o valor de resistência obtida nas argamassas com o valor previsto para a resistência nos betões. Antes dos ensaios à compressão, foram determinadas as massas volúmicas dos provetes prismáticos de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ .



**Figura 3.16** - Prensa utilizada no ensaio de compressão dos provetes



**Figura 3.17** - Adaptador utilizado na prensa para os ensaios em argamassas

### **3.5– Estudos em Betões**

#### **3.5.1– Introdução**

Depois de conhecidas as propriedades das argamassas no estado fresco, bastaria agora estimar o volume de agregados grossos adoptando determinados critérios previamente estabelecidos, que incluem as características dos agregados e parâmetros de auto-compactabilidade [13].

Na metodologia proposta por Nepomuceno [13] surge um novo parâmetro comparativamente às metodologias apresentadas por outros autores, designado por  $V_m/V_g$ . Este parâmetro representa a proporção em volume absoluto entre a matriz argamassa e os agregados grossos imerso na matriz, e por outro lado, representa o traço volumétrico entre a matriz que controla a resistência e os agregados grossos. Na campanha laboratorial foram produzidas amassaduras experimentais onde o parâmetro  $V_m/V_g$  foi combinado com os parâmetros das argamassas, nomeadamente, a família de finos, o  $V_p/V_s$ , o  $V_w/V_p$  e o  $Sp/\rho\%$ .

No estudo da composição dos betões é recomendado que a máxima dimensão dos agregados grossos se situe entre 20mm e 25mm quando o betão se destina a estruturas com taxas de armaduras normais. Mas no caso de estruturas densamente armadas é recomendado que esse valor seja inferior a 20 mm. Pelo exposto, e de modo a permitir a aplicação do betão auto-compactável em qualquer situação, utilizou-se neste trabalho uma máxima dimensão para os agregados grossos de 19,1 mm, tendo em conta a série de peneiros normalizada.

Quanto ao volume de vazios, adoptou-se o valor que Nepomuceno [13] utilizou no seu trabalho, sensivelmente 3%, que corresponde a  $0,030 \text{ m}^3/\text{m}^3$  de betão.

O estudo dos betões levou ao desenvolvimento de um programa experimental estruturado em três fases: estimativa dos parâmetros do betão, avaliação das propriedades do betão no estado fresco e a avaliação das propriedades do betão no estado endurecido.

### **3.5.2– Estimativa dos parâmetros dos betões**

Para o estudo da composição estabeleceu-se como premissa que todos os betões deveriam cumprir os requisitos reológicos, apresentando valores do diâmetro de espalhamento entre os 600 e os 700 mm e tempos de escoamento no funil-V entre os 10 e os 20 segundos. Estabeleceu-se também que o betão de referência deveria ser auto-compactável quando avaliado na caixa-L para a restrição R1. Nesse sentido, entendeu-se adequado fixar um valor de 2,40 para o parâmetro  $V_m/V_g$ , que multiplicado pelo valor de 0,80, correspondente a  $V_p/V_s$ , conduz a um valor de 1,92 para o parâmetro MN. Desta forma, garantiu-se que, mesmo para diâmetros baixos, seria obtido um betão auto-compactável, conforme se observa na Figura 2.25.

Considerando os objectivos traçados para este estudo, foram estabelecidos valores sucessivamente menores de  $V_m/V_g$  para as restantes misturas, a que correspondem valores sucessivamente maiores do volume de agregados grossos. Com a redução de  $V_m/V_g$  seria muito provável que o betão deixasse de ser auto-compactável para a restrição R1, podendo ainda sê-lo, no entanto, para as restrições menores R2, R3 e R4. Nesse sentido, definiram-se os seguintes valores de  $V_m/V_g$  para o estudo da composição dos betões: 2,40; 2,30; 2,20 e 2,10.

Assumindo um volume de vazios de  $0,030 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , estão reunidos todos os parâmetros necessários para o cálculo dos betões, que pode ser realizado manualmente ou através da folha Excel para o cálculo dos betões desenvolvida por Nepomuceno [13].

#### **3.5.2.1– Cálculo dos betões**

O procedimento de cálculo adoptado para os betões é idêntico ao procedimento utilizado por Nepomuceno [13] e que se encontra demonstrado no capítulo anterior. Da mesma forma, a folha de cálculo (Excel) utilizada neste trabalho é exactamente a mesma que utilizou Nepomuceno [13] e encontra-se apresentada no Capítulo 2 no Quadro 2.6.

### **3.5.3– Avaliação das propriedades do betão no estado fresco**

#### **3.5.3.1– Generalidades**

Um betão auto-compactável deve possuir certas propriedades no estado fresco que permitam que este se deforme através da gravidade, envolvendo perfeitamente as armaduras, mantendo-se homogéneo mesmo nas situações mais desfavoráveis. Essas propriedades incluem a capacidade e velocidade de deformação, capacidade de enchimento, capacidade de passagem e resistência à segregação.

Para a avaliação destas propriedades foram propostos alguns equipamentos de ensaios, aos quais se fará referência mais à frente neste trabalho. Esses equipamentos não permitem avaliar separadamente cada propriedade, pelo que os resultados têm de ser interpretados como uma sobreposição, ainda pouco definida, entre as propriedades.

Deste modo, definiu-se com base no método de Nepomuceno [13] uma metodologia para avaliar as propriedades do betão no estado fresco, descrita nas seguintes etapas:

- 1) Selecção e caracterização dos equipamentos de ensaio;
- 2) Definição do comportamento reológico pretendido com vista à obtenção de betões auto-compactáveis;
- 3) Definição dos procedimentos a adoptar perante a eventual necessidade de proceder ao acerto das misturas;
- 4) Descrição dos ensaios laboratoriais utilizados na campanha experimental.

### **3.5.3.2– Selecção e caracterização dos equipamentos de ensaio**

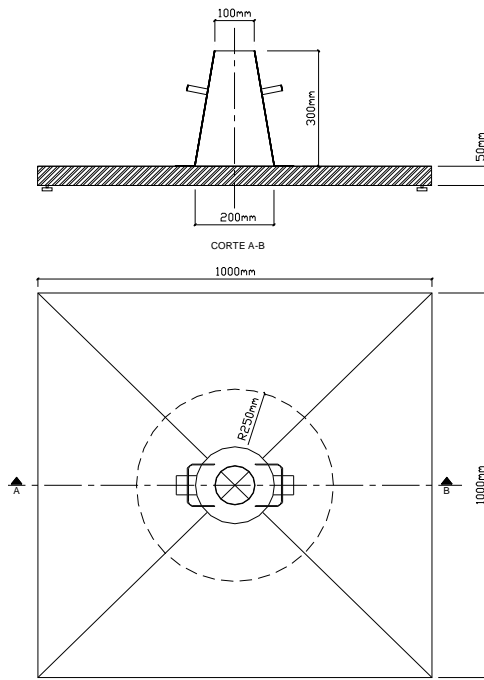
A capacidade de deformação e a velocidade de deformação dos betões foram avaliadas através dos ensaios de espalhamento (Cone de Abrams) e do ensaio de fluidez (Funil-V), respectivamente. Estes ensaios são similares aos descritos nas argamassas, alterando apenas as dimensões e proporções.

Para a avaliação das características de auto-compactabilidade dos betões estudados, utilizou-se o ensaio da “Caixa-L” para várias restrições. A utilização destas restrições têm como objectivo simular várias situações que podem ocorrer numa estrutura de betão armado, tendo em vista o aspecto técnico-económico.

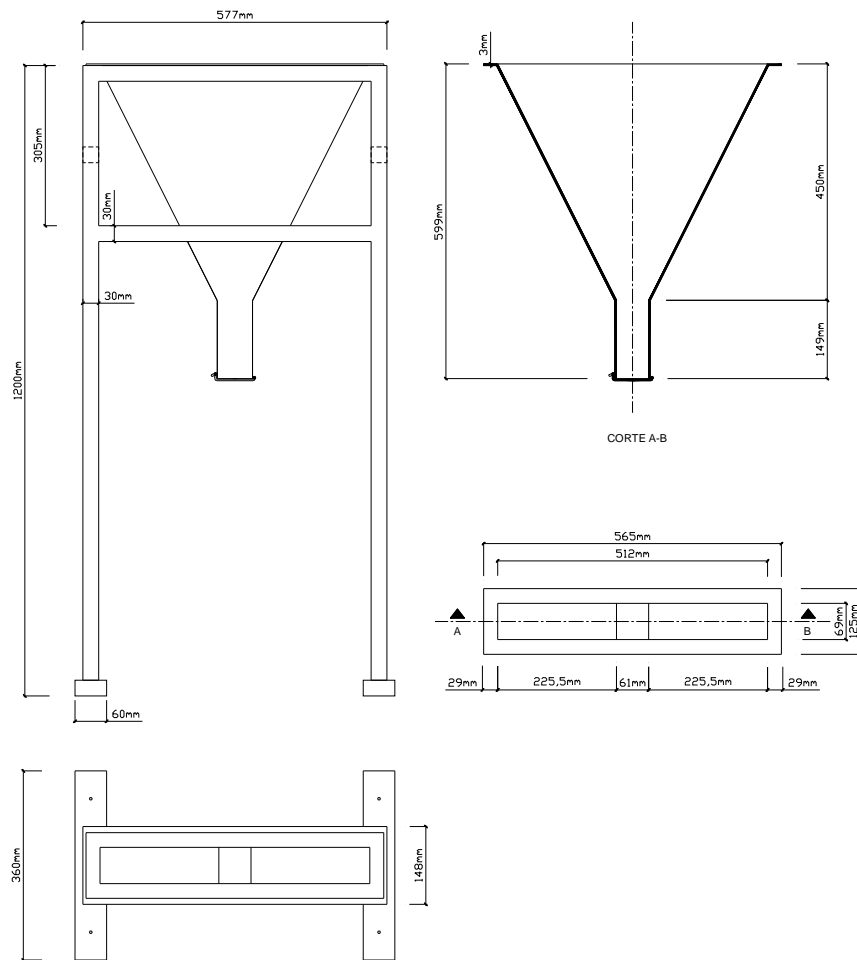
É de referir que todos os equipamentos utilizados para os ensaios em betões foram exactamente os mesmos que Nepomuceno [13] utilizou, estando todos disponíveis no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da UBI. Foi apenas necessário recorrer à produção das restantes restrições para a “Caixa-L”.

Em resumo, para os diversos ensaios realizados aos betões no estado fresco foram utilizados os seguintes equipamentos: “Cone de Abrams” e respectiva mesa de espalhamento ilustrados na Figura 3.18, Funil-V apresentado na Figura 3.19, “Caixa-L” e respectivas restrições ilustradas na Figura 3.20 e na Figura 3.21.

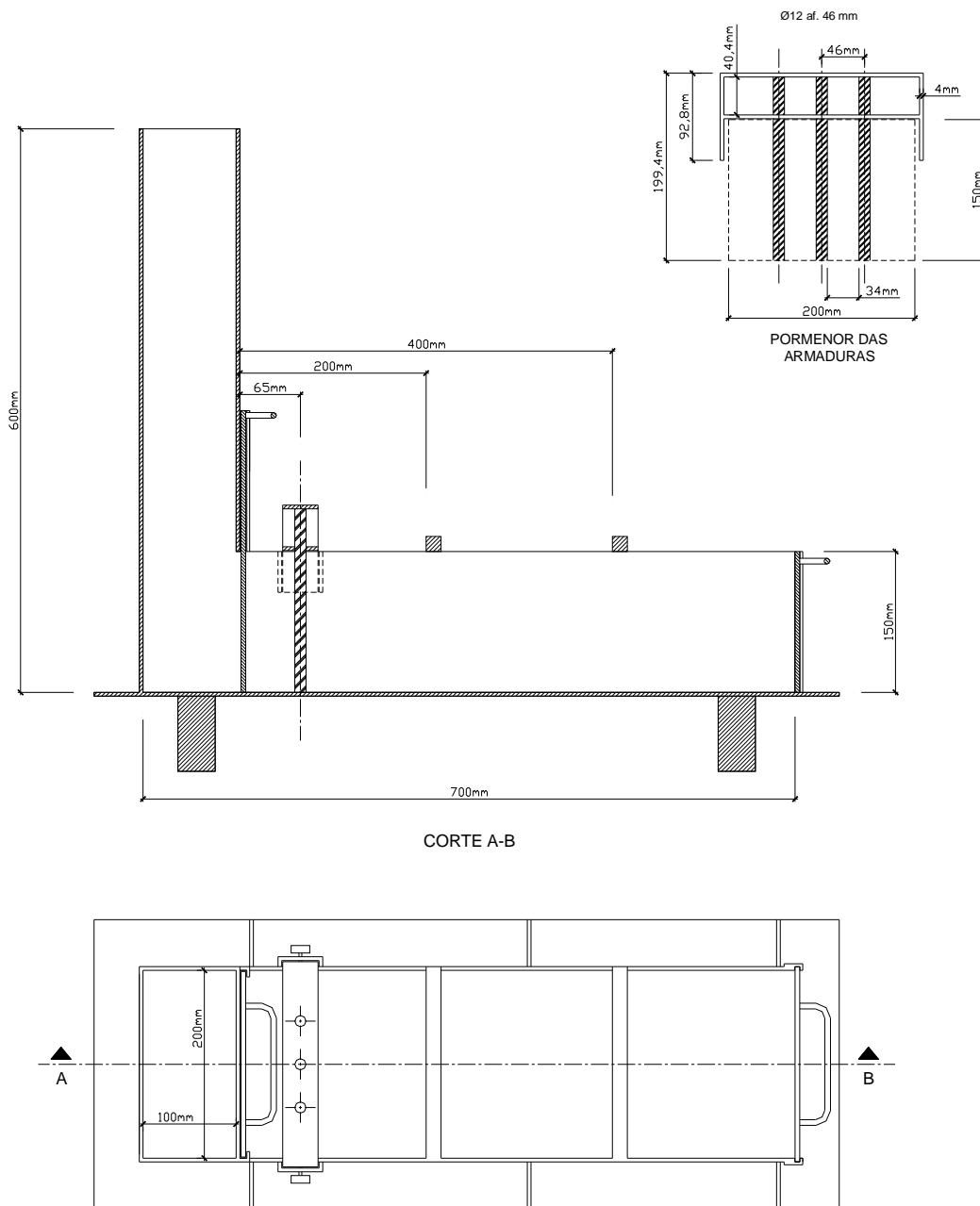
Durante os ensaios de espalhamento constatou-se que a mesa de espalhamento não se encontrava totalmente desempenada, pelo que se optou por substituir esta base por uma outra, que apesar de possuir dimensões mais reduzidas (710 mm x 710 mm) não tinha qualquer influência nos resultados. A substituição de uma mesa pela outra permitiu obter-se espalhamentos mais homogéneos, perfazendo circunferências quase perfeitas.



**Figura 3.18 - Ensaio de espalhamento para o betão [13]**



**Figura 3.19 - Funil-V para o ensaio de fluidez do betão [13]**



**Figura 3.20** - Caixa-L para o ensaio de auto-compactabilidade do betão [13]

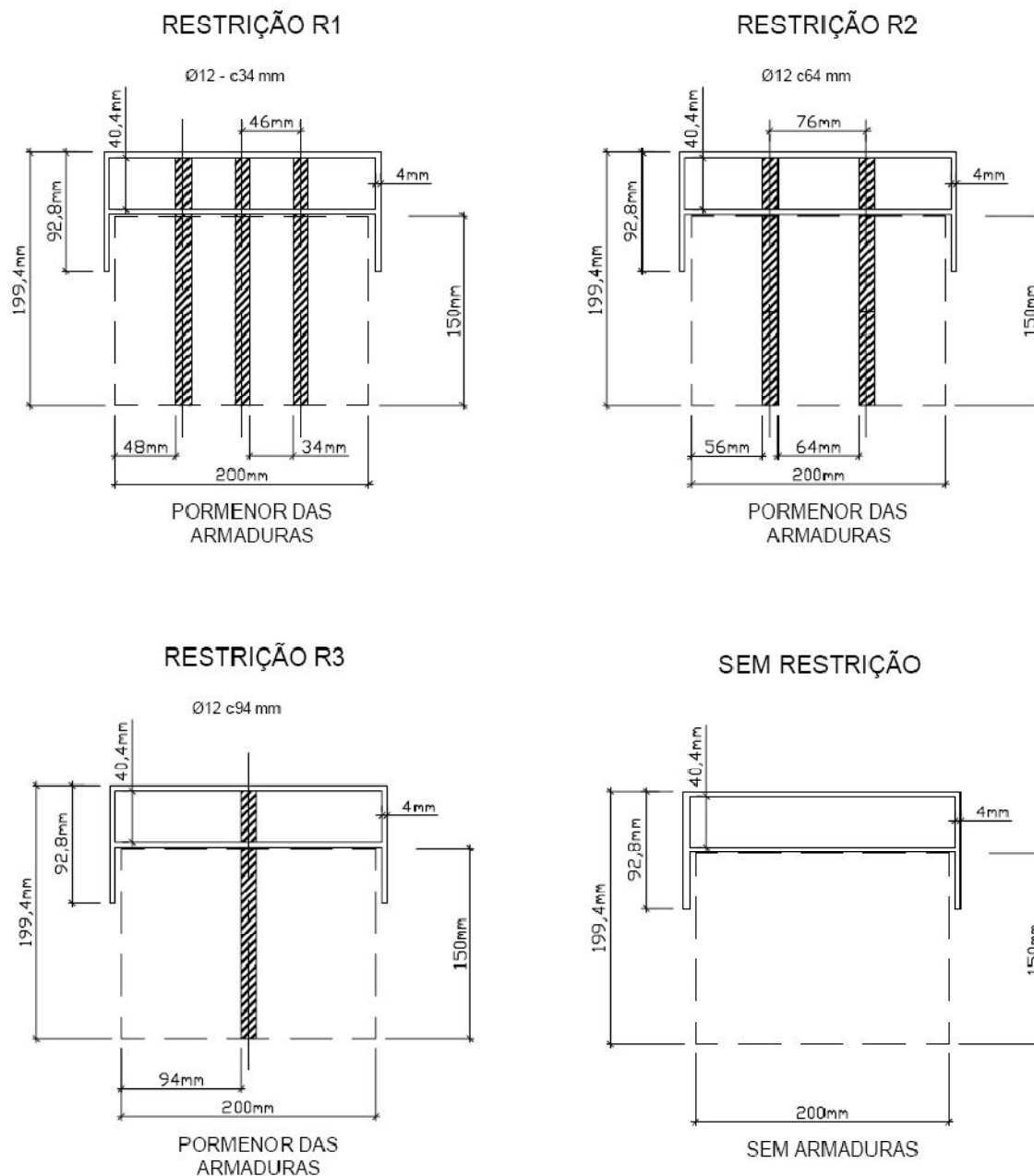


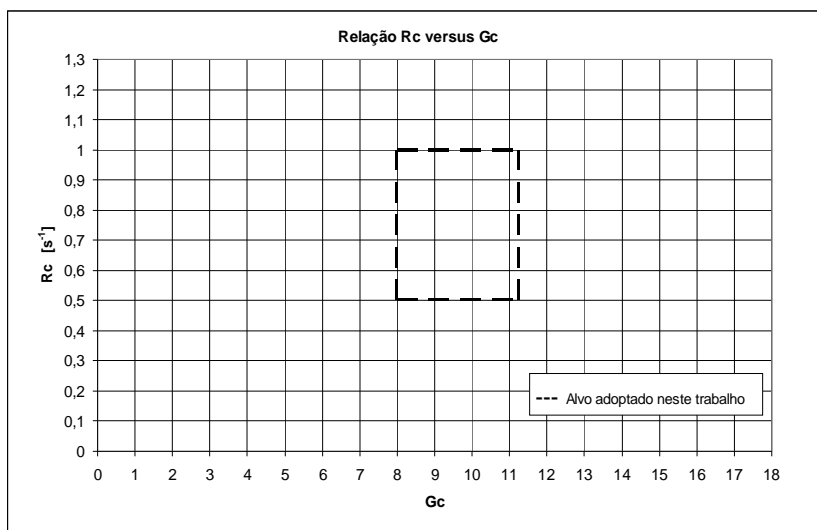
Figura 3.21 - Restrições para a Caixa-L

### 3.5.3.3– Definição do comportamento reológico pretendido

Tal como nas argamassas, os resultados podem ser apresentados através do diâmetro de espalhamento e do tempo de escoamento, respectivamente. Outra forma de apresentar estes resultados é através da área de espalhamento relativa do betão ( $G_c$ ) e da velocidade relativa de escoamento do betão ( $R_c$ ).

Segundo o método proposto por Okamura et al. [3, 12, 17, 18] o diâmetro de espalhamento deverá situar-se entre os 600 mm e os 700 mm no ensaio de espalhamento, enquanto o tempo de escoamento deveria situar-se entre os 10 e os 20 segundos no Funil-V. Expressando estes valores em termos de área de espalhamento relativa ( $G_c$ ) e de velocidade de

escoamento relativa ( $R_c$ ), obtemos um intervalo de variação representado na Figura 3.22. Em geral, os betões produzidos na campanha experimental devem apresentar valores de  $G_c$  entre 8,00 e 11,25 e valores de  $R_c$  entre 0,50 e 1,00.



**Figura 3.22** - Intervalo de variação definido para os parâmetros  $G_c$  e  $R_c$  [13]

#### 3.5.3.4– Procedimento adoptado para o acerto da reologia das misturas

Caso não se verificassem os valores admissíveis para  $G_c$  e  $R_c$  para determinado betão, era necessário efectuar-se medidas correctivas para a mistura. Os procedimentos a adoptar na correcção das misturas passaram pelos seguintes pontos:

- 1) Feitas as amassaduras experimentais, realizou-se o ensaio de espalhamento medindo os dois diâmetros perpendiculares entre si. Sempre que o valor médio do diâmetro de espalhamento fosse inferior a 600 mm, colocava-se de novo o betão na betoneira e procedia-se a um acréscimo de água ou superplastificante.
- 2) O ensaio de espalhamento é sempre realizado antes do ensaio de fluidez, verificando-se que sempre que betão cumpria os requisitos estabelecidos para o primeiro ensaio, verificava automaticamente os requisitos estabelecidos para o segundo.

Estas correcções só são consideradas admissíveis se forem muito pequenas, isto é, se a adição de água ou superplastificante não provocar uma alteração superior a 0,02 na razão água/cimento expressa em massa.

É de salientar ainda que foi produzido apenas um betão para cada valor de  $V_m/V_g$ , fazendo-o passar pelas quatro restrições evitando assim produção de um elevado número de amassaduras. Desta forma, cada betão inicialmente foi submetido aos ensaios de espalhamento, Funil-V e da “Caixa-L”, voltando de novo à betoneira onde era realizado um acerto para voltar a obter uma trabalhabilidade idêntica à inicial, sendo depois submetido de novo aos ensaios de espalhamento e “Caixa-L” com restrições diferentes.

### 3.5.3.5– Ensaio Laboratoriais

#### 3.5.3.5.1– Generalidades

A campanha experimental dos betões incidiu na combinação dos parâmetros chave definidos para os betões com os parâmetros chaves definidos para as argamassas. As amassaduras experimentais dos betões foram calculadas para um volume de 25 litros.

Tendo sempre como objectivo a avaliação da auto-compactabilidade dos betões na Caixa-L, sob diferentes restrições ao escoamento e diferentes volumes absolutos de agregados grossos, produziram-se quatro betões em que a principal diferença entre eles residia no parâmetro  $V_m/V_g$ , que tomou os valores de 2,4, 2,3, 2,2 e 2,1.

Por fim, definidos todos os parâmetros chaves, determinou-se através da folha de Excel as quantidades dos constituintes dos betões e procedeu-se à sua amassadura.

#### 3.5.3.5.2– Acondicionamento e medição dos materiais

Nas argamassas já foram descritos os procedimentos adoptados para a maior parte dos materiais no que diz respeito ao seu acondicionamento. Resta apenas acrescentar que os procedimentos adoptados no acondicionamento dos agregados grossos foram idênticos aos agregados finos.

À semelhança do procedimento adoptado nas argamassas, os materiais foram todos medidos em massa. Para as dosagens de água e superplastificante recorreu-se à balança já descrita nas argamassas, com capacidade máxima de 6 Kg e uma divisão de escala de 0,1 gramas. Para as dosagens de materiais finos, agregados finos e agregados grossos recorreu-se a uma balança electrónica de capacidade máxima de 60 Kg e divisão de escala de 0,010 kg. Os materiais finos apresentavam-se na altura da pesagem no estado seco enquanto todos os agregados apresentavam-se saturados com a superfície seca. A Figura 3.23 ilustra todos os materiais já pesados e prontos a entrar na betoneira.



Figura 3.23 - Materiais constituintes dos betões

### 3.5.3.5.3– Procedimentos de amassadura

Foi definida a mesma sequência de amassadura que Nepomuceno [13] utilizou no seu trabalho, encontrando-se ilustrada na Figura 3.24. Comparando com procedimento adoptado nas argamassas, apenas foi excluída a paragem para a limpeza das pás. O tempo de mistura foi controlado com o mesmo cronómetro utilizado nas argamassas.

Para a realização das amassaduras dos betões auto-compactáveis utilizou-se uma betoneira de mistura forçada que se ilustra na Figura 3.25. O aspecto do betão após a amassadura é demonstrado na Figura 3.26.

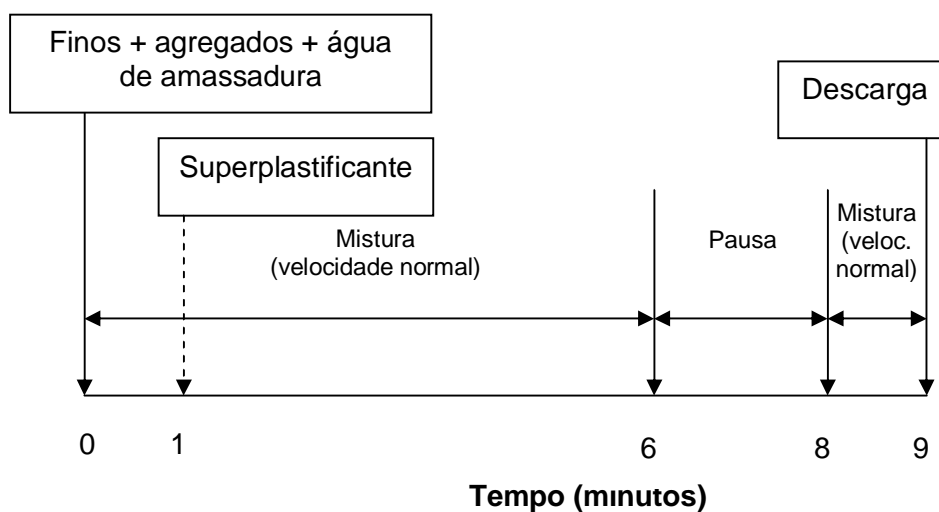


Figura 3.24 - Sequência de amassadura adoptada para os betões [13]



Figura 3.25 - Betoneira misturadora utilizada na produção dos betões



**Figura 3.26** - Aspecto geral do betão após a amassadura

#### **3.5.3.5.4– Procedimentos de ensaio**

Os três ensaios realizados aos betões para avaliar as suas propriedades no estado fresco foram o ensaio de espalhamento, o ensaio de fluidez e o ensaio da “Caixa-L”. Na falta de disposições normativas nacionais ou estrangeiras, optou-se por descrever sumariamente os procedimentos adoptados, assim como a interpretação dos resultados.

##### **3.5.3.5.4.1– Ensaio de espalhamento**

Na realização deste ensaio, o cone de espalhamento foi colocado sobre de uma superfície lisa, desempenada, nivelada e sem saliências que influenciasses o movimento do betão aquando a sua deformação (Figura 3.27). Tanto o cone e a superfície foram limpos com um pano humedecido antes do início do ensaio. Depois de terminada a amassadura, encheu-se completamente o cone com o betão no estado fresco, sendo a sua superfície alisada mas sem aplicar qualquer tipo de vibração ou compactação.



**Figura 3.27** - Cone de espalhamento sobre superfície lisa

O passo seguinte foi levantar o cone para que o betão pudesse deformar-se e espalhar-se sobre a superfície, atingindo o seu diâmetro máximo, que coincide no instante em o movimento cessa (Figura 3.28).



**Figura 3.28** - Betão espalhado sobre a superfície lisa

Ao cessar o movimento do betão, determinou-se o seu diâmetro médio de espalhamento ( $D_m$ ), que corresponde à média dos diâmetros medidos em duas direcções perpendiculares como podemos observar nas Figuras 3.29 e 3.30.



**Figura 3.29** - Medição do diâmetro da argamassa segundo uma direcção



**Figura 3.30** - Medição do diâmetro da argamassa segundo a direcção perpendicular

Os resultados deste ensaio podem ser expressos directamente pelo diâmetro médio de espalhamento. Ainda assim, este resultado pode ser expresso também através da determinação da área de espalhamento relativa, traduzida pela expressão:

$$G_c = \left( \frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (3.3)$$

Onde:

$G_c$  é a área de espalhamento relativa;

$D_m$  é o Diâmetro médio de espalhamento, em mm;

$D_0$  é o diâmetro inicial na base do cone, mm.

#### 3.5.3.5.4.2– Ensaio de Fluidez

Antes de se realizar o enchimento deve-se limpou-se com um pano humedecido e este foi colocado sobre uma superfície firme e nivelada. Foi necessário assegurar que durante o ensaio não se verificassem oscilações no funil que influenciassem o escoamento do betão.

Verificadas estas condições deu-se início ao enchimento do funil. Quando cheio, a superfície foi alisada mas sem ser aplicada qualquer vibração ou outro modo de compactação como se pode observar na Figura 3.31.

De seguida, a comporta inferior foi aberta e iniciou-se o escoamento do betão, que coincidiu com o momento em que o cronómetro começou a contar. O tempo de escoamento terminou quando, observando o funil de cima para baixo, surgiu o primeiro raio de luz. O resultado deste ensaio pode ser expresso directamente pelo tempo de escoamento ( $t$ ), expresso em segundos. Ainda assim, este resultado pode ser expresso também através da determinação da velocidade relativa de escoamento, traduzida pela expressão:

$$R_c = \frac{10}{t} \quad (3.4)$$

Onde:

$R_c$  é a velocidade relativa de escoamento, em  $s^{-1}$ ;

$t$  é o tempo de escoamento, em segundos



**Figura 3.31** - Enchimento do Funil-V

#### **3.5.3.5.4.3– Ensaio da Caixa-L**

Neste ensaio os parâmetros medidos são  $H_1$  e  $H_2$ , que correspondem à altura do betão na coluna vertical e na extremidade da caixa, respectivamente. Antes de se realizar o enchimento limpou-se a caixa com um pano humedecido e esta foi colocada sobre uma superfície firme e nivelada. Foi necessário assegurar que durante o ensaio não se verificassem oscilações na caixa que influenciassem o escoamento do betão. Verificadas estas condições deu-se início ao enchimento da Caixa-L (Figura 3.32). Quando cheio, a superfície foi alisada mas sem ser aplicada qualquer vibração ou outro modo de compactação.



**Figura 3.32** - Enchimento da Caixa-L com betão

De seguida, a comporta foi aberta e iniciou-se o escoamento do betão. Na Figura 3.33 pode-se observar o escoamento do betão através dos obstáculos.



**Figura 3.33** - Passagem do betão pelo obstáculo na caixa-L

Ao cessar o movimento do betão, mediu-se os parâmetros H1 e H2, como se pode observar nas Figuras 3.34 e 3.35.



**Figura 3.34** - Medição do parâmetro H1 na Caixa-L



**Figura 3.35** - Medição do parâmetro H2 na Caixa-L

### 3.5.4– Avaliação das propriedades do betão no estado endurecido

#### 3.5.4.1– Generalidades

O estudo das propriedades do betão no estado endurecido limitou-se apenas à determinação da resistência à compressão. De seguida são descritos os procedimentos adoptados quer na produção e preparação dos provetes como na realização dos ensaios à compressão.

#### 3.5.4.2– Produção e preparação de provetes para ensaios de compressão

Uma vez realizada a amassadura experimental e os respectivos ensaios para avaliação das propriedades do betão no estado fresco, procedeu-se à moldagem de seis provetes cúbicos de 150 mm de aresta para realizar os ensaios à compressão (Figura 3.36).

Depois de permanecerem 24 horas no interior do laboratório, os provetes foram identificados, descofrados e colocados na câmara de cura a uma temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e a uma humidade relativa de 91% (Figura 3.37) até à data em que foram ensaiados à compressão, de acordo com a Especificação do LNEC E255 [7]. Três dos seis provetes foram ensaiados aos 7 dias de idade, sendo os restantes provetes ensaiados aos 28 dias.



Figura 3.36 - Enchimento dos moldes com betão



Figura 3.37 – Temperatura e humidade da câmara de cura

### 3.5.4.3– Ensaio de compressão

Completado o tempo de cura, os provetes foram retirados da câmara de cura. Seguiu-se a pesagem de cada provete registando o seu valor para uma posterior estimativa da massa volúmica aparente. Finalmente, após estes processos realizou-se os ensaios de compressão aos provetes, recorrendo à prensa ilustrada na Figura 3.38. Os provetes foram colocados no prato inferior da prensa com a face moldada (face superior) voltada para o observador de forma a que a força de compressão seja aplicada na direcção perpendicular à direcção da moldagem, como se pode observar na Figura 3.39.



**Figura 3.38** - Prensa utilizada no ensaio de compressão dos provetes



**Figura 3.39** - Posição do provete na prensa