

**MÉTODOS DE ESTUDO DA COMPOSIÇÃO:
O ESTADO DA ARTE**

CAPÍTULO 2 – Métodos de estudo da composição: O estado da arte

2.1– Introdução

Tal como acontece nos betões correntes, o cálculo das proporções de mistura de betões auto-compactáveis é realizado tendo em vista as propriedades pretendidas para o betão, quer no estado fresco como no estado endurecido. Ainda assim, devido às maiores exigências de desempenho, o betão auto-compactável antevê uma maior complexidade no cálculo das proporções da mistura, necessitando do controlo de um número mais amplo de variáveis.

A principal preocupação dos métodos propostos nos últimos anos é produzir um betão com um nível de auto-compactabilidade satisfatório, não prestando especial atenção às propriedades finais do betão no estado endurecido. Nepomuceno [13] propõe-nos uma abordagem diferente, definido uma metodologia que parte inicialmente pela escolha da resistência pretendida para o betão de forma a definir a razão W/C.

Para o estudo dos betões auto-compactáveis, alguns autores sugeriram estudar inicialmente as argamassas e posteriormente os betões. O estudo das argamassas envolve um menor volume de material, um menor número de variáveis, um menor número de parâmetros e uma maior facilidade de execução dos ensaios. Para tal, foram estudados e definidos os parâmetros reológicos para as argamassas apropriados à produção de betões auto-compactáveis.

Hoje em dia, existem vários métodos propostos para o cálculo das proporções das misturas dos betões auto-compactáveis. Neste trabalho serão destacados e descritos nos Sub-Capítulos seguintes os métodos propostos pelo Professor Okamura et al. [3, 12, 17, 18] (método geral), pela “Japan Society of Civil Engineers” (JSCE) [3, 12], pelo CBI [3, 19, 20] e pelo Professor Nepomuceno [13], ficando este último com maior destaque pelo facto de ser a base deste trabalho de investigação.

2.2– Método de Okamura

Este método foi proposto em 1993 por Okamura, Ozaka e Maekawa [3, 12, 17], ficando conhecido por método geral pelo facto de ter originado desenvolvimentos posteriores. Este método é relativamente simples, podendo ser implementado através do procedimento que é apresentado sob a forma de fluxograma na Figura 2.1.

Os materiais utilizados neste método incluem agregados grossos com uma variação de dimensão entre os 5 mm e os 20 mm, agregados finos com máxima dimensão de 5mm e um cimento Portland de baixo calor de hidratação, excluindo o uso de agentes de viscosidade.

Os valores propostos para as dosagens de agregados garantem a auto-compactabilidade do betão independentemente das pequenas variações que possam ocorrer durante a produção. Ou seja, a auto-compactabilidade do betão é determinada acima daquilo que seria necessário, pelo que o método geral é considerado conservador.

A ausência de qualquer referência quanto à utilização do nível de resistência à compressão do betão como dado essencial base para a formulação da composição é uma das

limitações deste método. Ainda assim, a baixa razão W/C imposta neste método para cumprir os requisitos do betão no estado fresco, resulta em resistências apropriadas para a maioria das estruturas.

As proporções da mistura, por metro cúbico, são determinadas utilizando o procedimento apresentado na Figura 2.1. De seguida descrevem-se sumariamente cada etapa deste procedimento.

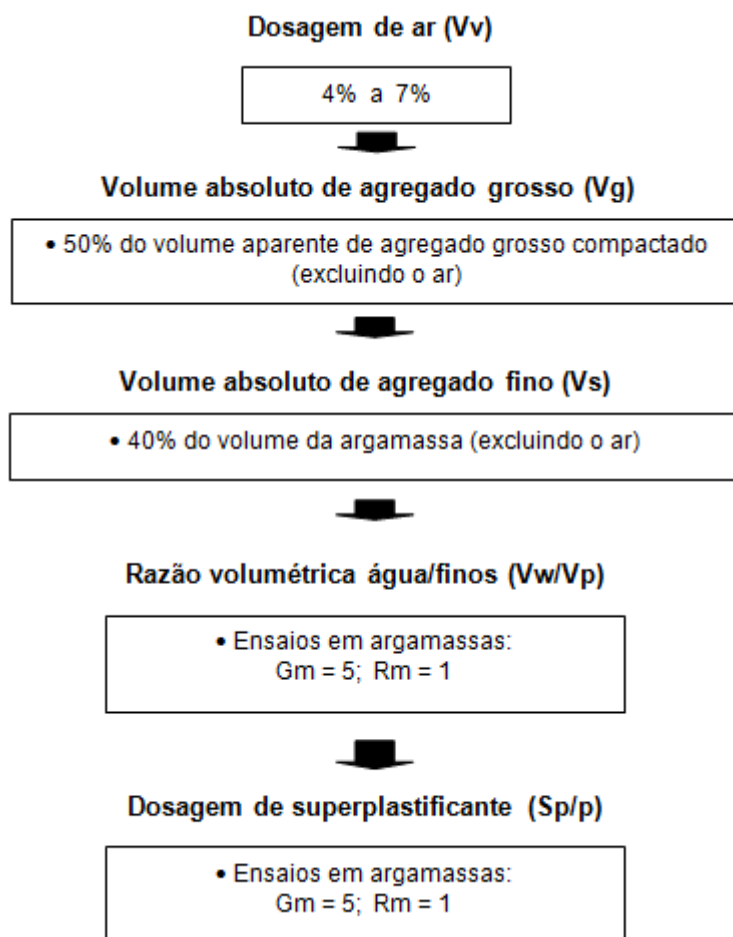


Figura 2.1 - Método geral proposto por Okamura et al. [13]

2.2.1– Volume de ar

Os valores apresentados para o volume de ar (Vv) situam-se entre 4% e 7%, sendo parte deste volume introduzido para resistir à acção do gelo-degelo, podendo também levar a uma redução de água e cimento.

2.2.2– Agregados grossos

O volume absoluto de agregados grossos (Vg) é cerca de 50% do volume ocupado pelas partículas de agregado grosso compactado na unidade de volume aparente de um metro cúbico, sem contabilizar o volume de ar previsto para a composição.

O volume ocupado pelas partículas de agregado grosso compactado na unidade de volume aparente de um metro cúbico ($V_{g,lim}$) é no limite equivalente à razão entre o valor da baridade compactada e o valor da massa volúmica do agregado. Assim, o volume absoluto de agregados grossos a utilizar é dado pela seguinte equação:

$$V_g = 0,50 \times V_{g,lim} \cdot (1 - V_v) \quad (2.1)$$

Onde:

V_g é o volume de agregado grosso para a mistura, em m^3/m^3 ;

V_v é o volume de ar (vazios) previsto para a mistura, em m^3/m^3 ;

$V_{g,lim}$ é o volume aparente de agregado grosso compactado, em m^3/m^3

Esta forma de determinar o volume de agregados grossos na mistura permite indirectamente contabilizar o efeito da forma das partículas e da sua distribuição granulométrica. Quanto mais contínua for a distribuição granulométrica, maior será o arranjo entre as partículas, menor será o volume de vazios (maior compactidade), e consequentemente, maior será o valor da baridade. Por fim, um maior valor da baridade significa um maior volume de agregados grossos presentes na composição do betão.

2.2.3– Agregados finos

O volume absoluto de agregados finos (V_s) é cerca de 40% do volume da argamassa constituinte do betão, excluindo o volume de vazios e com volume absoluto de agregados grossos já determinado. Para fazerem parte dos agregados finos, a dimensão das partículas devem variar entre os 0,09 mm e os 5 mm, sendo considerado material fino se estiver abaixo deste intervalo e agregado grosso se estiver acima [13].

Sabendo a percentagem de material fino presente no agregado fino através da distribuição granulométrica, o volume absoluto de agregado fino a utilizar na mistura é dado pela seguinte equação:

$$V_s = \frac{0,40 \times (1 - V_v - V_g)}{1 - K_{sf}} \quad (2.2)$$

Onde:

V_s é o volume de agregados fino na mistura, em m^3/m^3 ;

V_v é o volume de ar previsto para a mistura, em m^3/m^3 ;

V_g é o volume de agregado grosso para a mistura, em m^3/m^3 ;

K_{sf} é a percentagem unitária do volume de material fino presente na unidade de volume de agregado fino.

A quantidade de agregado fino na mistura é considerada crítica, dependendo praticamente da forma das partículas, da distribuição destas e das propriedades do cimento. Uma quantidade muito alta de agregados finos pode fazer com que as partículas interfiram umas com outras causando bloqueios. Por outro lado, uma quantidade muito baixa de agregados finos resulta numa quantidade necessariamente elevada de cimento e de água que seria prejudicial para o betão no estado endurecido.

2.2.4– Razão volumétrica água/finos e dosagem de superplastificante.

Segundo o método geral, contrariamente ao que acontece no cálculo dos betões correntes, a razão volumétrica água/finos não pode ser estabelecida como parâmetro base para o cálculo da composição da mistura, uma vez que este parâmetro é determinado mediante ensaios consoante a auto-compactabilidade pretendida para o betão. Desta forma, a única forma de controlar a resistência à compressão é através das combinações de diferentes materiais finos.

O método geral recomenda que a melhor combinação entre os parâmetros água/finos (V_w/V_p) e a dosagem de superplastificante ($S_p/p\%$) seja determinada mediante ensaios em argamassas, de forma a obter os parâmetros reológicos pré-estabelecidos [13]. A determinação destes parâmetros reológicos tem como base o ensaio de espalhamento e o ensaio de fluidez (Funil-V). O primeiro é realizado com o recurso a um molde tronco-cónico enquanto o segundo é realizado com o recurso a um funil de faces planas conforme mostra a Figura 2.2.

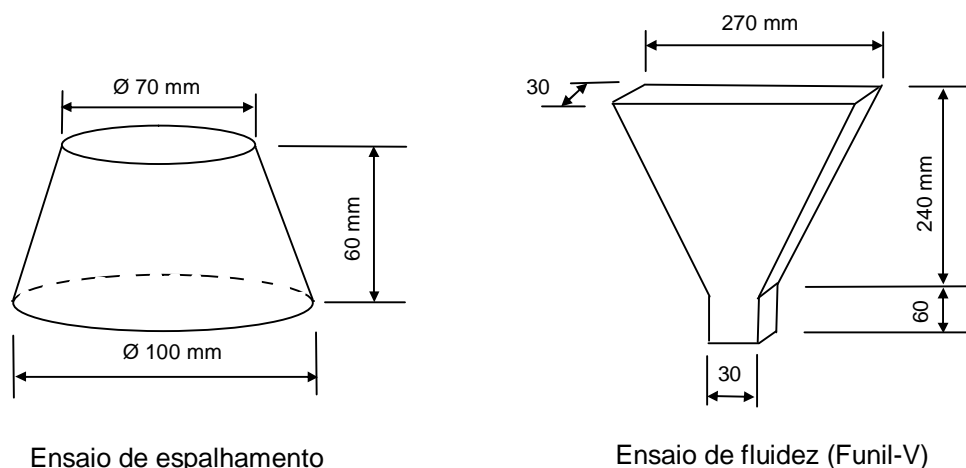


Figura 2.2 - Equipamentos para os ensaios de espalhamento e de fluidez nas argamassas [3]

No ensaio de espalhamento, o tronco cónico é colocado sobre uma superfície plana, lisa, nivelada e limpa e é totalmente preenchido com argamassa, sem aplicar qualquer vibração. De seguida o cone é levantado, espalhando-se a argamassa em forma de círculo aproximadamente. Cessando o movimento, é medido o diâmetro do círculo em duas direcções perpendiculares entre si e determina-se o seu valor médio (D_m), que constitui o resultado do ensaio.

No ensaio de fluidez, o Funil é nivelado e preenchido completamente com argamassa sem aplicar qualquer vibração. De seguida é aberta a comporta da base do funil, iniciando-se o escoamento que coincide com o instante em que o cronómetro começa a contar. Assim que,

olhando de cima para baixo, surja o primeiro raio de luz termina o tempo. O tempo em segundos constitui o resultado do ensaio.

Por fim, os resultados são convertidos em área relativa de espalhamento (G_m) no caso do ensaio de espalhamento e em velocidade relativa de escoamento (R_m) no caso do ensaio de fluidez da seguinte forma.

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (2.3)$$

Onde:

D_m é o Diâmetro médio de espalhamento, em mm;

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

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (2.4)$$

Onde:

t é o tempo de escoamento no Funil-V, em segundos

O parâmetro G_m representa a capacidade de deformação da argamassa enquanto o parâmetro R_m representa a sua velocidade de deformação. A razão volumétrica água/finos (V_w/V_p) e a dosagem de superplastificante (Sp/p) são ajustadas experimentalmente até se atingir simultaneamente um valor de $G_m=5$ e um valor de $R_m=1$. Os parâmetros G_m e R_m apresentam uma boa correlação com os parâmetros reológicos, respectivamente, tensão de corte e viscosidade plástica [14].

Estabelecidos os parâmetros adequados das argamassas, procede-se às amassaduras experimentais nos betões para confirmar os valores referentes aos parâmetros reológicos e aos requisitos funcionais da auto-compactabilidade. Tal como nas argamassas, os parâmetros reológicos dos betões são avaliados através dos ensaios de espalhamento e de fluidez, cuja as dimensões são apresentadas na Figura 2.3. Os procedimentos destes ensaios são idênticos aos descritos nos ensaios respectivos nas argamassas.

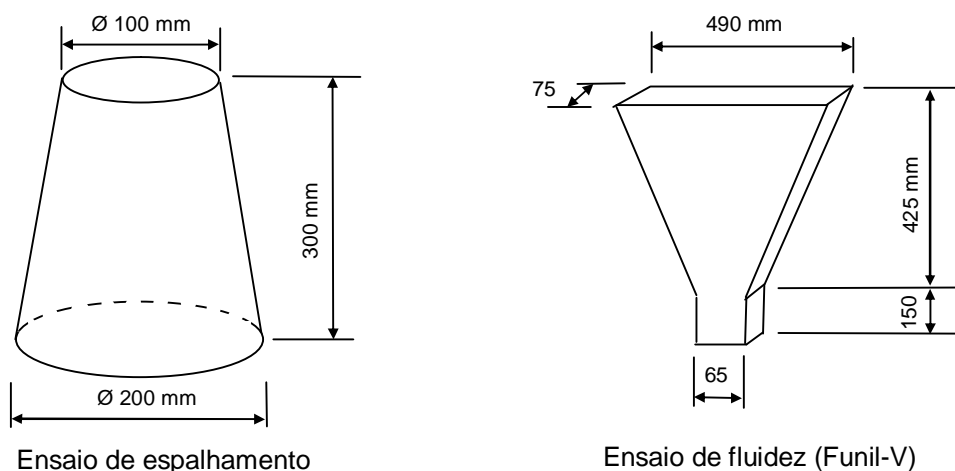


Figura 2.3 - Dimensões dos equipamentos dos ensaios de espalhamento e fluidez nos betões [3]

O diâmetro de espalhamento é considerado satisfatório quando se encontra entre 600 mm e 700 mm, podendo o betão ser acertado através da dosagem de superplastificante até o valor se encontre dentro do intervalo. Por outro lado, o tempo de escoamento no Funil-V deverá estar entre 10 e 20 segundos para que seja cumprido o critério de velocidade de deformação.

Para verificar os requisitos funcionais de auto-compactabilidade é utilizado o ensaio da “Caixa”, apresentado nas Figuras 2.4 e 2.5. Assim, para o betão ser considerado auto-compactável a altura de enchimento (H), medida na “Caixa”, deverá ser igual ou superior a 300 mm.

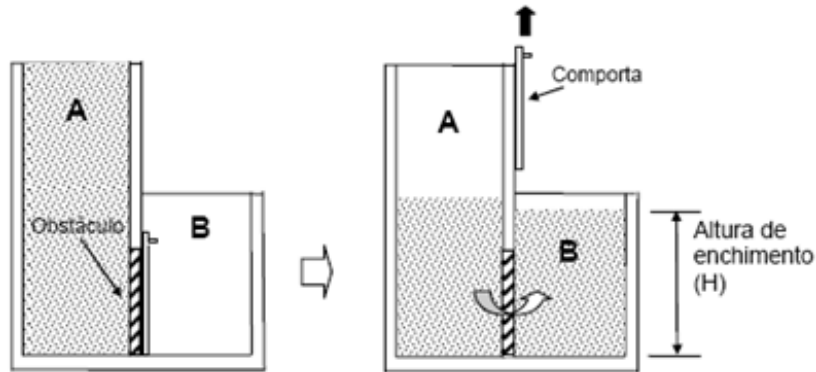


Figura 2.4 - Esquema do ensaio da “Caixa” [12]

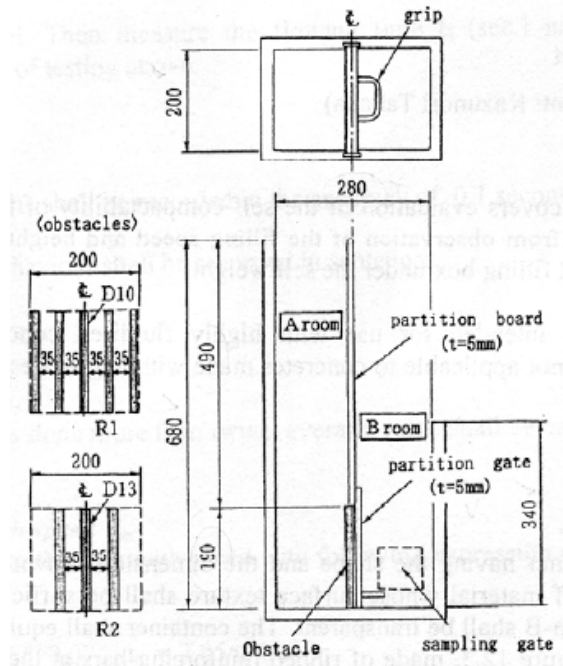


Figura 2.5 - Dimensões do ensaio da “Caixa”

2.3– Método da JCSE

Tal como no método geral, o método proposto pela Sociedade Japonesa de Engenharia Civil (JSCE) pode ser implementado mediante o procedimento “passo-a-passo” apresentado na Figura 2.6 [3, 12].

Este método é o único que lida directamente com a possibilidade de utilização de agentes de viscosidade. Assim, a dosagem unitária de água, a razão água/finos (ou razão água/ligante) e a dosagem unitária de materiais finos (ou dosagem unitária de ligante) variam conforme a utilização ou não de agentes de viscosidade. As proporções das misturas também podem variar consoante a natureza do agente de viscosidade utilizado, como podemos verificar no Quadro 2.1. Domone [3] refere que a utilização de agentes de viscosidade conduz a misturas com maiores quantidades de água e menores quantidades de finos, quando comparadas com as misturas dos betões sem agentes de viscosidade.

Para a abordagem do betão no estado fresco, este método estabelece três níveis de requisitos funcionais e de auto-compactabilidade. Deste modo, o nível de auto-compactabilidade mais adequado é estabelecido mediante o nível de desempenho pretendido para o betão, conforme as exigências do elemento a betonar, mais especificamente, a forma e dimensões das cofragens como também a densidade e disposição das armaduras. No Quadro 2.2 estão apresentados resumidamente os três níveis de auto-compactabilidade, sendo o nível 2 de auto-compactabilidade o mais corrente em termos de espaçamento entre varões e densidade de armaduras.

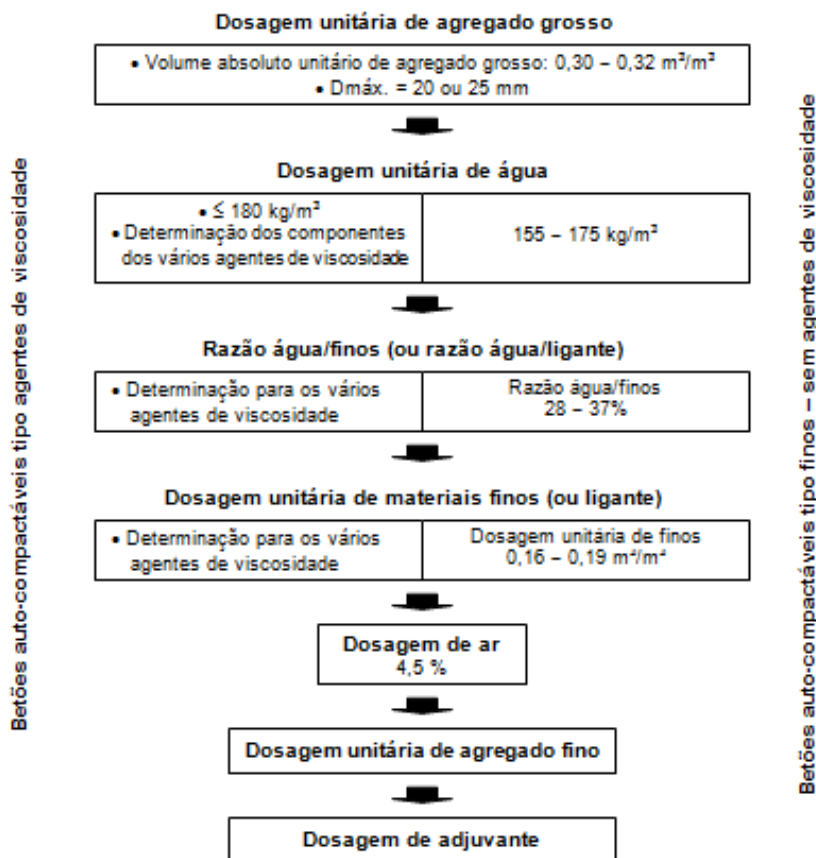


Figura 2.6 - Procedimento “passo-a-passo” do método proposto pela JSCE [12]

Quadro 2.1- Síntese do método proposto pela JSCE [3, 12]

Factor	Sem agente de viscosidade	Tipo de agente de viscosidade			
		Celuloso	Acrílico	Glicol	Polissacarídeos
Agregados grossos	0,30 – 0,32 m ³ /m ³ (Nota 1)				
Água (Nota 2)	155 – 175 kg/m ³	170 – 180 kg/m ³		155 – 170 kg/m ³	
Água/Finos (Nota 3)	0,28 – 0,37 em massa	Depende das propriedades pretendidas para o betão endurecido			
Finos (Nota 4)	0,16 – 0,19 m ³ /m ³	300 – 450 kg/m ³	400 – 450 kg/m ³	400 – 480 kg/m ³	> 0,13 m ³ /m ³
Ar	Normalmente 4,5 % (Nota 5)				
Agregados finos	Mediante o cálculo a partir das quantidades de agregado grosso, água, materiais finos e quantidade de ar				
Super-plastificante	A partir da experiência do passado ou informação do fabricante				
Agente de viscosidade		0,15 – 0,30 % da massa de água	3 – 5 % da massa de água	2 – 3 % da massa de água	0,05 % da massa de água

Nota 1: Pode ser superior se for exigido um menor grau de auto-compactabilidade (por exemplo como definido no ensaio Caixa-U);
Nota 2: Se a durabilidade não for uma preocupação principal, a quantidade de água pode subir até 190 kg/m³;
Nota 3: Se não for alcançada a necessária auto-compactabilidade, adiciona-se mais ligante para reduzir a razão água/finos;
Nota 4: Esta quantidade é calculada a partir da dosagem de água e da razão água/finos. Os valores fornecidos são valores típicos;
Nota 5: Este valor depende da máxima dimensão do agregado, resistência necessária e condições de exposição ambiental.

Quadro 2.2 - Requisitos funcionais e de auto-compactabilidade [12]

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 ³	≥ 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 ³ /m ³		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

Note-se que, quando se passa do nível 1 para os níveis superiores, o volume de agregados grossos aumenta e, conseqüentemente, a quantidade de agregados finos e de materiais finos diminuem. Os materiais finos representam a maior parcela do custo dos materiais utilizados na composição dos betões auto-compactáveis.

2.4– Método do CBI

Este método proposto pelo CBI (“Swedish Cement and Concrete Research Institute”) estabelece uma nova abordagem face aos métodos já apresentados neste trabalho [3]. A principal diferença assenta na forma como determina as dosagens dos agregados finos e grossos e conseqüentemente, na forma como determina a dosagem da pasta da mistura [12]. Também existem diferenças na determinação das dosagens de água e de superplastificante como nos ensaios em argamassas e betões [3].

Este método desenvolvido por Petersson (CBI), Billberg (CBI) e Van Bui [19, 20] em 1996, assume que o betão é constituído por duas fases: a “fase líquida” e a “fase sólida”. A primeira inclui os materiais finos (cimentos e adições minerais), água, e adjuvantes e parte do volume de ar, enquanto a segunda inclui praticamente os agregados finos e grossos. Basicamente a “fase líquida” inclui a pasta e a “fase sólida” inclui os agregados.

Esta evolução do método do CBI permitiu a obtenção de misturas mais económicas e ao mesmo tempo betões com propriedades mecânicas e de durabilidade mais adequadas. Uma vez que o volume de pasta representa a maior fatia de custo na composição de betões auto-compactáveis, este método propõe a sua redução ao mínimo indispensável, otimizando a fase sólida (agregados). Tal optimização é conseguida através da melhor combinação entre os agregados finos e grossos que levam ao menor volume de pasta sem que haja bloqueio do betão na passagem pelas armaduras, baseando-se no conceito de máxima distância inter-partículas e no critério de bloqueio [3, 19, 20, 23]. A Figura 2.7 ilustra de forma esquemática o método proposto pelo CBI.

Pelo critério de máxima distância inter-partículas, para cada volume de pasta existirá uma razão óptima entre os agregados grossos e finos que conduzirá à máxima distância entre as superfícies das partículas, levando assim a uma melhor deformabilidade e capacidade de passagem do betão, uma vez que haverá menor atrito entre as partículas dos agregados.

O critério de bloqueio permite determinar o volume total de agregados máximo para a mistura de forma a obter uma certa auto-compactabilidade sem que haja bloqueio, uma vez conhecidas as proporções entre os agregados grossos e finos, a máxima dimensão dos agregados e a sua distribuição granulométrica. Este critério também inclui as condições exteriores como o diâmetro e espaçamento dos varões.

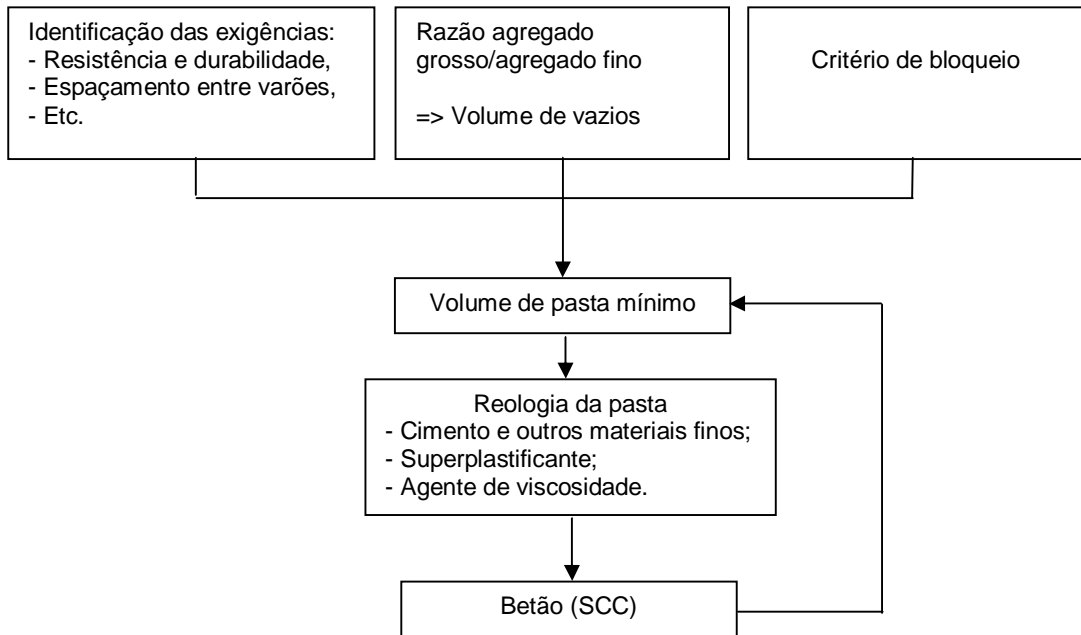


Figura 2.7 - Método proposto pelo CBI [13]

2.4.1 - Razão óptima agregado grosso / total de agregado

A resistência ao bloqueio e a capacidade de deformação dependem do atrito entre as partículas dos agregados [23]. O atrito está interligado com a distância média inter-partículas, que pode variar em função da dosagem de pasta na composição do betão e da distribuição granulométrica do total dos agregados.

Segundo o método do CBI, a distância média entre as superfícies das partículas é determinada como o dobro da espessura das camadas de pasta que as envolvem como se pode observar na Figura 2.8.

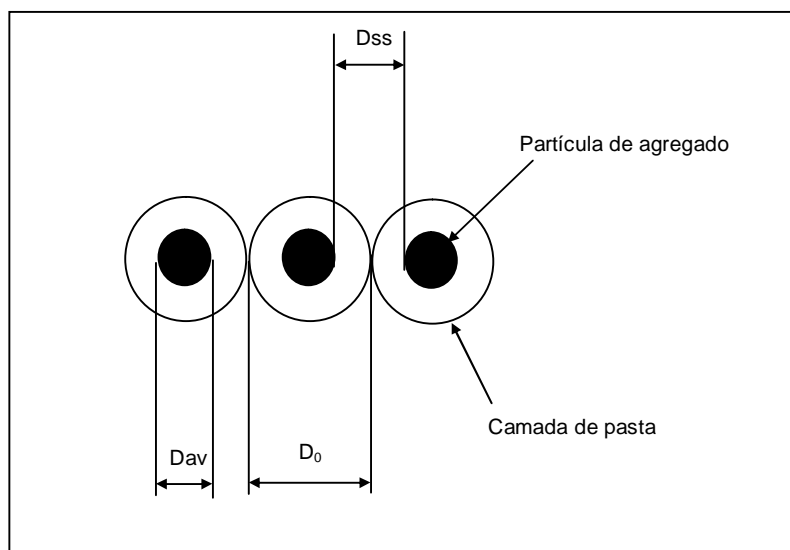


Figura 2.8 - Distância média inter-partículas [23]

A distância média inter-partículas (D_{ss}) pode ser calculada através da curva granulométrica dos agregados, depois de calculado o diâmetro médio das partículas de agregado (D_{av}) pela seguinte expressão [23].

$$D_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (2.5)$$

onde:

D_i – Média das dimensões do grupo de peneiros

$$D_i = (d_i + d_{i+1})/2$$

d_i – dimensão do peneiro i onde o material está retido,

d_{i+1} – dimensão do peneiro imediatamente acima do peneiro i ,

M_i – percentagem de agregado retido no grupo de peneiros,

n – número de grupos de peneiros.

Uma vez calculado o diâmetro médio das partículas, a distância média entre partículas é determinada pela expressão seguinte [23]:

$$D_{ss} = D_{av} \left\{ \left[\frac{V_{pw} - V_{void}}{V_t - V_{pw}} + 1 \right]^{1/3} - 1 \right\} \quad (2.6)$$

onde:

D_{ss} – distância média entre as partículas de agregado,

V_t – volume total de betão,

V_{pw} – volume de pasta no betão,

V_{void} – volume de vazios do total de agregados no estado compactado (determinado experimentalmente),

D_{av} – diâmetro médio do total de partículas de agregado

Na Equação 2.6 é assumido que as partículas dos agregados são esféricas. Ainda assim, o factor de angulosidade (Y) que representa a razão entre a superfície específica de um grupo de partículas irregulares e a superfície específica de um grupo de superfície esférica pode ser aplicado.

2.4.2 - Volume máximo de agregado admissível

Para não correr o risco de bloqueio nas situações com taxas de armaduras elevadas, este método introduziu o “critério de bloqueio”, que consiste em determinar o volume máximo admissível de agregado tendo em conta as características dos materiais na fase sólida (tipo de agregado, máxima dimensão do agregado, distribuição granulométrica e proporção agregado grosso/agregado fino) e as condições externas (espaçamento livre entre varões) [3, 19, 20, 23].

Deste modo, é apresentado na Figura 2.9 um modelo para estimar o volume de bloqueio para diferentes tipos de agregados [23].

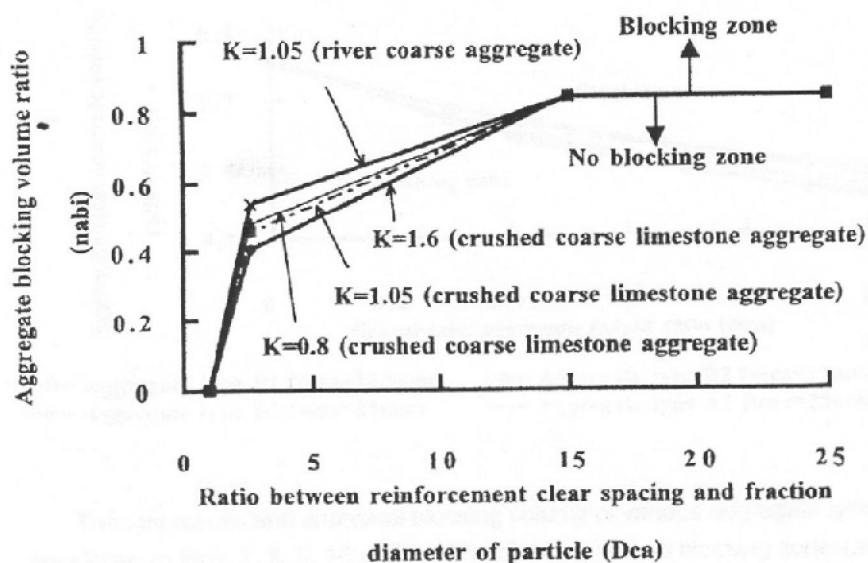


Figura 2.9 - Modelo utilizado para estimar o volume bloqueio [23]

Os parâmetros n_{abi} , D_{ca} e K da Figura 2.9 são definidos da seguinte forma:

$$n_{abi} = V_{abi}/V_t \quad (2.7)$$

$$D_{ca} = c/D_{af} \quad (2.8)$$

$$K = \phi/D_{m\acute{a}x} \quad (2.9)$$

Onde:

n_{abi} – razão volumétrica de bloqueio do agregado do grupo i ,

V_{abi} – Volume de bloqueio do agregado do grupo i ,

V_t – volume total de betão,

C – espaçamento livre entre varões,

D_{af} – Três quartos da fracção granulométrica; $D_{af} = M_{i-1} + 3/4(M_i - M_{i-1})$;

M_i e M_{i-1} são as dimensões superior e inferior dos peneiros para o agregado do grupo i , respectivamente.

ϕ - Diâmetro da armadura,

$D_{m\acute{a}x}$. – Máxima dimensão do agregado

O volume máximo admissível do total de agregado, conhecida a razão agregado grosso/total de agregado, pode ser determinado pela seguinte equação.

$$\text{Risco de bloqueio} = \sum_{i=1}^n (n_{ai}/n_{bi}) = \sum_{i=1}^n \frac{(V_{ai}/V_t)}{V_{bi}/V_t} = \sum_{i=1}^n (V_{ai}/V_{bi}) = 1 \quad (2.10)$$

Onde:

- V_{ai} – Volume do agregado do grupo i,
- V_{bi} – Volume de bloqueio do agregado i,
- V_t – Volume total de betão,
- N – Número de grupos de dimensões dos agregados.

Pela Equação 2.10 conclui-se que o volume máximo do total de agregados é o volume pelo qual o risco de bloqueio é igual a 1.

Em suma, este critério de bloqueio deverá ser sempre combinado com a teoria proposta neste método relativamente ao volume de vazios e superfície específica (máxima distância entre partículas) de forma a determinar a melhor ligação entre agregado grosso / total de agregado e o volume máximo admissível de agregado que evita o bloqueio.

2.4.3 – Avaliação das propriedades do betão

Para verificar as características essenciais de auto-compactabilidade deve ser realizada uma amassadura experimental submetendo-a aos ensaios de “espalhamento do betão” e “Caixa-L”. Se os critérios impostos por estes ensaios não se verificarem, deverão alterar-se o volume de pasta ou a sua composição e repetir-se os ensaios. Tais critérios consistem na obtenção de um diâmetro de espalhamento de aproximadamente 700 mm sem sinais de segregação e numa taxa de bloqueio (H2/H1) superior a 0,80 estando os agregados uniformemente distribuídos ao longo da “Caixa-L” [12].

2.5– Método de Nepomuceno

O presente trabalho tem como objectivo a optimização técnico-económica de betões auto-compactáveis tendo por base o método de estudo da composição de betões auto-compactáveis proposto por Nepomuceno [13]. Nesse sentido, este método será abordado de uma forma mais profunda uma vez que foi a partir deste método que se estudou a composição dos betões ensaiados em laboratório.

Na sua tese de Doutoramento, Nepomuceno [13] apresenta uma proposta para o estudo da composição de betões auto-compactáveis que pode ser resumida por etapas no Fluxograma ilustrado na Figura 2.10. Este fluxograma é composto basicamente por quatro etapas principais: a definição dos dados essenciais de base, a definição das opções de base em relação aos materiais, estudo em argamassas e, por fim, estudo em betões. Nos sub-Capítulos seguintes serão abordados de forma resumida as etapas supracitadas.

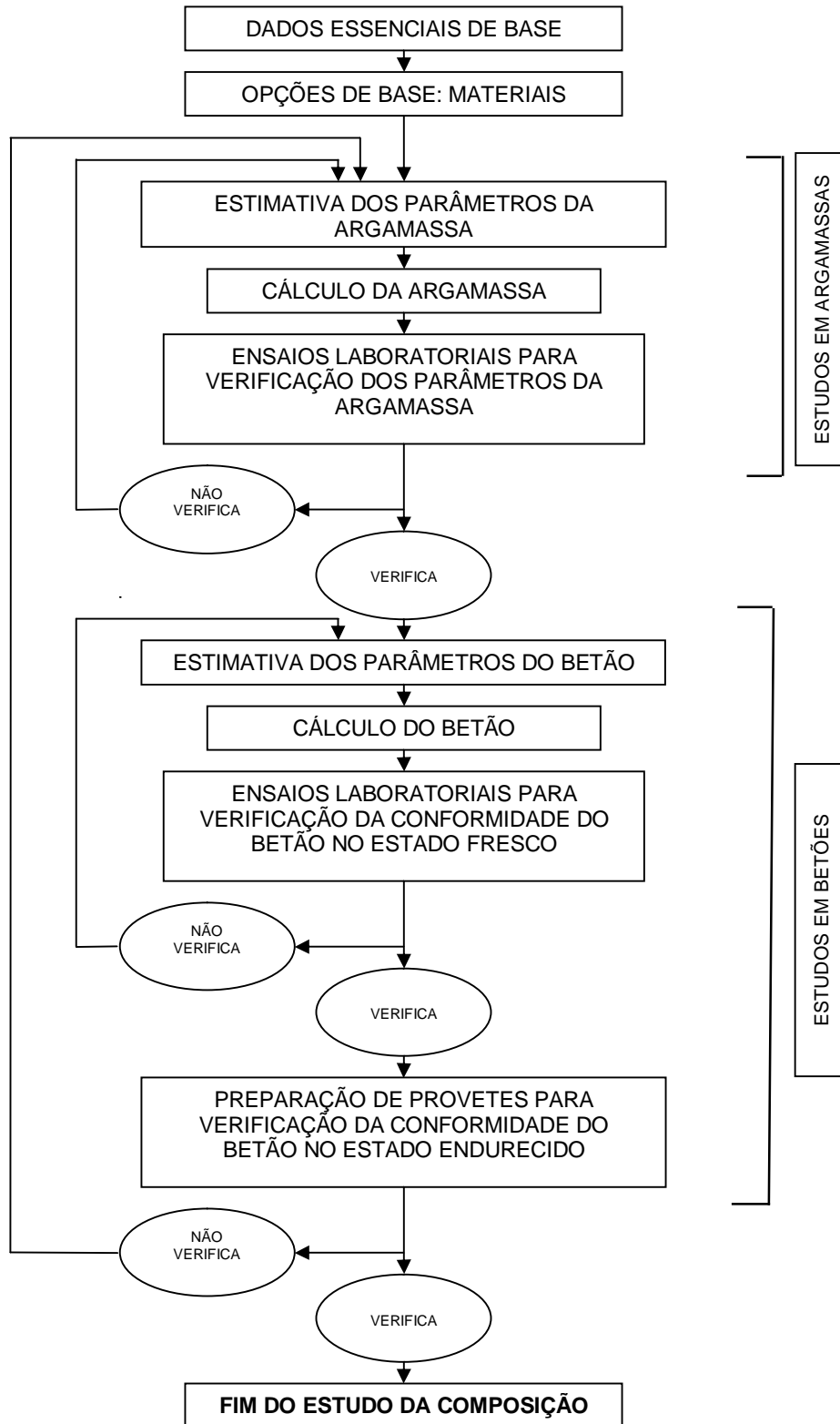


Figura 2.10 - Fluxograma para o estudo de composição de betões auto-compactáveis [13]

2.5.1– Dados essenciais de base

Nesta etapa são definidas as propriedades pretendidas para o betão auto-compactável, quer no estado fresco quer no estado endurecido. São considerados requisitos especiais de cada elemento a betonar, tais como, espaçamento entre armaduras, a classe de exposição ambiental, condições de transporte e de betonagem. Por outras palavras, são considerados os elementos que podem condicionar, tanto a escolha dos materiais, como o estudo da composição do betão.

As propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido segundo o presente método, contempla apenas a resistência à compressão, expressa pelo seu valor médio aos 28 dias de idade ($f_{cm,28}$). Os parâmetros de durabilidade impostos pela classe de exposição ambiental podem ser deduzidos a partir da razão W/C ou da dosagem mínima de cimento, tal como sucede também nos betões convencionais.

Para atingir a auto-compactabilidade do betão no estado fresco, o método proposto por Nepomuceno [13] adopta uma máxima dimensão dos agregados grossos de 19,1mm e ensaios de auto-compactabilidade com espaçamentos entre varões reduzidos, de forma a ter um grau de exigência elevado. Este método permite também averiguar o grau de auto-compactabilidade pretendido, traduzido pelos parâmetros (H2/H1) ou (H) medidos no ensaio da “Caixa-L” e “Caixa”, respectivamente.

2.5.2– Opções de base: materiais

Apesar de este método admitir a utilização de outros materiais além daqueles utilizados, será necessária a obtenção de correlações adequadas para esses materiais semelhantes às desenvolvidas no método em questão [13].

Para utilizar as correlações desenvolvidas neste método, a escolha dos materiais deverá recair sobre o cimento CEM II/B-L32,5 ou cimento CEM I 42,5R relativamente ao tipo de ligante. Quanto ao tipo adições minerais, poderão utilizar-se cinzas volantes, fíler calcário ou fíler granítico. É recomendado apenas a utilização de associações binárias, envolvendo um dos cimentos e uma das adições. O cimento será escolhido tendo em conta a resistência à compressão pretendida através da análise das correlações entre a resistência à compressão aos 28 dias de idade e a razão W/C ilustrada na Figura 2.11.

É recomendado utilizar o mesmo tipo de superplastificante utilizado por Nepomuceno [13] na sua campanha experimental, nomeadamente Sika ViscoCrete-3000. Se o superplastificante variar, deverá ser constituído pela mesma base química.

A escolha dos agregados finos poderá recair sobre qualquer combinação de areias naturais roladas, desde que a curva de referência do conjunto dos agregados finos seja muito próxima daquela definida neste método. A curva de referência dos agregados finos utilizada no presente método é apresentada no Quadro 2.3 e na Figura 2.12.

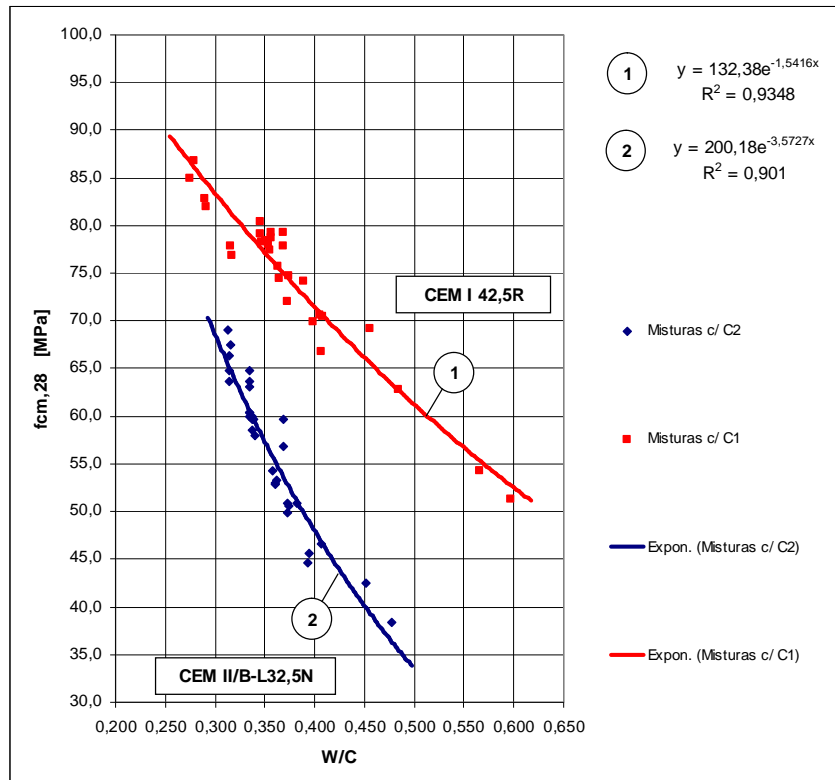


Figura 2.11 - Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão W/C tendo por base valores efectivos [13]

Quadro 2.3 - Curva de referência dos agregados finos [13]

Peneiro	Malha [mm]	Areia 01	Areia 05	Mistura (Curva de Referência)
		a_1	a_2	
		0,40	0,60	
Percentagens acumuladas de passados				
3"	76,20	100,00	100,00	100,00
(*) 2"	50,80	100,00	100,00	100,00
1" ½	38,10	100,00	100,00	100,00
(*) 1"	25,40	100,00	100,00	100,00
¾"	19,10	100,00	100,00	100,00
(*) ½"	12,70	100,00	100,00	100,00
⅜"	9,52	100,00	100,00	100,00
N.º 4	4,76	100,00	99,94	99,96
N.º 8	2,38	99,97	98,56	99,12
N.º 16	1,19	99,89	84,75	90,81
N.º 30	0,590	91,06	43,13	62,30
N.º 50	0,297	48,16	2,97	21,05
N.º 100	0,149	11,49	0,21	4,72
N.º 200	0,074	2,04	0,05	0,85
Resíduo		0,00	0,00	0,00
Módulo de Finura ►		1,494	2,705	2,220
(*) Série secundária				
Peneiros para o cálculo do módulo de finura				

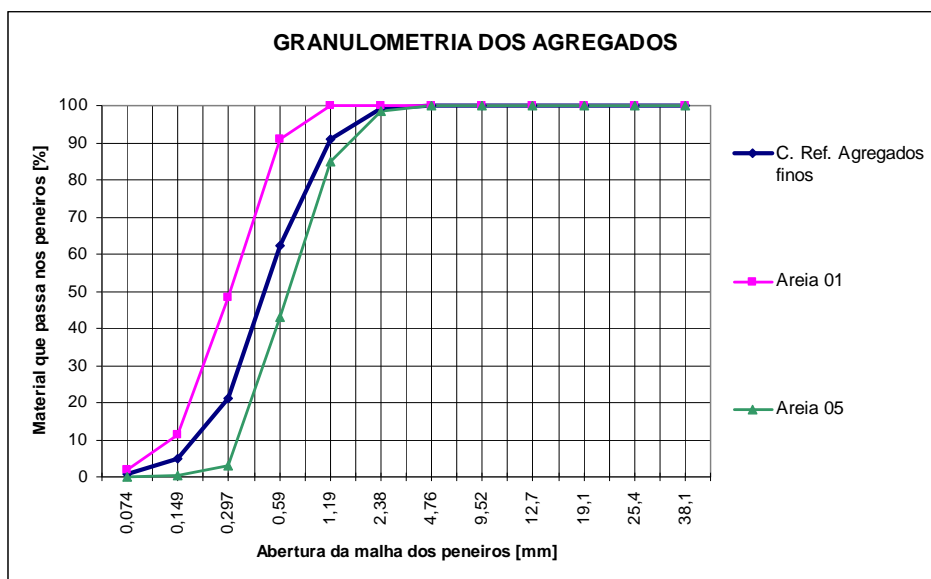


Figura 2.12 - Curva de referência dos agregados finos [13]

A escolha dos agregados grossos poderá, tal como nos agregados finos, recair em qualquer combinação de material britado, desde que a curva de referência do conjunto dos agregados grossos seja muito próxima daquela definida neste método. A curva de referência dos agregados grossos utilizada no presente método é apresentada no Quadro 2.4 e na Figura 2.13.

Quadro 2.4 - Curva de referência dos agregados grossos [13]

Peneiro	Malha [mm]	Brita 3/6	Brita 6/15	Mistura (Curva de Referência)
		g1	g2	
		0,50	0,50	
Percentagens acumuladas de passados				
3"	76,20	100,00	100,00	100,00
(*) 2"	50,80	100,00	100,00	100,00
1" ½	38,10	100,00	100,00	100,00
(*) 1"	25,40	100,00	100,00	100,00
¾"	19,10	100,00	100,00	100,00
(*) ½"	12,70	100,00	89,14	94,57
⅓"	9,52	100,00	49,79	74,90
N.º 4	4,76	70,84	2,24	36,54
N.º 8	2,38	11,68	0,29	5,99
N.º 16	1,19	4,28	0,20	2,24
N.º 30	0,590	2,46	0,16	1,31
N.º 50	0,297	1,46	0,12	0,79
N.º 100	0,149	0,90	0,09	0,50
N.º 200	0,074	0,50	0,05	0,28
Resíduo		0,00	0,00	0,00
Módulo de Finura ►		5,084	6,471	5,777
(*) Série secundária				
Peneiros para o cálculo do módulo de finura				

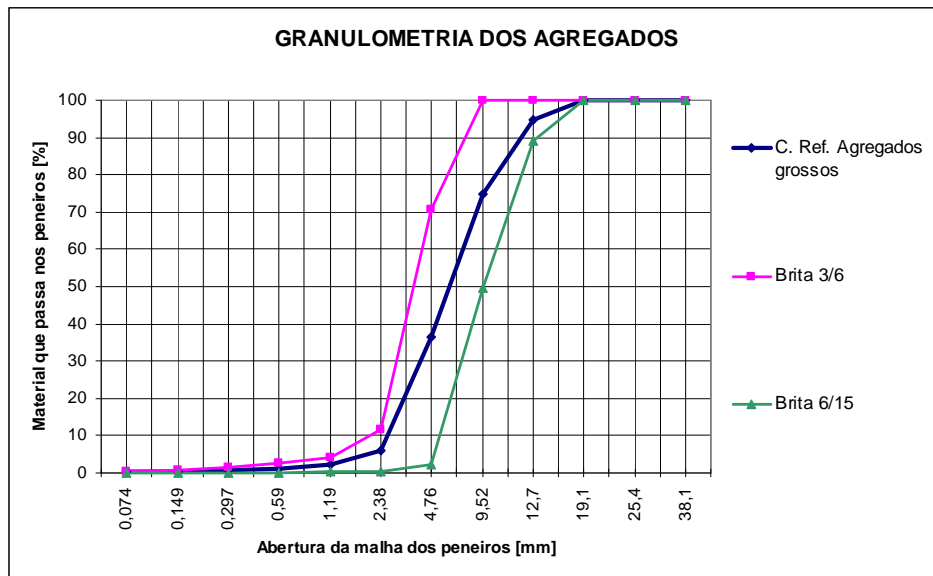


Figura 2.13 - Curva de referência dos agregados grossos [13]

2.5.3– Estudos em argamassas

Esta etapa inicia-se com a definição da razão W/C, consoante a resistência pretendida para o betão. Neste método, a razão W/C definida nas argamassas corresponde à razão W/C dos betões, pelo que sabendo a resistência pretendida é possível estimar a razão W/C da argamassa (Figura 2.11) que coincide com a razão W/C do betão. O passo seguinte desta etapa é adoptar um valor para a razão volumétrica (V_p/V_s). Este valor deverá situar-se entre 0,60 e 0,80, mas recomenda-se que esse intervalo seja reduzido a 0,65 e 0,80.

Uma vez definido o parâmetro (V_p/V_s) e a razão W/C da argamassa, determina-se a percentagem de substituição de adição pelo cimento pelas correlações desenvolvidas por Nepomuceno [13] e ilustradas nas Figuras 2.14 à 2.19.

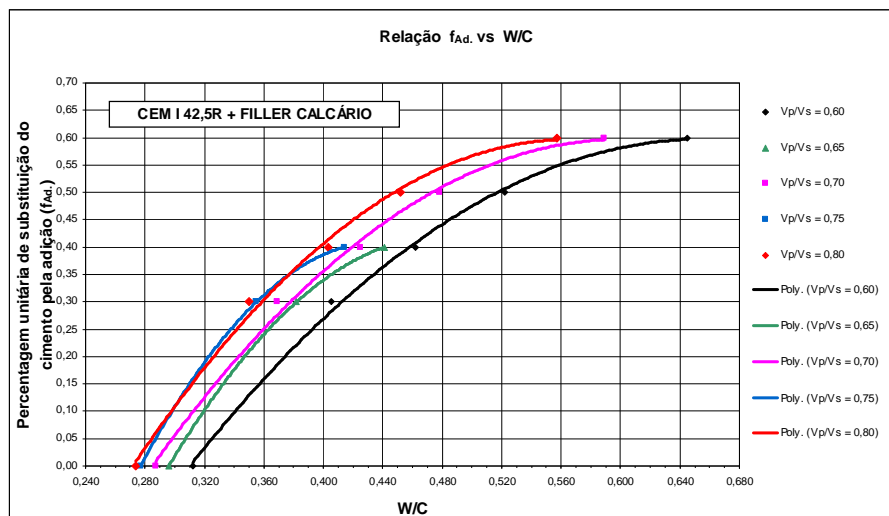


Figura 2.14 - Relação f_{Ad} versus W/C para famílias com CEM I 42,5R e fíler calcário [13]

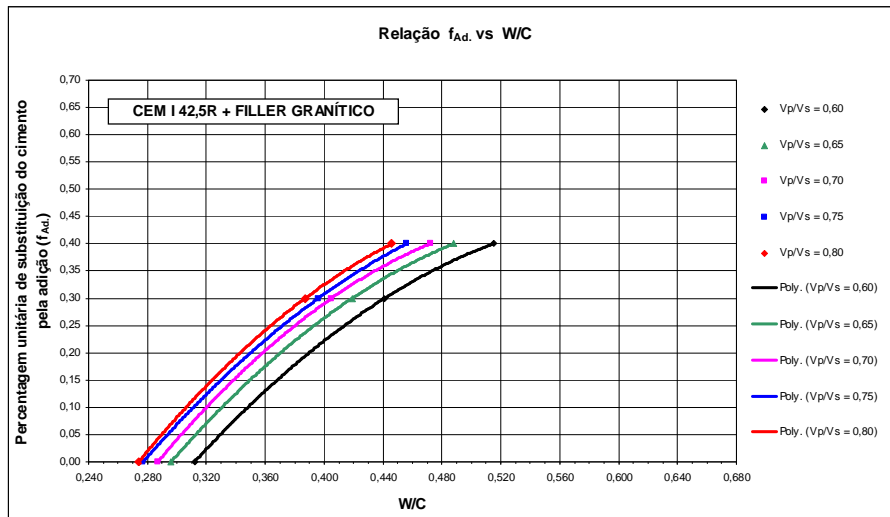


Figura 2.15 - Relação f_{Ad} versus W/C para famílias com CEM I 42,5R e filler granítico [13]

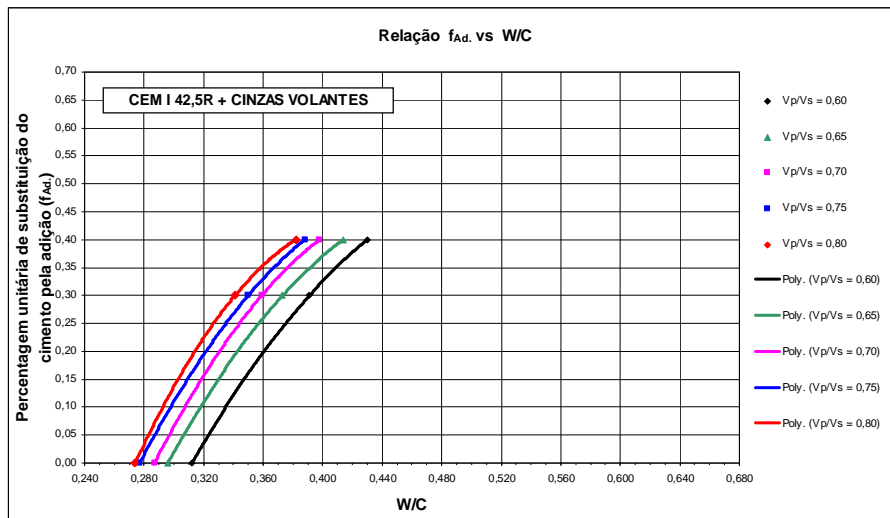


Figura 2.16 - Relação f_{Ad} versus W/C para famílias com CEM I 42,5R e cinzas volantes [13]

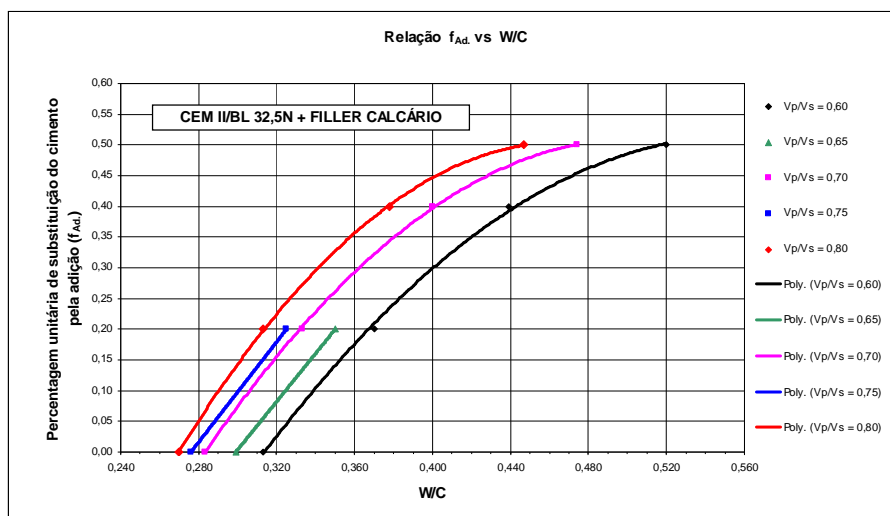


Figura 2.17 - Relação f_{Ad} versus W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e filler calcário [13]

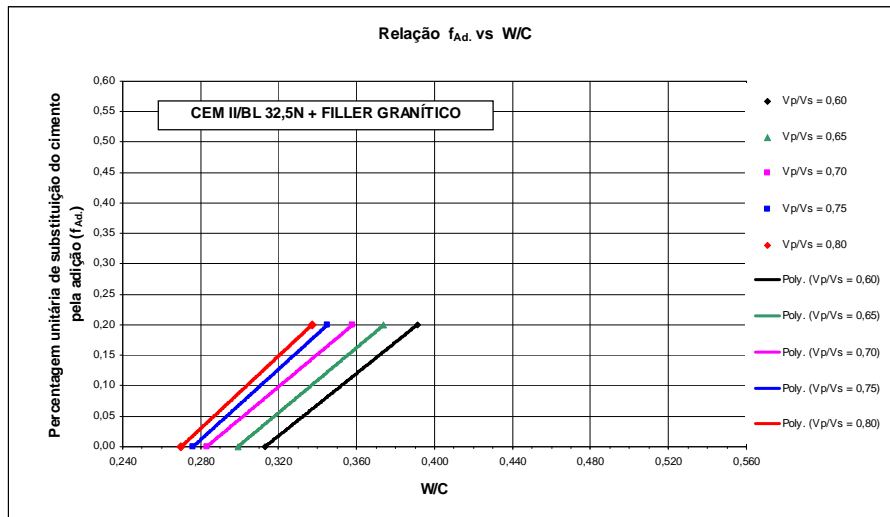


Figura 2.18 - Relação f_{Ad} versus W/C para famílias com CEM II/B-L32,5N e filler granítico [13]

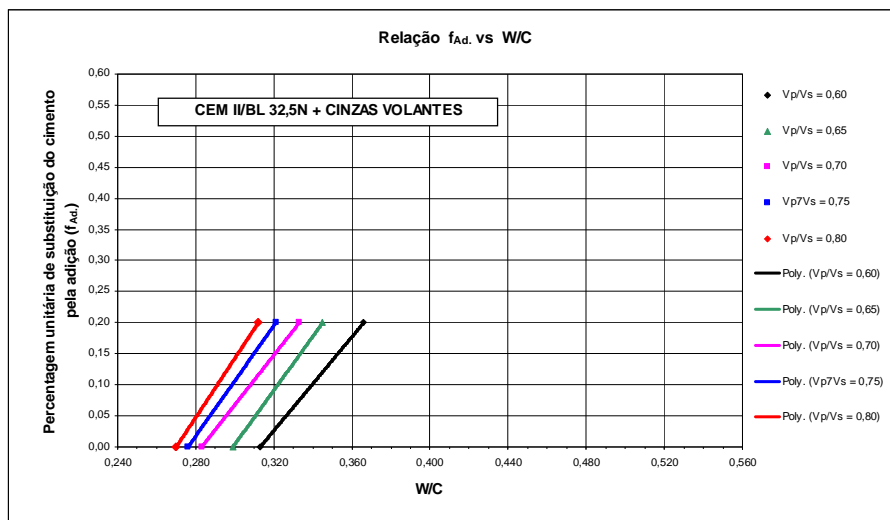


Figura 2.19 - Relação f_{Ad} versus W/C para famílias com CEM II/B-L32,5N e cinzas volantes [13]

Uma vez definidos os parâmetros (Vp/Vs), a “família de finos” e as frações granulométricas das areias, procede-se à determinação experimental dos parâmetros (Vw/Vp) e ($Sp/p\%$) que conduzem aos parâmetros reológicos pretendidos, isto é, Gm entre 5,3 e 5,9 e Rm entre 1,14 e 1,30 s^{-1} como podemos verificar na Figura 2.20. Inicialmente estes valores podem ser estimados através de correlações desenvolvidas por Nepomuceno [13] e apresentadas nas Figuras 2.21 à 2.24.

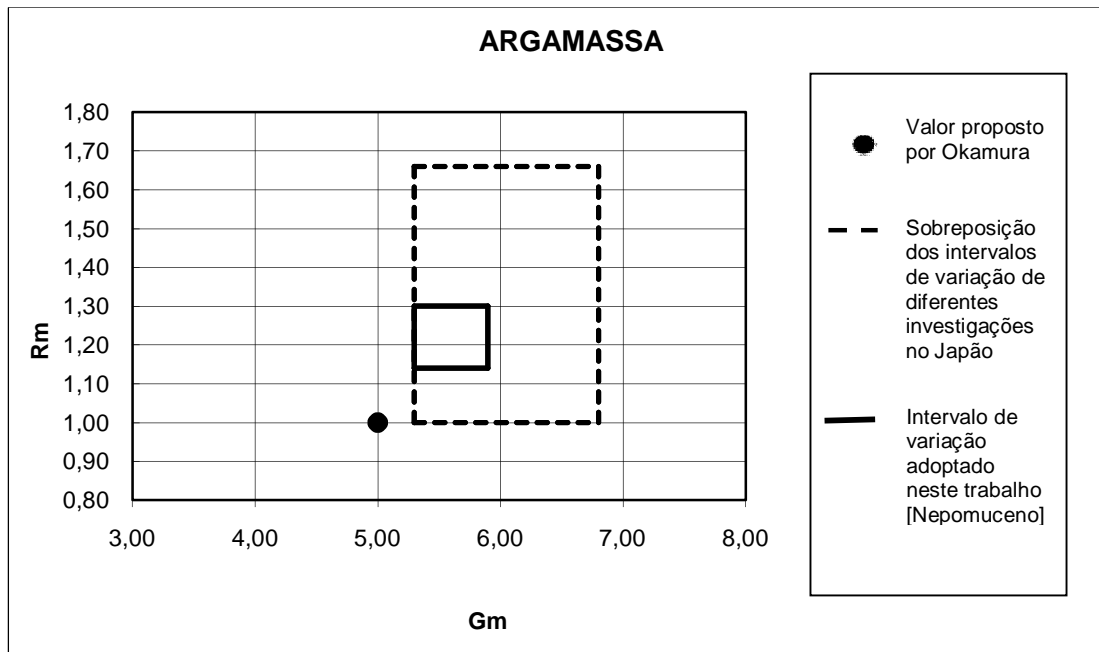


Figura 2.20 - Intervalo de variação dos parâmetros reológicos adoptados neste método [13]

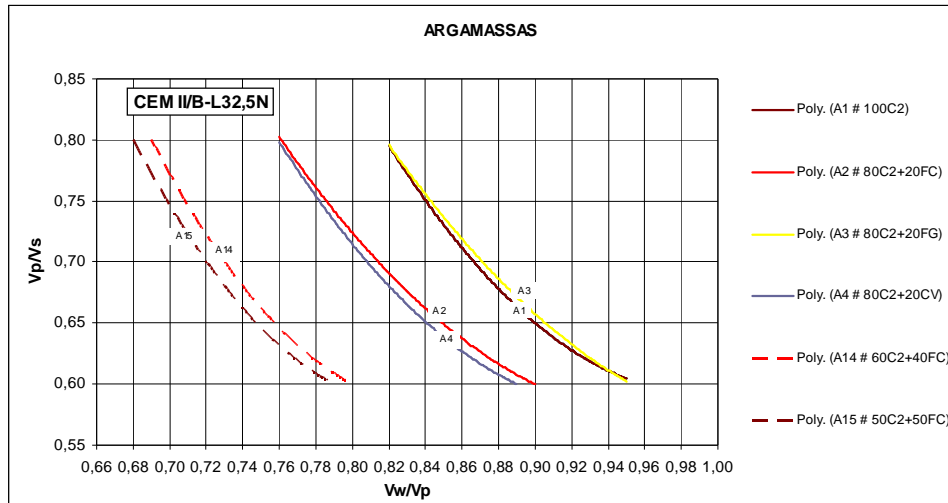


Figura 2.21 - Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para famílias com CEM II/B-L32,5 [13]

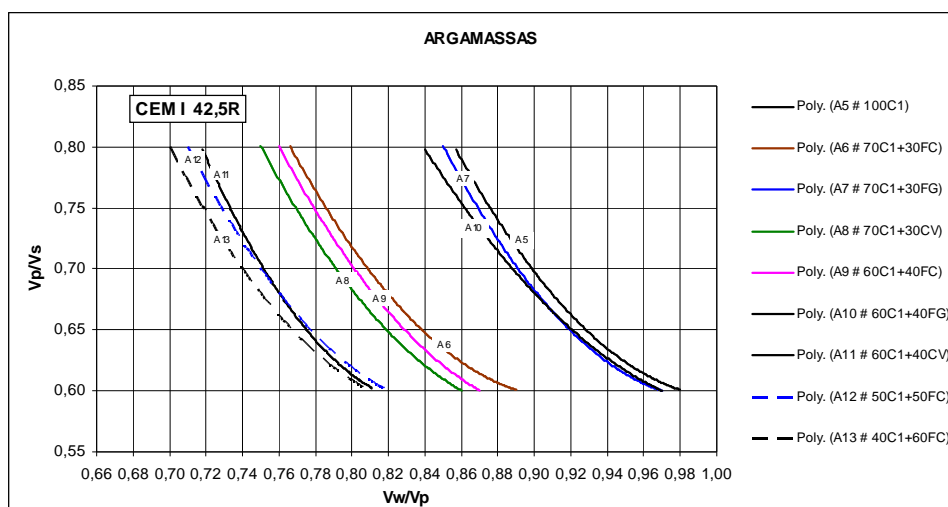


Figura 2.22 - Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para famílias com CEM I 42,5 [13]

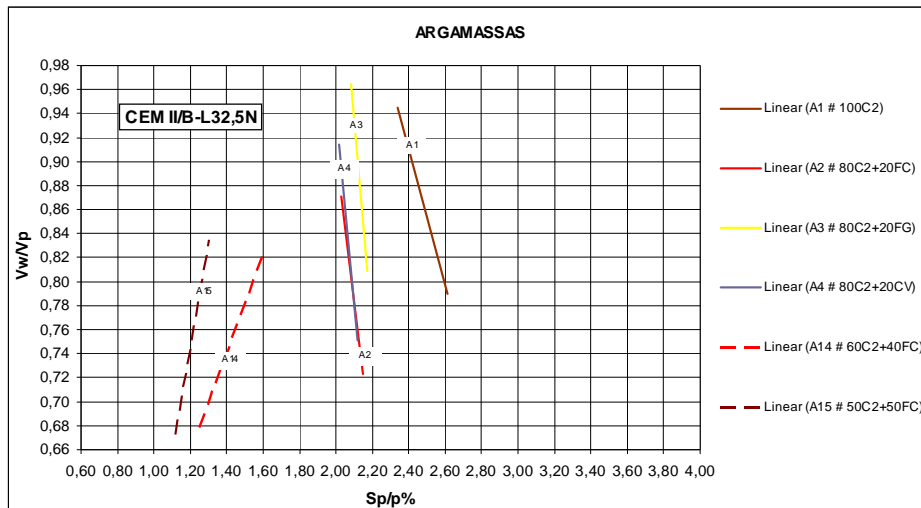


Figura 2.23 - Relação Vw/Vp versus Sp/p% para famílias com CEM II/B-L32,5 [13]

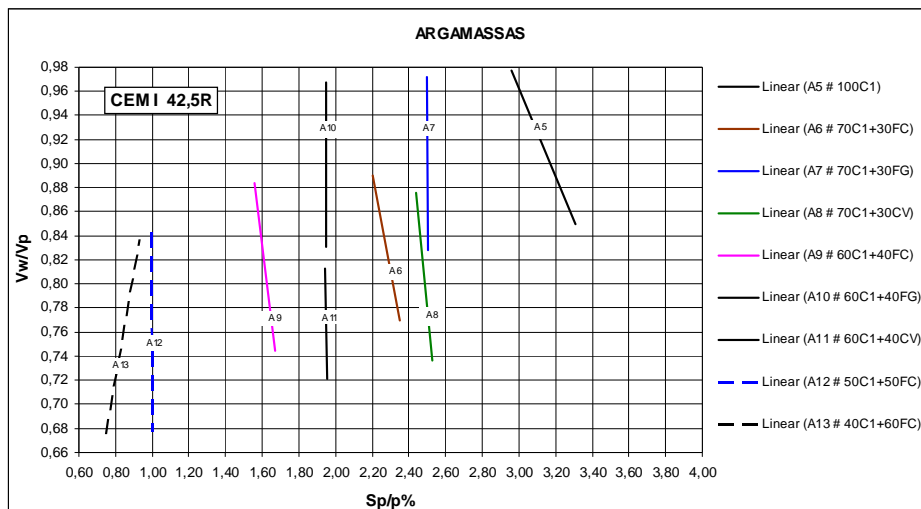


Figura 2.24 - Relação Vw/Vp versus Sp/p% para famílias com CEM I 42,5 [13]

De seguida procede-se ao cálculo da composição da argamassa. O cálculo da composição da argamassa que Nepomuceno [13] apresenta neste método é exemplificativo para uma situação em que se dispõe de dois agregados finos e uma qualquer mistura de finos.

No cálculo das argamassas são utilizados os seguintes parâmetros:

- 1) Percentagem unitária em volume absoluto dos agregados finos (V_s)

$$V_s = a_1 \times V_{s1} + a_2 \times V_{s2} \quad (2.11)$$

Onde:

a_1 é a percentagem unitária em volume absoluto da areia 0/2,

a_2 é a percentagem unitária em volume absoluto da areia 0/4.

2) Parâmetros que definem a família de finos (V_p)

$$V_p = f_{c1} \times V_p + f_{c2} \times V_p + f_{cv} \times V_p + f_{ms} \times V_p + f_{fc} \times V_p + f_{fg} \times V_p \quad (2.12)$$

Onde:

f_{c1} é percentagem unitária em volume absoluto do cimento tipo I 42,4R,

f_{c2} é percentagem unitária em volume absoluto do cimento tipo II/B-L32,5N,

f_{cv} é percentagem unitária em volume absoluto das cinzas volantes,

f_{ms} é percentagem unitária em volume absoluto da microssílica,

f_{fc} é percentagem unitária em volume absoluto do fíler calcário,

f_{fg} é percentagem unitária em volume absoluto do fíler granítico.

- 3) O parâmetro que define a relação em volume absoluto entre as quantidades de finos e de agregados finos (V_p/V_s);
- 4) O parâmetro que define a relação em volume absoluto entre as quantidades de água e de materiais finos (V_w/V_p);
- 5) O parâmetro que representa a relação percentual em massa entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos ($S_p/p\%$).

A fórmula fundamental do cálculo das argamassas para um volume de 1m^3 tem a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} + V_v = 1,0 \quad (2.13)$$

Onde:

V_p é o volume absoluto de materiais finos em m^3/m^3 ,

V_w é o volume de água em m^3/m^3 ,

V_s é o volume absoluto de agregados finos em m^3/m^3 ,

V_{sp} é o volume de superplastificante em m^3/m^3 ,

V_v é o volume de vazios em m^3/m^3 .

Assumindo que o volume de vazios é desprezável no cálculo das argamassas resulta:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} = 1,0 \quad (2.14)$$

Então:

$$V_p + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p + \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \times V_p + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \times V_p = 1,0 \quad (2.15)$$

Assim obtêm-se:

$$V_p = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) + \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right)} \quad (2.16)$$

$$V_w = \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p \quad (2.17)$$

$$V_{sp} = \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \times V_p \quad (2.18)$$

$$V_s = \frac{V_p}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \quad (2.19)$$

De todos os parâmetros apresentados nas expressões anteriores apenas desconhecemos o (V_{sp}/V_p) , que pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$\left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) = \left(\frac{S_p}{P}\right) \times \frac{\delta_P}{\delta_{SP}} \quad (2.20)$$

Onde:

$$\delta_P = fc1 \times \delta_{C1} + fc2 \times \delta_{C2} + fcv \times \delta_{CV} + fms \times \delta_{ms} + ffc \times \delta_{FC} + ffg \times \delta_{FG} \quad (2.21)$$

e

$$\left(\frac{S_p}{P}\right) = \left(\frac{S_p}{P} \%\right) / 100 \quad (2.22)$$

Uma vez conhecido o valor de V_p , podem ser determinadas as dosagens dos materiais finos a partir das seguintes expressões:

$$V_{C1} = fc1 \times Vp ; V_{C2} = fc2 \times Vp \quad (2.23, 2.24)$$

$$V_{CV} = fcv \times Vp ; V_{MS} = fms \times Vp \quad (2.25, 2.26)$$

$$V_{FC} = ffc \times Vp ; V_{FG} = ffg \times Vp \quad (2.27, 2.28)$$

Onde:

V_{C1} é o volume absoluto de cimento tipo I 42,5R, em m^3/m^3 ,

V_{C2} é o volume absoluto de cimento tipo II/B-L32,5N, em m^3/m^3 ,

V_{CV} é o volume absoluto de cinzas volantes, em m^3/m^3 ,

V_{MS} é o volume absoluto de microssílica, em m^3/m^3 ,

V_{FC} é o volume absoluto de fíler calcário, em m^3/m^3 ,

V_{FG} é o volume absoluto de fíler granítico, em m^3/m^3 ,

Os restantes parâmetros assumem o significado já anteriormente referido.

Da mesma forma, conhecido o valor de Vs podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados finos a partir das seguintes expressões:

$$V_{S1} = a_1 \times Vs ; V_{S2} = a_2 \times Vs \quad (2.29, 2.30)$$

Onde:

V_{S1} é o volume absoluto do agregado fino 1 (Areia 01), em m^3/m^3 ,

V_{S2} é o volume absoluto do agregado fino 2 (Areia 05), em m^3/m^3 ,

a_1 é a percentagem unitária do agregado fino 1 (Areia 01),

a_2 é a percentagem unitária do agregado fino 2 (Areia 05).

A partir das respectivas massas volúmicas é possível converter as dosagens em volume absoluto para valores em massa, obtendo assim dosagens por metro cúbico de argamassa. A necessidade de fazer um número elevado de argamassas fez com que Nepomuceno [13] desenvolve-se uma folha de cálculo (Excel) para o estudo das argamassas. Esta folha de cálculo (Excel) será também utilizada neste trabalho, determinando com maior rapidez as quantidades dos materiais para as argamassas. O Quadro 2.5 exemplifica uma situação particular de uma mistura em que: $a_1=0,35$; $a_2=0,65$; $fc1=0,40$; $ffc=0,60$; $Vp/Vs=0,80$; $Vw/Vp=0,70$; $Sp/p\%=0,3$. Os valores a azul representam os dados de entrada.

A verificação dos parâmetros reológicos faz-se com a realização do ensaio de espalhamento e o ensaio de fluidez (Funil-V) [13]. Os equipamentos necessários para a realização destes ensaios tal como os procedimentos adoptados serão apresentados no Capítulo seguinte "Descrição do programa experimental", uma vez que foram utilizados os mesmos equipamentos para a realização do presente trabalho.

Quadro 2.5 - Exemplo de uma folha de Excel para o cálculo de uma argamassa [13]

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																																																			
Identificação da argamassa A.RF.55.I.FC.0.80.1		Identificação da mistura de finos 40C1+60FC		Data 05-03-2010																																																																															
Parâmetros da composição <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Vp/Vs</td> <td>Vw/Vp</td> <td>Sp/P%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,80</td> <td style="text-align: center;">0,70</td> <td style="text-align: center;">0,30</td> </tr> </table>			Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%	0,80	0,70	0,30	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="6" style="text-align: center;">Composição da mistura de finos</th> </tr> <tr> <th>fc1</th> <th>fc2</th> <th>fcv</th> <th>fms</th> <th>ffc</th> <th>ffg</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,40</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,60</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> </tr> </table>			Composição da mistura de finos						fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg	0,40	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00																																																						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%																																																																																	
0,80	0,70	0,30																																																																																	
Composição da mistura de finos																																																																																			
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg																																																																														
0,40	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00																																																																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="6" style="text-align: center;">Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³</th> </tr> <tr> <th>δc1</th> <th>δc2</th> <th>δcv</th> <th>δms</th> <th>δfc</th> <th>δfg</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3140</td> <td style="text-align: center;">3040</td> <td style="text-align: center;">2380</td> <td style="text-align: center;">2170</td> <td style="text-align: center;">2720</td> <td style="text-align: center;">2650</td> </tr> </table>			Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³						δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg	3140	3040	2380	2170	2720	2650	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Abertura</th> <th>Areia01</th> <th>Areia05</th> <th>Mistura</th> </tr> <tr> <th>da</th> <th>a1</th> <th>a2</th> <th>(Curva</th> </tr> <tr> <th>malha</th> <td style="text-align: center;">0,35</td> <td style="text-align: center;">0,65</td> <th>Real)</th> </tr> <tr> <th>(mm)</th> <th colspan="3" style="text-align: center;">Porcentagem de passados</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">9,520</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4,760</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">98,48</td> <td style="text-align: center;">99,01</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2,380</td> <td style="text-align: center;">99,94</td> <td style="text-align: center;">94,23</td> <td style="text-align: center;">96,23</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1,190</td> <td style="text-align: center;">99,51</td> <td style="text-align: center;">78,40</td> <td style="text-align: center;">85,79</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,590</td> <td style="text-align: center;">82,79</td> <td style="text-align: center;">40,43</td> <td style="text-align: center;">55,26</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,297</td> <td style="text-align: center;">20,53</td> <td style="text-align: center;">5,91</td> <td style="text-align: center;">11,03</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,149</td> <td style="text-align: center;">1,24</td> <td style="text-align: center;">0,44</td> <td style="text-align: center;">0,72</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,074</td> <td style="text-align: center;">0,16</td> <td style="text-align: center;">0,15</td> <td style="text-align: center;">0,15</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Residuo</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> </tr> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">Módulos de finura</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1,960</td> <td style="text-align: center;">2,821</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">2,520</td> </tr> </table>			Abertura	Areia01	Areia05	Mistura	da	a1	a2	(Curva	malha	0,35	0,65	Real)	(mm)	Porcentagem de passados			9,520	100,00	100,00	100,00	4,760	100,00	98,48	99,01	2,380	99,94	94,23	96,23	1,190	99,51	78,40	85,79	0,590	82,79	40,43	55,26	0,297	20,53	5,91	11,03	0,149	1,24	0,44	0,72	0,074	0,16	0,15	0,15	Residuo	0,00	0,00	0,00	Módulos de finura				1,960	2,821	2,520	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³																																																																																			
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg																																																																														
3140	3040	2380	2170	2720	2650																																																																														
Abertura	Areia01	Areia05	Mistura																																																																																
da	a1	a2	(Curva																																																																																
malha	0,35	0,65	Real)																																																																																
(mm)	Porcentagem de passados																																																																																		
9,520	100,00	100,00	100,00																																																																																
4,760	100,00	98,48	99,01																																																																																
2,380	99,94	94,23	96,23																																																																																
1,190	99,51	78,40	85,79																																																																																
0,590	82,79	40,43	55,26																																																																																
0,297	20,53	5,91	11,03																																																																																
0,149	1,24	0,44	0,72																																																																																
0,074	0,16	0,15	0,15																																																																																
Residuo	0,00	0,00	0,00																																																																																
Módulos de finura																																																																																			
1,960	2,821	2,520																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="5" style="text-align: center;">Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³</th> </tr> <tr> <th>δs1</th> <th>δs2</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2640</td> <td style="text-align: center;">2610</td> <td style="text-align: center;">---</td> <td style="text-align: center;">---</td> <td style="text-align: center;">---</td> </tr> </table>			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					δs1	δs2	---	---	---	2640	2610	---	---	---	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right;">δp=</td> <td>2888,00 kg/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vsp/Vp=</td> <td>0,008251 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vp=</td> <td>0,338038 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vw=</td> <td>0,236626 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vsp=</td> <td>0,002789 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vs=</td> <td>0,422547 m³/m³</td> </tr> </table>			δp=	2888,00 kg/m ³	Vsp/Vp=	0,008251 m ³ /m ³	Vp=	0,338038 m ³ /m ³	Vw=	0,236626 m ³ /m ³	Vsp=	0,002789 m ³ /m ³	Vs=	0,422547 m ³ /m ³																																																			
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³																																																																																			
δs1	δs2	---	---	---																																																																															
2640	2610	---	---	---																																																																															
δp=	2888,00 kg/m ³																																																																																		
Vsp/Vp=	0,008251 m ³ /m ³																																																																																		
Vp=	0,338038 m ³ /m ³																																																																																		
Vw=	0,236626 m ³ /m ³																																																																																		
Vsp=	0,002789 m ³ /m ³																																																																																		
Vs=	0,422547 m ³ /m ³																																																																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="5" style="text-align: center;">Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³</th> </tr> <tr> <th>δsp</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1050</td> <td style="text-align: center;">---</td> <td style="text-align: center;">---</td> <td style="text-align: center;">---</td> <td style="text-align: center;">---</td> </tr> </table>			Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					δsp	---	---	---	---	1050	---	---	---	---																																																																		
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³																																																																																			
δsp	---	---	---	---																																																																															
1050	---	---	---	---																																																																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2">Quantidades para um volume de: 1000,00 litros</td> <td></td> <td colspan="2">Quantidades para um volume de: 1,60 litros</td> </tr> <tr> <td>C1=</td> <td>424,6 kg</td> <td></td> <td>C1=</td> <td>679,3 g</td> </tr> <tr> <td>C2=</td> <td>0,0 kg</td> <td style="text-align: center;"><u>Massa total, em kg</u></td> <td>C2=</td> <td>0,0 g</td> </tr> <tr> <td>CV=</td> <td>0,0 kg</td> <td style="text-align: center;">2323,1</td> <td>CV=</td> <td>0,0 g</td> </tr> <tr> <td>MS=</td> <td>0,0 kg</td> <td style="text-align: center;"><u>Razão água/(mat. cimentícios)</u></td> <td>MS=</td> <td>0,0 g</td> </tr> <tr> <td>FC=</td> <td>551,7 kg</td> <td style="text-align: center;">0,557</td> <td>FC=</td> <td>882,7 g</td> </tr> <tr> <td>FG=</td> <td>0,0 kg</td> <td style="text-align: center;"><u>Razão água/cimento</u></td> <td>FG=</td> <td>0,0 g</td> </tr> <tr> <td>W=</td> <td>236,6 litros</td> <td style="text-align: center;">0,557</td> <td>W=</td> <td>378,6 ml</td> </tr> <tr> <td>Sp=</td> <td>2,79 litros</td> <td style="text-align: center;"><u>Razão água/finos</u></td> <td>Sp=</td> <td>4,46 ml</td> </tr> <tr> <td>S1=</td> <td>390,4 kg</td> <td style="text-align: center;">0,242</td> <td>S1=</td> <td>624,7 g</td> </tr> <tr> <td>S2=</td> <td>716,9 kg</td> <td></td> <td>S2=</td> <td>1147,0 g</td> </tr> </table>			Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros		C1=	424,6 kg		C1=	679,3 g	C2=	0,0 kg	<u>Massa total, em kg</u>	C2=	0,0 g	CV=	0,0 kg	2323,1	CV=	0,0 g	MS=	0,0 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>	MS=	0,0 g	FC=	551,7 kg	0,557	FC=	882,7 g	FG=	0,0 kg	<u>Razão água/cimento</u>	FG=	0,0 g	W=	236,6 litros	0,557	W=	378,6 ml	Sp=	2,79 litros	<u>Razão água/finos</u>	Sp=	4,46 ml	S1=	390,4 kg	0,242	S1=	624,7 g	S2=	716,9 kg		S2=	1147,0 g																										
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros																																																																																
C1=	424,6 kg		C1=	679,3 g																																																																															
C2=	0,0 kg	<u>Massa total, em kg</u>	C2=	0,0 g																																																																															
CV=	0,0 kg	2323,1	CV=	0,0 g																																																																															
MS=	0,0 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>	MS=	0,0 g																																																																															
FC=	551,7 kg	0,557	FC=	882,7 g																																																																															
FG=	0,0 kg	<u>Razão água/cimento</u>	FG=	0,0 g																																																																															
W=	236,6 litros	0,557	W=	378,6 ml																																																																															
Sp=	2,79 litros	<u>Razão água/finos</u>	Sp=	4,46 ml																																																																															
S1=	390,4 kg	0,242	S1=	624,7 g																																																																															
S2=	716,9 kg		S2=	1147,0 g																																																																															

2.5.3– Estudos em betões

O estudo da composição do betão faz-se mediante a definição do volume de vazios (Vv) que assume um valor de 0,030 m³ e da razão (Vm/Vg) que é determinado consoante a auto-compactabilidade pretendida. Os resultados obtidos neste método permitiram concluir que o ensaio da “Caixa-L” é o mais recomendado para avaliar o grau de auto-compactabilidade através do parâmetro (H2/H1) [13], pelo que no presente trabalho optou-se por utilizar apenas este ensaio. O equipamento necessário para a realização do ensaio da “Caixa-L” encontra-se ilustrado no Capítulo seguinte “Descrição do programa experimental”, uma vez que foi utilizado o mesmo equipamento.

Nepomuceno [13] introduz um novo parâmetro na sua proposta designado (MN), que é basicamente o produto do parâmetro (Vp/Vs) pelo parâmetro (Vm/Vg). Assim, definido o parâmetro (MN) e o parâmetro Vp/Vs é possível determinar o parâmetro (Vm/Vg). O parâmetro (MN) pode ser definido através da Figura 2.25 tendo em conta o grau de auto-compactabilidade avaliado pelo parâmetro (H2/H1) no ensaio da “Caixa-L” e o diâmetro médio de espalhamento avaliado no ensaio de espalhamento.

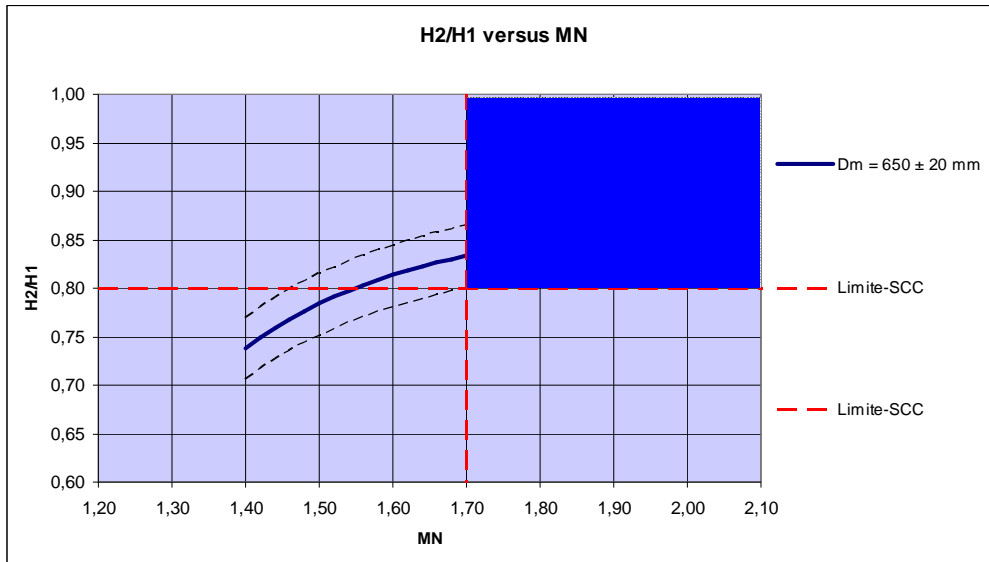


Figura 2.25 - Relação entre MN e H2/H1 quando Dm varia entre os 630 e 670 mm [13]

O gráfico apresentado na Figura 2.25 traduz o modelo geral proposto por Nepomuceno [13] quando o diâmetro de espalhamento assume o valor constante de 650 mm. Esse modelo é traduzido graficamente na Figura 2.26 e analiticamente pela Equação 2.31, apresentando um coeficiente de correlação próximo de 0,90. Na Equação 2.31, as constantes a , b e c assumem os seguintes valores: $a= 2,188490958$; $b= -0,09966278$ e $c= -673,282885$.

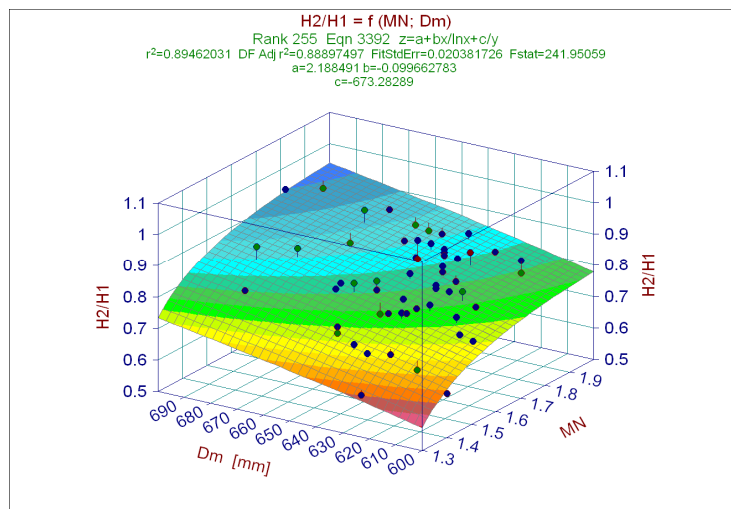


Figura 2.26 – Modelo matemático para a auto-compactabilidade – “Caixa-L”

$$\left(\frac{H2}{H1}\right) = a + b \times \frac{MN}{\ln(MN)} + \frac{c}{Dm} \quad (2.31)$$

Definidos todos os parâmetros, procede-se ao cálculo dos betões. Nepomuceno [13] apresenta um procedimento exemplificativo para uma situação em que se dispõe de dois agregados finos, três agregados grossos e uma qualquer mistura de finos.

No cálculo dos betões são utilizados os seguintes parâmetros:

- 1) Percentagem unitária em volume absoluto dos agregados finos (V_s)

$$V_s = a_1 \times V_s + a_2 \times V_s \quad (2.32)$$

- 2) Percentagem unitária em volume absoluto dos agregados grossos (V_g)

$$V_g = g_1 \times V_g + g_2 \times V_g + g_3 \times V_g \quad (2.33)$$

Onde:

g_1 é a percentagem unitária em volume absoluto da brita 3/6;

g_2 é a percentagem unitária em volume absoluto da brita 6/15;

g_3 é a percentagem unitária em volume absoluto da brita 15/25.

- 3) Parâmetros que definem a família de finos (V_p)

$$V_p = f_{c1} \times V_p + f_{c2} \times V_p + f_{cv} \times V_p + f_{ms} \times V_p + f_{fc} \times V_p + f_{fg} \times V_p \quad (2.34)$$

- 4) O parâmetro que representa a relação em volume absoluto entre as quantidades de argamassa e de agregados grossos (V_m/V_g);
- 5) O parâmetro que define a relação em volume absoluto entre as quantidades de finos e de agregados finos (V_p/V_s);
- 6) O parâmetro que define a relação em volume absoluto entre as quantidades de água e de materiais finos (V_w/V_p);
- 7) O parâmetro que representa a relação percentual em massa entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos ($S_p/p\%$).

A fórmula fundamental do cálculo dos betões para um volume de $1m^3$ tem a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_g + V_{sp} + V_v = 1,0 \quad (2.35)$$

Onde:

V_p é o volume absoluto de materiais finos em m^3/m^3 ;

V_w é o volume de água em m^3/m^3 ;

V_s é o volume absoluto de agregados finos em m^3/m^3 ;

V_g é o volume absoluto de agregado grossos em m^3/m^3 ;

V_{sp} é o volume de superplastificante em m^3/m^3 ;

V_v é o volume de vazios em m^3/m^3 .

Considerando:

$$V_m = 1 - V_g - V_v \quad (2.36)$$

Da fórmula fundamental resulta a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} = V_m \quad (2.37)$$

Ou seja:

$$V_p + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p + \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \times V_p + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \times V_p = V_m \quad (2.38)$$

Onde:

$$V_m = V_g \times \left(\frac{V_m}{V_g}\right) \quad (2.39)$$

Deste modo, obtêm-se as seguintes expressões para o cálculo dos betões:

$$V_g = \frac{1 - V_v}{1 + \left(\frac{V_m}{V_g}\right)} \quad (2.40)$$

$$V_m = V_g \times \left(\frac{V_m}{V_g}\right) \quad (2.41)$$

$$V_p = \frac{V_m}{1 + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) + \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right)} \quad (2.42)$$

$$V_w = \left(\frac{V_w}{V_p} \right) \times V_p \quad (2.43)$$

$$V_{sp} = \left(\frac{V_{sp}}{V_p} \right) \times V_p \quad (2.44)$$

$$V_s = \frac{V_p}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)} \quad (2.45)$$

Note-se ainda que:

$$\left(\frac{V_{sp}}{V_p} \right) = \left(\frac{S_p}{P} \right) \times \frac{\delta_P}{\delta_{SP}} \quad (2.46)$$

Onde:

$$\delta_P = fc1 \times \delta_{C1} + fc2 \times \delta_{C2} + fcv \times \delta_{CV} + fms \times \delta_{ms} + ffc \times \delta_{FC} + ffg \times \delta_{FG} \quad (2.47)$$

e

$$\left(\frac{S_p}{P} \right) = \left(\frac{S_p}{P} \% \right) / 100 \quad (2.48)$$

Uma vez conhecido o valor de V_p podem ser determinadas as dosagens dos materiais finos a partir das seguintes expressões:

$$V_{C1} = fc1 \times V_p ; V_{C2} = fc2 \times V_p \quad (2.49, 2.50)$$

$$V_{CV} = fcv \times V_p ; V_{MS} = fms \times V_p \quad (2.51, 2.52)$$

$$V_{FC} = ffc \times V_p ; V_{FG} = ffg \times V_p \quad (2.53, 2.54)$$

Onde:

V_{C1} é o volume absoluto de cimento tipo I 42,5R, em m^3/m^3 ,

V_{C2} é o volume absoluto de cimento tipo II/B-L32,5N, em m^3/m^3 ,

V_{CV} é o volume absoluto de cinzas volantes, em m^3/m^3 ,

V_{MS} é o volume absoluto de microssílica, em m^3/m^3 ,

V_{FC} é o volume absoluto de filer calcário, em m^3/m^3 ,

V_{FG} é o volume absoluto de filer granítico, em m^3/m^3 ,

Os restantes parâmetros assumem o significado já anteriormente referido.

Da mesma forma, conhecido o valor de V_s podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados finos a partir das seguintes expressões:

$$V_{S1} = a_1 \times V_s ; V_{S2} = a_2 \times V_s \quad (2.55, 2.56)$$

Onde:

V_{S1} é o volume do agregado fino 1 (Areia 0/2), em m^3/m^3 ,

V_{S2} é o volume do agregado fino 2 (Areia 0/4), em m^3/m^3 ,

a_1 é a percentagem unitária do agregado fino 1 (Areia 0/2) em volume absoluto no total de agregados finos,

a_2 é a percentagem unitária do agregado fino 2 (Areia 0/4) em volume absoluto no total de agregados finos.

Conhecido ainda o valor de V_g podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados grossos a partir das seguintes expressões:

$$V_{g1} = g_1 \times V_g ; V_{g2} = g_2 \times V_g ; V_{g3} = g_3 \times V_g \quad (2.57, 2.58, 2.59)$$

Onde:

V_{g1} é o volume do agregado grosso 1 (Brita 3/6), em m^3/m^3 ,

V_{g2} é o volume do agregado grosso 2 (Brita 6/15), em m^3/m^3 ,

V_{g3} é o volume do agregado grosso 3 (Brita 15/25), em m^3/m^3 ,

g_1 é a percentagem unitária do agregado grosso 1 (Brita 3/6) em volume absoluto no total de agregados grossos,

g_2 é a percentagem unitária do agregado grosso 2 (Brita 6/15) em volume absoluto no total de agregados grossos,

g_3 é a percentagem unitária do agregado grosso 3 (Brita 15/25) em volume absoluto no total de agregados grossos.

A partir das respectivas massas volúmicas é possível converter as dosagens em volume absoluto para valores em massa, obtendo-se assim dosagens por metro cúbico de betão.

Pelas mesmas razões já explicadas nas argamassas, houve a necessidade de desenvolver uma folha de cálculo Excel que determinasse mais rapidamente as dosagens dos constituintes do betão. Essa folha de cálculo é exemplificada no Quadro 2.6, onde os valores apresentados a azul são os dados de entrada.

2.6– Conclusões

Em forma de conclusão, pode-se afirmar que o método de Okamura et al [3, 12, 17, 18] foi muito importante para o desenvolvimento do betão auto-compactável, pois apesar da sua simplicidade serviu como base para muitos outros métodos conhecidos hoje em dia. É considerado conservador uma vez que garante sempre a auto-compactabilidade acima do que seria exigido. Tem como principal limitação a ausência de qualquer referência quanto ao nível de resistência à compressão pretendida para um dado betão. Ainda assim, a baixa razão W/C imposta pelo método resulta em resistências aceitáveis para a maior parte das estruturas.

O método proposto pela JSCE [3, 12] é o único que lida directamente com a possibilidade de utilização de agentes de viscosidade, podendo variar as dosagens unitárias de água e materiais finos e também a razão água/finos. Este método estabelece três níveis de requisitos funcionais e de auto-compactabilidade na abordagem ao betão fresco. Assim, dependendo das exigências da estrutura a betonar é definido o nível de desempenho do betão, ou seja, o nível de auto-compactabilidade.

Quanto ao método proposto pelo CBI [19, 20], este assume que o betão é constituído por duas fases: “fase líquida” que inclui pasta e a “fase sólida” que inclui os agregados. A principal diferença em relação aos outros métodos é a forma como são determinadas as dosagens de agregados finos e de agregados grossos, baseando-se nos critérios de máxima distância inter-partículas e de bloqueio. O primeiro estabelece que para cada volume de pasta existirá uma razão óptima entre os agregados grossos e agregados finos que conduzirá à máxima distância entre as partículas, permitindo uma maior deformabilidade e capacidade de passagem do betão, uma vez que o atrito entre partículas será menor. O critério de bloqueio permite determinar o volume total de agregados máximo na mistura para atingir uma certa auto-compactabilidade sem que haja bloqueio das partículas. Com esta evolução, este método permitiu a obtenção de misturas mais económicas e ao mesmo tempo betões com propriedades mecânicas e durabilidade mais adequadas.

Por fim, o método proposto por Nepomuceno [13] veio introduzir novos parâmetros que se adequaram melhor ao controlo da resistência à compressão. Na sua proposta houve a necessidade de estudar as argamassas separadamente dos betões, separando os agregados finos e grossos e encontrando a melhor combinação entre as duas areias e as duas britas com o objectivo de encontrar a mistura com maior compacidade. No estudo das argamassas é estabelecida a razão W/C em função da resistência pretendida e que coincidirá com a razão W/C dos betões. Nesta fase é também definido à priori o parâmetro V_p/V_s que deverá preferencialmente situar-se entre 0,65 e 0,80. Definidos estes parâmetros determina-se a percentagem de substituição do cimento pela adição através das correlações já apresentadas neste capítulo. Para concluir o estudo das argamassas, determina-se experimentalmente os parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$ que conduzem às propriedades reológicas estabelecidas e definidas por R_m e G_m e que por sua vez são avaliados através dos ensaios de espalhamento e de fluidez. No estudo dos betões o volume de vazios é definido como uma constante da ordem $V_v=0,03 \text{ m}^3$. O parâmetro V_m/V_g é definido em função do grau de auto-compactabilidade pretendido para o

betão e avaliada através do parâmetro H2/H1 na “Caixa-L”. Este método introduz ainda nesta fase o parâmetro MN que é o produto dos parâmetros V_p/V_s e V_m/V_g .