

# **ESTUDO DA ADERÊNCIA NO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL (BAC)**

**MARIA MANUELA SOARES DE OLIVEIRA NOGUEIRA DA HORA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professora Doutora Sandra Conceição Barbosa Nunes

JULHO DE 2010

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

## **RESUMO**

No presente estudo analisa-se o comportamento da aderência aço-betão e aderência betão-betão (juntas de betonagem) recorrendo a revisão bibliográfica, a modelos de cálculo existentes e a investigação experimental.

O bom desempenho das estruturas de betão armado é assegurado, entre outras coisas, pela aderência entre a armadura e o betão que a envolve, garantindo que os materiais quando solicitados se deformam em conjunto, quer sejam esforços de tracção ou compressão. Por outro lado, a qualidade da aderência entre camadas de betão de betonagens distintas (junta fria) pode igualmente comprometer o bom comportamento estrutural e a durabilidade da estrutura, em particular, na ausência de vibração como é o caso do betão auto-compactável.

Os efeitos da exsudação e de segregação do betão fresco fazem com que haja acumulação de água sob os varões de aço que ao ser posteriormente absorvida na fase de endurecimento do betão aumenta o risco de aparecimento de vazios na sua face inferior. Por outro lado, a concentração de agregados grossos, em determinadas zonas, também compromete a zona de transição entre o aço e o betão, afectando assim a qualidade da aderência. Com vista à análise destes efeitos foram preparados provetes com diferentes alturas e com os varões de aço em posições variáveis (vertical e horizontal) relativamente ao sentido de betonagem, simulando diferentes condições reais em obra. Para análise do deslocamento relativo entre o aço e o betão procedeu-se à realização de ensaios de arrancamento (pull-out test) em provetes de betão auto-compactável e de betão convencional.

A influência do faseamento de betonagens nas propriedades mecânicas do betão na zona das “juntas frias” foi avaliada através da realização de ensaios de rotura à compressão simples em provetes prismáticos incluindo uma junta inclinada relativamente ao eixo do provete (slant shear test), e comparando os valores da carga máxima e o modo de rotura na superfície de separação entre betões com idades diferentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** BAC, aderência aço-betão, aderência betão-betão, juntas frias



## **ABSTRACT**

In the present study the behaviour of steel-concrete bond and of concrete-concrete bond (cold joints) is analysed by means of literature review, existing models and experimental investigation.

The good performance of reinforced concrete structures is provided, among other things, by adhesion between the reinforcement and concrete that surrounds it, ensuring that the materials deform together when subjected to stresses, whether tensile or compression. On the other hand, the quality of adhesion between layers of concrete from distinct casting phases (cold joints) can also degrade the structural performance and durability of the structure, particularly, in the absence of vibration as is the case of self-compacting concrete.

The effects of bleeding and segregation of fresh concrete can lead to accumulation of water under the steel rods which when absorbed during cement hydration increases the risk of appearance of voids under steel rods. Moreover, the concentration of coarse aggregate in certain areas also alters the transition zone between the steel and concrete, thus affecting the quality of adhesion. In order to analyze these effects, specimens with different heights and with steel rods in different positions with respect to the casting direction (vertical and horizontal) were prepared, simulating actual conditions on site. To analyze the relative displacement between steel and concrete, pull-out tests were carried out on specimens of both self-compacting concrete and conventional concrete.

The influence of time interval between casting phases in the mechanical properties of concrete in the zone of "cold joints" was assessed by evaluating the compressive strength of concrete prisms including an inclined joint (slant shear test), and comparing values of maximum load and mode of rupture on the surface of separation between concretes of different ages.

**KEYWORDS:** SCC, steel-concrete bond, concrete-concrete bond, cold joints

## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	iii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ÂMBITO E OBJECTIVOS DO TRABALHO .....	1
1.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO .....	2
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>5</b>
2.1. DESENVOLVIMENTO DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL .....	5
2.2. DEFINIÇÃO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL .....	20
2.3. VANTAGENS E APLICAÇÕES DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL .....	20
2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL NO ESTADO FRESCO .....	23
2.4.1. ENSAIO DE ESPALHAMENTO (SLUMP FLOW TEST) .....	23
2.4.2. ENSAIO DE ESCOAMENTO (V-FUNNEL TEST) .....	24
2.4.3. ENSAIO NA CAIXA L (L-BOX TEST) .....	25
2.4.4. ENSAIO ANEL JAPONÊS (J-RING TEST) .....	26
2.4.5. ENSAIO DE SEGREGAÇÃO (SIEVE SEGREGATION TEST) .....	27
2.4.6. VALORES RECOMENDADOS PARA OS RESULTADOS DOS ENSAIOS .....	28
2.5. MATERIAIS CONSTITUINTES .....	28
2.5.1. CIMENTO .....	29
2.5.2. ADIÇÕES .....	30
2.5.3. AGREGADOS – AREIA FINA, AREIA MÉDIA, BRITA .....	31
2.5.4. ADJUVANTES – SUPERPLASTIFICANTE .....	32
2.5.5. ÁGUA DE AMASSADURA .....	33
2.5.6. PROPORÇÕES NA MISTURA .....	33
2.6. MÉTODOS DE ESTUDO DA COMPOSIÇÃO .....	36
<b>3. ADERÊNCIA .....</b>	<b>43</b>
3.1. AÇO-BETÃO .....	43
3.1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	43

3.1.2. FACTORES QUE AFECTAM O COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA .....	44
3.1.3. BETÃO CONVENCIONAL VS. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL .....	47
3.1.4. ENSAIOS DE ADERÊNCIA AÇO-BETÃO .....	48
<b>3.2. BETÃO-BETÃO .....</b>	<b>53</b>
3.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS (JUNTAS FRIAS) .....	53
<b>4. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2. CARACTERIZAÇÃO DO BAC .....</b>	<b>59</b>
4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS, COMPOSIÇÃO E PROCEDIMENTO DE AMASSADURA .....	59
4.2.1.1. Cimento .....	59
4.2.1.2. Fíler calcário .....	61
4.2.1.3. Agregados .....	61
4.2.1.3.1. Areia fina.....	61
4.2.1.3.2. Areia média.....	62
4.2.1.3.3. Brita .....	63
4.2.1.4. Adjuvantes .....	64
4.2.2. COMPOSIÇÃO DO BAC .....	65
4.2.3. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO .....	66
4.2.4. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO.....	67
<b>4.3. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO CONVENCIONAL .....</b>	<b>69</b>
<b>4.4. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO.....</b>	<b>71</b>
<b>4.5. PREPARAÇÃO DOS PROVETES .....</b>	<b>72</b>
4.5.1. ADERÊNCIA AÇO-BETÃO.....	72
4.5.2. ADERÊNCIA BETÃO-BETÃO .....	75
<b>4.6. ENSAIOS REALIZADOS/ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>79</b>
4.6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS CAROTES .....	79
4.6.2. ADERÊNCIA AÇO-BETÃO.....	82
4.6.3. ADERÊNCIA BETÃO-BETÃO .....	92
<b>5. CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTA PARA INVESTIGAÇÕES FUTURAS .....</b>	<b>97</b>
<b>5.1. CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>97</b>

**5.2. PROPOSTA PARA INVESTIGAÇÕES FUTURAS .....98**





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.: Ponte Akashi-Kaikyo (Japão) .....	21
Figura 2.2.: Edifício habitacional (Suécia) .....	21
Figura 2.3.: Tanque destinado ao armazenamento de gás natural liquefeito (Japão) .....	22
Figura 2.4.: Viga de edifício do Alto Parque (Portugal) .....	22
Figura 2.5.: Reforço de uma laje (Portugal) .....	22
Figura 2.6.: Ensaio de Espalhamento (Slump Flow Test) (EFNARC (2002); Gomes et al. (2002)).....	24
Figura 2.7.: Ensaio de Escoamento (V-Funnel Test) (EFNARC (2002); Gomes et al. (2002)) .....	25
Figura 2.8.: Ensaio na Caixa L (L-Box Test) (Gomes et al. (2002)) .....	26
Figura 2.9.: Ensaio Anel Japonês (EFNARC (2002)).....	26
Figura 2.10.: Tipos de aplicação do BAC em relação às classes de consistência (Walraven (2003))..	27
Figura 2.11.: Comportamento reológico de diferentes tipos de betão (Nunes (2001)).....	29
Figura 2.12.: Fotografia do microscópio electrónico de filer calcário.....	30
Figura 2.13.: Fotografia do microscópio electrónico de cinzas volantes .....	31
Figura 2.14.: Metodologia para alcançar a auto-compactabilidade .....	35
Figura 2.15.: Materiais constituintes do BAC versus Betão Convencional (Oliveira e Almeida (2007))	36
Figura 2.16.: Método de concepção da composição proposto por Okamura et al. (2000) .....	38
Figura 2.17.: Método de concepção da composição proposto pela UPC (Gomes (2002)) .....	40
Figura 2.18.: Método proposto pela FEUP (Figueiras (2006)).....	41
Figura 3.1.: Desenvolvimento das trajectórias das tensões principais junto a uma barra de armadura (Leonhardt (1979)) .....	43
Figura 3.2.: Formação de espaços vazios ou poros sob as barras betonadas em posição horizontal, devida à segregação e à acumulação de água (Leonhardt (1979)) .....	46
Figura 3.3.: Ensaio de arrancamento directo proposto pela RILEM (1973) .....	49
Figura 3.4.: Ensaio de flexão “beam test” proposto pelo Comité Euro-International du Béton (1983) ..	50
Figura 3.5.: Ensaio de extremo de viga “beam end test” (França (2004)) .....	51
Figura 3.6.: Ensaio especificado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (1982) .....	51
Figura 3.7.: Vista da parte lateral da peça betonada onde é visível a junta de betonagem .....	54
Figura 3.8.: Ensaio “pull-off” (ASTM C1583-04 (2004)) .....	55
Figura 3.9.: Forma e dimensões dos provetes em “Z” e linha prevista de rotura (Cuenca e Serna (2010)).....	56
Figura 3.10.: Geometria e forma do provete (BS EN 12615:1999) .....	56
Figura 4.1.: Materiais Utilizados .....	64

Figura 4.2.: Amassadura .....	65
Figura 4.3.: Ensaio de espalhamento.....	66
Figura 4.4.: Ensaio caixa em L.....	66
Figura 4.5.: Ensaio funil em V .....	67
Figura 4.6.: Ensaio para determinação do módulo de elasticidade .....	68
Figura 4.7.: Carregamento utilizado na determinação do módulo de elasticidade .....	68
Figura 4.8.: Curvas de força - deslocamentos dos cilindros .....	69
Figura 4.9.: Ensaio de abaixamento.....	70
Figura 4.10.: Curva tensão - extensão aparente do ensaio do aço à tracção .....	72
Figura 4.11.: Moldes dos provetes .....	73
Figura 4.12.: Extração de carotes das paredes.....	73
Figura 4.13.: Identificação e localização dos provetes retirados das paredes.....	74
Figura 4.14.: Aspecto do varão inserido no interior do provete de betão. Zona isolada com manga plástica.....	74
Figura 4.15.: Provetes de betão convencional .....	75
Figura 4.16.: Posicionamento dos moldes dos prismas de modo a formar uma junta inclinada .....	76
Figura 4.17.: Aspecto final de um prisma betonado de uma só vez .....	77
Figura 4.18.: Aspecto final de um prisma betonado em duas fases .....	78
Figura 4.19.: Identificação dos moldes.....	78
Figura 4.20.: Ensaio à compressão simples de carotes.....	79
Figura 4.21.: Ensaio à compressão – carotes BAC .....	80
Figura 4.22.: Ensaio à compressão – carotes betão convencional.....	80
Figura 4.23.: Variação da resistência do betão com a altura .....	82
Figura 4.24.: Esquema do ensaio de arrancamento directo (pull-out test) .....	83
Figura 4.25.: Aspecto da superfície de aderência.....	83
Figura 4.26.: Variação da tensão de aderência com a altura.....	84
Figura 4.27.: Curvas força - deslocamento relativo entre barra de aço e BAC.....	86
Figura 4.28.: Curvas força - deslocamento relativo entre barra de aço e BAC.....	86
Figura 4.29.: Modos de rotura dos provetes de BAC .....	87
Figura 4.30.: Curvas força - deslocamento relativo entre barra de aço e betão convencional.....	88
Figura 4.31.: Curvas força - deslocamento relativo entre barra de aço e betão convencional.....	89
Figura 4.32.: Modos de rotura dos provetes de betão convencional .....	89
Figura 4.33.: Curvas tensão de aderência - deslocamentos para BAC e betão convencional.....	91
Figura 4.34.: Modos de rotura dos provetes de BAC .....	93

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1.: Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas.....	6
Tabela 2.2.: Critérios de aceitação para o BAC tendo em conta a classificação da consistência (ACM Centre (2005)) .....	28
Tabela 2.3.: Proporções dos materiais do BAC versus Betão Convencional (Rodríguez (2006)) .....	35
Tabela 2.4: Misturas típicas de BAC (Rodríguez (2006)) .....	36
Tabela 2.5.: Recomendações do Comité Técnico 174-SCC da RILEM (2001) .....	39
Tabela 2.6: Recomendações da EFNARC (2005) .....	39
Tabela 4.1.: Caracterização do Cimento (valores típicos) .....	60
Tabela 4.2.: Caracterização do Fíler Calcário.....	61
Tabela 4.3.: Curva Granulométrica da Areia Fina.....	62
Tabela 4.4: Caracterização da Areia Fina.....	62
Tabela 4.5.: Caracterização da Areia Média .....	62
Tabela 4.6.: Curva Granulométrica da Areia Média.....	63
Tabela 4.7.: Curva Granulométrica da Brita.....	63
Tabela 4.8.: Caracterização da Brita.....	64
Tabela 4.9.: Propriedades do Superplastificante .....	64
Tabela 4.10: Composição do Betão Auto-compactável (kg/m <sup>3</sup> ) .....	65
Tabela 4.11.: Resultados obtidos nos ensaios do BAC no estado fresco .....	67
Tabela 4.12.: Resultados do módulo de elasticidade e resistência à compressão .....	69
Tabela 4.13: Composição do Betão Convencional (kg/m <sup>3</sup> ) .....	70
Tabela 4.14: Resultados de ensaio à compressão - betão convencional.....	71
Tabela 4.15.: Características de forma e dimensão dos varões.....	71
Tabela 4.16.: Resultados do ensaio à tracção do aço .....	72
Tabela 4.17.: Procedimento adoptado na betonagem dos prismas .....	77
Tabela 4.18.: Resultados de ensaio à compressão das carotes .....	81
Tabela 4.19.: Resultados dos ensaios de arrancamento directo.....	85
Tabela 4.20.: Cálculo da tensão de rotura da aderência segundo o EC2 .....	91
Tabela 4.21.: Resultados obtidos no ensaio de rotura por compressão simples .....	92
Tabela 4.22.: Valores tensão de aderência obtidos.....	92
Tabela 4.23.: Valores da tensão de aderência obtidos nos ensaios .....	95

Tabela 4.24.: Valores de  $\sigma_n$  ..... 95

Tabela 4.25.: Valores de  $V_{rdi}$  ..... 95



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ÂMBITO E OBJECTIVOS DO TRABALHO

O betão auto-compactável pode-se definir como um betão com propriedades resistentes menos dependentes do processo de colocação em obra, permitindo melhorar significativamente a qualidade final da estrutura, a durabilidade e a vida útil das estruturas. Estas características estão directamente relacionadas com a qualidade da aderência entre o betão e o aço, e entre camadas de betonagens distintas. O betão auto-compactável tem como vantagens escoar pelos moldes devido unicamente ao peso próprio, evitando assim a necessidade de vibração, que pode ser bastante difícil em zonas de acesso complicado ou com grande densidade de armadura.

Os objectivos deste trabalho foram analisar o comportamento da aderência entre aço e betão auto-compactável e entre betões auto-compactáveis com betonagens desfasadas. Como referência também se estudou o comportamento da aderência entre o aço e um betão convencional.

A aderência pode ser entendida como a ligação que existe entre a armadura e o betão, impedindo o deslocamento relativo entre os dois materiais e, conseqüentemente, diminuindo o aparecimento de fissuração. No entanto, a aderência é afectada pela posição, diâmetro e estado superficial dos varões da armadura, pela composição, compactação e resistência mecânica do betão, pela espessura de recobrimento das armaduras e pela exsudação e segregação do betão antes do seu endurecimento. A fluidez e a coesão do betão auto-compactável minimizam alguns destes efeitos negativos, especialmente nas armaduras da parte superior da secção, em grandes secções de betão armado.

Em geral, com o BAC há uma maior homogeneidade da mistura com diminuição da exsudação que elimina os defeitos decorrentes de um deficiente envolvimento das armaduras, encontrados em alguns betões convencionais. As diferenças entre um BAC e um betão convencional fazem antever a existência de diferenças no comportamento da aderência aço-betão quando se utiliza o BAC, daí a necessidade de efectuar mais estudos neste âmbito.

As propriedades do betão no estado endurecido são essenciais para a verificação da segurança das estruturas e para a previsão do seu comportamento ao longo da vida útil. Para avaliar a resistência e o desempenho das ligações de aderência, foram realizados ensaios mecânicos (conhecidos como ensaios de arrancamento) através de provetes prismáticos de betão.

A formação de uma junta fria, decorrente do faseamento de uma betonagem, implica a existência de um ponto fraco no elemento de uma estrutura de betão, no estado endurecido, impedindo a correcta transmissão dos esforços nesta zona do elemento. Por ser uma região de maior porosidade do betão, a falta de ligação, pode facilitar o aparecimento de infiltrações e provocar a corrosão precoce das armaduras.

Num betão convencional os agregados permanecem frequentemente visíveis na superfície após a betonagem, o que aumenta a rugosidade. No caso do betão auto-compactável, como a superfície de contacto não sofre qualquer tipo de tratamento, nem vibração, levanta-se uma questão acerca da força de aderência entre duas camadas de betão resultantes de fases de betonagem distintas.

Têm sido propostos diversos modelos, ao longo das últimas décadas, com o intuito de prever o comportamento do BAC no que diz respeito a viscosidade, a resistência ao bloqueio ou a resistência à segregação no estado fresco, ou a resistência à compressão e à tracção, no estado endurecido. De uma forma sintética, é apresentada no presente trabalho uma revisão de diversos estudos levados a cabo por outros autores, para caracterizar o BAC, quer no estado fresco quer no estado endurecido.

## **1.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Todos os ensaios foram efectuados, utilizando os recursos do LABEST, sediado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Apenas foi testado neste trabalho um tipo de BAC cujos constituintes e quantidades utilizados fundamentaram-se numa composição estudada no âmbito da tese de Mestrado intitulada “Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável. Aferição das suas propriedades mecânicas e durabilidade”, Figueiras (2006). Como referência tentou-se utilizar um betão convencional cujas características mecânicas se aproximassem das características mecânicas do BAC. Relativamente aos varões de armadura apenas se considerou o diâmetro 16 mm.

A distribuição dos agregados num

BAC homogéneo é diferente da distribuição obtida num betão convencional na proximidade da superfície. O conhecimento existente sobre a influência da rugosidade da superfície de contacto do betão na capacidade de aderência entre BAC's ou entre um BAC e um betão convencional é ainda limitado devido à diversidade de tipos de misturas de betão, tratamentos da superfície e força compressiva aplicados.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO**

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos:

O primeiro capítulo apresenta-se como sendo a presente introdução.

No segundo capítulo, intitulado “Estado da Arte”, é feita uma revisão do desenvolvimento e conhecimentos sobre o betão auto-compactável, descritos por diversos autores, são indicadas as principais vantagens da utilização deste material e algumas aplicações nas quais foi adoptado o BAC. Para além disso, é feita uma descrição detalhada sobre os ensaios de caracterização do BAC no estado fresco, são referidos os materiais constituintes e apresentados alguns modelos propostos por diversos autores e entidades para a sua composição.

No terceiro capítulo, denominado “Aderência”, é feita uma revisão bibliográfica dos conhecimentos sobre a aderência entre o aço e o betão, dos factores que afectam o seu comportamento, e são também indicados os ensaios que permitem determinar a tensão de aderência aço-betão. Neste capítulo é também feita uma revisão bibliográfica dos conhecimentos sobre a aderência entre camadas de betão



de diferentes fases de betonagem e apresentados alguns ensaios propostos para quantificar o nível dessa aderência.

No quarto capítulo, “Investigação Experimental”, é efectuada uma descrição detalhada dos materiais utilizados, dos ensaios realizados neste trabalho e são apresentados os principais parâmetros avaliados, seguido, da análise e discussão dos resultados obtidos.

Finalmente, no quinto capítulo, “Conclusões Finais e Proposta para Investigações Futuras”, apresenta-se um breve resumo das conclusões retiradas na elaboração do presente trabalho e propõe-se assuntos relevantes para futuros trabalhos de investigação.



# 2

## ESTADO DA ARTE

### 2.1. DESENVOLVIMENTO DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

As primeiras investigações do que hoje se conhece como Betão Auto-Compactável (BAC) realizaram-se nos anos 80 na Universidade de Tóquio (Japão). A ideia original deste tipo de betão foi proposta pelo Prof. Okamura com a intenção de solucionar os problemas de falta de homogeneidade do betão convencional e a conseqüente falta de durabilidade nas estruturas de betão armado, que se haviam detectado e que se atribuíam a deficiente compactação. O objectivo consistia em criar um produto que garantisse uma perfeita compactação, sem que o factor humano fosse uma variável capaz de afectar o produto final. No Japão as dificuldades de compactação são agravadas pelo acréscimo de armadura devido a requisitos relacionados com a acção sísmica. Além disso, o decréscimo de mão-de-obra especializada na indústria da construção japonesa conduziu a uma redução da qualidade da construção.

Em 1988 o Professor Ozawa obteve o primeiro protótipo de BAC, utilizando materiais existentes no mercado Japonês. Este protótipo apresentou um desempenho satisfatório no que respeita à retracção, calor de hidratação, densidade após endurecimento, entre outras propriedades, e foi inicialmente denominado de “High Performance Concrete”, simultaneamente, o Prof. Aitcin definiu “High Performance Concrete” (betão de elevado desempenho) como um betão com elevada durabilidade devido à sua baixa razão água/cimento e, por isso, Okamura et al. (1997) alteraram a designação do betão para “Self-Compacting High Performance Concrete (SCHPC)”.

Na Tabela 2.1. identificam-se os principais seminários e conferências que foram realizados nos últimos 20 anos, através dos quais se divulgou o conceito do BAC a nível mundial, e os principais projectos de investigação desenvolvidos nesta área a nível europeu. Neste quadro identificam-se também as recomendações e normas que foram publicadas nos últimos anos em diversos países.

Tabela 2.1.: Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comités Técnicos	Recomendações e Normas
1989	“Second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2)” – Primeiro artigo sobre BAC (Ozawa)		
1992	“CANMET & ACI International Conference”, em Istambul (Turquia) – Divulgação do conceito de “Self-Compacting Concrete” pelo mundo inteiro		
1994	Seminário ACI sobre betão de elevado desempenho promovido pelo Prof. Paul Zia, em Bangkok		
1996	“Ferguson Lecture by Okamura” na “ACI Fall Convention”, que decorreu em “New Orleans”		

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comitês Técnicos	Recomendações e Normas
			<p>“Recommendations for Mix Design and Construction Practice of High Fluidity Concrete” elaborado pelo “The Architectural Institute of Japan”</p> <p>“Manual for Manufacturing Self-Compacting Concrete” elaborado pela “The Ready-Mixed Concrete Industry Association, Japan”</p>
1997		<p>Criado o “State of the Art of RILEM Technical Committee 174-SCC” presidido por Skarendahl e Petersson</p>	
1997		<p>Várias empresas e universidades deram início a um projecto de grande dimensão financiado pela Comunidade Europeia, “Brite-Euram BE96-3801 – Rational Production and Improved Working Environment Trough Using Self-Compacting Concrete” (1997-2000)</p>	

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comités Técnicos	Recomendações e Normas
1998		Os 24 membros da "Precast Concrete Industry" holandesa (BELTON) iniciaram um projecto de investigação independente	
1998	"The International Workshop on Self-Compacting Concrete" em Kochi (Japão) - "International Network for Self-Compacting Concrete (SCC-Net)" desde Fevereiro de 1999: <a href="http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/">http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/</a>		
1999			"The Japanese Society of Civil Engineers (JSCE)" publicou "Recommendation for Self-Compacting Concrete"
1999		"First International RILEM "Symposium on Self-Compacting Concrete" organizado pelo Comité Técnico 174-SCC da RILEM em Estocolmo (Suécia)	

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comités Técnicos	Recomendações e Normas
1999	“3 <sup>as</sup> Jornadas de Estruturas de Betão” em Portugal – Primeiro artigo que apresentava o conceito deste novo material e do seu interesse no fabrico e colocação do betão estrutural		
2000			“Properties of Hardened Concrete – Final Report – Task 4”, com a participação de “Advanced Concrete and Masonry (ACM) Centre” e “University of Paisley (Scotland)”
2000	“Seminar on Self-Compacting Concrete)” em Malmö (Suécia)		
2000			“Bétons Autoplaçants – Recommendations Provisoires” preparadas pela “Association Française de Génie Civil (AFGC)”.
2001		“Self-Compacting Concrete” de “State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC”	

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comités Técnicos	Recomendações e Normas
2001	"Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology" em Michigan (Singapura)		
2001	"Advanced Concrete and Masonry (ACM) Centre", organizou um "Workshop on SCC" em conjunto com a "The Concrete Society"		
2001	"Second International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete" em Tóquio (Japão)		
2001			"FP5 Brite-Euram SCC Project" (2001-2004) – O objectivo era desenvolver os ensaios de verificação da conformidade do betão, no estado fresco



Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comitês Técnicos	Recomendações e Normas
2002			<p>“European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers to the Construction Industry (EFNARC)” publicou “Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete”</p>
2002	<p>“Fib Concrete Structures in the 21<sup>st</sup> Century” em Osaka (Japão)</p>		
2002	<p>“First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete”, em Chicago (USA)</p>		
2002	<p>“International Symposium on Bond in Concrete – from Research to Standards” em Budapeste (Hungria)</p>		

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comitês Técnicos	Recomendações e Normas
2002			“Self-Compacting Concrete, Recommendations for Use – Report nº10” de “Swedish Concrete Association’s Comité”
2003	“Hormigón Autocompactable, un hormigón para el siglo XXI” em Valência (Espanha)		
2003	“International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium (ICPCM)” no Cairo (Egipto)		
2003		Iniciou-se em Portugal projecto de investigação em consórcio BACPOR-“ <i>Desenvolvimento de uma Tecnologia Robusta para o Fabrico, Transporte e Aplicação do Betão Auto-Compactável</i> ”, onde participaram a FEUP, o Grupo Mota-Engil, a Sika e a Maprel e que contou com o apoio financeiro da Adi-Agência de Inovação	

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comités Técnicos	Recomendações e Normas
2003	“Sixth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology”, em Bucareste (Roménia)		
2003	“Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete” em Reykjavik (Islândia)		
2003	“International Conference on Recent Trends in Concrete Technology & Structures – INCONTEST 2003”, em Coimbatore (Índia)		
2004			Fundado o “Self-Compacting Concrete European Group” (BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO) que publicou, em Maio de 2005, o guia “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use”

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comités Técnicos	Recomendações e Normas
2004		“Growth Project – GR 2-2000-30024” com participação da Alemanha, Suécia, Holanda, Inglaterra, Dinamarca, Islândia, França e Bélgica – objectivos orientavam-se na normalização do BAC	
2004		Technical Committee 205-DSC – Durability of Self-Compacting Concrete	
2005	“First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC 2005)” em Changsha (China)		
2005	“Second North American Conference on Design and Use of Self-Consolidating Concrete” e o “Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete” em Chicago (USA)		

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comités Técnicos	Recomendações e Normas
2005			<p>“Guia Práctica para la Utilización del Hormigón Autocompactante” do “Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)”</p> <p>“Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía” publicou as “Recomendaciones para la Fabricación, Transporte y Puesta en Obra del Hormigón Autocompactante” em Sevilha (Espanha)</p> <p>“The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use”, “Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante – Especificaciones, Producción y Uso”, promovida pelas quatro associações espanholas ANDECE, ANEFHOP, ANFAH e IECA</p>
2006		<p>“RILEM Technical Committee 188-CSC: Casting of Self-Compacting Concrete”</p>	

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

<b>Ano</b>	<b>Seminários/Conferências</b>	<b>Projectos de Investigação e Comitês Técnicos</b>	<b>Recomendações e Normas</b>
2007			Publicaram-se as primeiras normas UNE para a avaliação da auto-compactabilidade
2007			O "American Concrete Institute Committee 237" publicou o documento "Self-Consolidating Concrete (ACI 237R-07)"
2007	"Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete" em Ghent (Bélgica)		
2007		"RILEM Technical Committee TC 205-DSC: Durability of Self-Compacting Concrete"	
2007		Technical Committee 228-MPS – Mechanical properties of self-compacting concrete	

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comitês Técnicos	Recomendações e Normas
2007			<p>prEN 12350-8 – “Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test”</p> <p>prEN 12350-9 – “Testing fresh concrete – Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test”</p> <p>prEN 12350-10 – “Testing fresh concrete – Part 10: Self-compacting concrete – L box test”</p> <p>prEN 12350-11 – “Testing fresh concrete – Part 11: Self-compacting concrete – Sieve segregation test”</p> <p>prEN 12350-12 – “Testing fresh concrete – Part 12: Self-compacting concrete – J-ring test”</p>
2008	“1 <sup>er</sup> Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante (HAC 2008)” em Valência (Espanha)		
2008	“11 <sup>th</sup> International Conference on Durability of Building Materials and Components (11 DBMC)” em Istambul (Turquia)		

Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comités Técnicos	Recomendações e Normas
2008			A "Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE)" publicou "Hormigón Autocompactante: Diseño y Aplicación" em Madrid (Espanha)
2008	"International PhD Workshop on Durability of Reinforced Concrete", em Zagreb (Croácia)		
2008			A "Comisión Permanente del Hormigón", com a aprovação do "Consejo de Ministros", publicou a "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08", que veio substituir a "Instrucción EHE-98" anterior, introduzindo algumas novidades nomeadamente a incorporação de novos materiais não incluídos até à data (betão reciclado, betão auto-compactável, betão com fibras, etc.), nomeadamente os anexos 17 e 21 referentes a recomendações para Betão Auto-Compactável



Tabela 2.1 (continuação): Principais seminários/conferências, projectos de investigação e recomendações e normas

Ano	Seminários/Conferências	Projectos de Investigação e Comitês Técnicos	Recomendações e Normas
2008	“Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete”, em Illinois, Chicago (USA)		
2009	“Second International Symposium on Design, Performance and Use of SCC (SCC 2009)” em Beijing (China)		
2009	“7 <sup>th</sup> Asia Pacific Structural Engineering and Construction Conference” e o “2nd European Asian Civil Engineering Forum (APSEC-EACEF 2009)”, em Lankawi (Malásia)		
2010	“2º Congresso Ibérico sobre Betão Auto-compactável (BAC 2010)” em Guimarães (Portugal)		
2010	Realizar-se-á “Fourth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete”, em Montréal (Canadá) e o “Sixth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete”		

## 2.2. DEFINIÇÃO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

O betão auto-compactável pode-se definir como um betão capaz de fluir no interior da cofragem, preenchendo-a, passando entre os varões da armadura, e consolidar unicamente sob a acção do próprio peso, sem necessidade de vibração (nem outro tipo de compactação). Além disso, a composição do betão deve ser homogénea após a colocação, ou seja, deve ter uma boa resistência à segregação. Para que isto seja possível é necessário um comportamento adequado do betão auto-compactável no estado fresco. A auto-compactabilidade exige elevada fluidez da mistura, com suficiente viscosidade e coesão entre os componentes, para garantir um fluxo contínuo e uniforme em toda a massa, sem exhibir segregação e sem que se produza bloqueio do betão entre os varões da armadura, ou nas zonas estreitas da cofragem. A elevada fluidez confere ao betão a capacidade de se mover livremente e preencher o interior da cofragem, sem necessidade de vibração. A viscosidade e coesão moderadas evitam a segregação dos componentes garantindo a uniformidade e homogeneidade do material durante colocação e após a colocação.

Neste sentido, a facilidade de preenchimento e passagem entre as armaduras são parâmetros essenciais na definição das prestações destes betões. Estas propriedades essenciais do BAC apresentam certo antagonismo, já que um aumento da fluidez leva a uma perda de viscosidade da pasta, o que pode aumentar a tendência à segregação. Estes betões exigem um equilíbrio estável entre a elevada fluidez e a boa resistência à segregação durante todo o tempo que implique o transporte e a sua colocação em obra.

Do ponto de vista da mistura, os parâmetros de máxima relação água/cimento (a/c) e a mínima quantidade de cimento a empregar, são controlados e regulados em função da agressividade do ambiente a que vai estar submetido o betão para garantir certa durabilidade. No entanto, uma aplicação em obra inadequada (desde um tempo de transporte excessivo, adição de água no camião ou mesmo a aplicação inadequada de vibração) pode fazer com que o betão perca todas as suas propriedades, pondo em risco a durabilidade da estrutura. O problema reside em que, enquanto a concepção da mistura em laboratório pode ser bem controlada, o sucesso da aplicação em obra depende de diversos factores, nomeadamente, a qualificação da mão-de-obra para o uso do BAC, controle de qualidade dos materiais constituintes, variação das condições ambientais, o tipo de aplicação, etc.

## 2.3. VANTAGENS E APLICAÇÕES DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

O betão auto-compactável responde à necessidade de se desenvolver um betão cujas propriedades resistentes sejam menos dependentes do processo de colocação em obra (em particular, da necessidade de compactação por vibração), permita obter maior homogeneidade do material ao longo da estrutura, melhorando significativamente a qualidade final da obra, a durabilidade e a vida útil das estruturas.

Ao eliminar a necessidade de utilização de meios de compactação, diminui-se o nível de ruído provocado pelos vibradores, melhora-se o ambiente de trabalho da obra e reduz-se os incómodos nas edificações vizinhas, melhorando as condições de segurança e saúde dos trabalhadores. Outro aspecto a ter em conta é a economia na construção, já que permite obter uma maior produtividade, reduzindo o prazo de execução da obra e os custos com a mão-de-obra e os equipamentos de vibração. Para condições de difícil colocação, o BAC é capaz de dar uma resposta eficaz a novos desafios estruturais, como estruturas muito esbeltas e/ou com elevada concentração de armaduras, onde a compactação por vibrador de agulha é muito difícil e onde surgem frequentemente sérios problemas na qualidade do

betão. O BAC permite aumentar a altura de descarga do betão e reduzir o número de fases de betonagem. Além disso, as propriedades do BAC permitem o desenvolvimento de novos procedimentos de bombagem e preenchimento de cofragens.

As vantagens associadas à utilização deste tipo de betão tem sido demonstrada num número de aplicações crescente em diversos países (por exemplo, Japão, Suécia, França, Espanha, Holanda, Reino Unido, Suíça, Dinamarca, Islândia, Canadá, Austrália, Tailândia, Dubai, Brasil e Portugal) em:

- Pontes;



Figura 2.1.: Ponte Akashi-Kaikyo (Japão)

- Pré-fabricação;
- Edifícios;



Figura 2.2.: Edifício habitacional (Suécia)

- Colunas de aço preenchidas com betão;
- Túneis;
- Barragens;
- Tanques;



Figura 2.3.: Tanque destinado ao armazenamento de gás natural liquefeito (Japão)

- Secções com elevada percentagem de armadura e cofragens complexas;
- Secções delgadas;



Figura 2.4.: Viga de edifício do Alto Parque (Portugal)

- Trabalhos de reabilitação;
- Trabalhos de reparação;
- Trabalhos de reforço de estruturas.



Figura 2.5.: Reforço de uma laje (Portugal)

## 2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL NO ESTADO FRESCO

A utilização do BAC obrigou investigadores e técnicos a desenvolver métodos de ensaio de caracterização específicos (que carecem de normalização) ou a modificar ensaios convencionais motivados principalmente pelas três propriedades características do BAC em estado fresco: capacidade para fluir dentro da cofragem e preenchê-la sob acção do seu próprio peso, capacidade de passagem através do espaço livre existente entre a armadura e estabilidade no que respeita à segregação dos seus componentes. Existem diversos ensaios de caracterização do BAC, no entanto, não existe um único ensaio que, por si só, permita avaliar se o betão cumpre simultaneamente as características referidas.

Tendo em conta que os ensaios devem permitir uma determinação rápida e fiável das propriedades fundamentais do BAC, tanto em laboratório como em obra, e o equipamento necessário deve ser robusto, fiável, maneável e económico, descrevem-se, em seguida, alguns dos ensaios mais utilizados.

### 2.4.1. ENSAIO DE ESPALHAMENTO (SLUMP FLOW TEST)

O ensaio de espalhamento (prEN 12350-8:2007) é o método mais utilizado para avaliar as propriedades do BAC, pelo facto do equipamento necessário e do procedimento do ensaio serem muito simples. Este ensaio permite avaliar a deformabilidade do BAC no estado fresco, a partir da observação da velocidade de deformação e do diâmetro de espalhamento final de uma amostra deformada por acção apenas do peso próprio.

Para realizar este ensaio é necessário dispor de um cone de Abrams, uma placa plana, não absorvente e rígida (ver Figura 2.6.), uma fita métrica e um cronómetro para medição do tempo. O procedimento adoptado é o seguinte: humedece-se o interior do cone e a superfície da placa de espalhamento (passando com um pano húmido), coloca-se a placa sobre uma superfície firme, plana e nivelada, e posiciona-se o cone no centro da mesma. Logo após o final da amassadura, enche-se o cone de uma vez, sem qualquer tipo de compactação, nivela-se o betão no topo do cone, em seguida, levanta-se de forma cuidadosa e contínua o cone na direcção vertical, e deixa-se fluir o betão livremente.

O ensaio consiste em determinar o tempo que o betão demora a alcançar o círculo de 50 cm de diâmetro ( $T_{50}$ , em segundos), medido com um cronómetro desde o início do levantamento do cone, e o valor do diâmetro de espalhamento ( $D_f$ , em mm) da amostra de betão, obtida a partir da média aritmética de dois diâmetros em direcções perpendiculares entre si.

O diâmetro final de espalhamento traduz a capacidade de enchimento, enquanto que o tempo que o betão demora a alcançar um diâmetro de 50 cm está relacionado com a viscosidade. Neste ensaio a capacidade de passagem não é avaliada. O ensaio de espalhamento é ainda o método mais fácil de avaliar a resistência à ocorrência de segregação, por inspecção visual, o que pode desde logo fornecer indicações sobre a homogeneidade do betão. Nas misturas em que a resistência à ocorrência de segregação não é suficiente, existe uma tendência dos agregados grossos ficarem próximos do centro, ao mesmo tempo que no bordo do espalhamento se pode verificar uma separação da pasta ou da argamassa do resto dos agregados. No entanto, nos casos em que a segregação não é tão evidente, a observação visual não é, em geral, suficiente para avaliar correctamente a resistência à ocorrência de segregação do BAC.

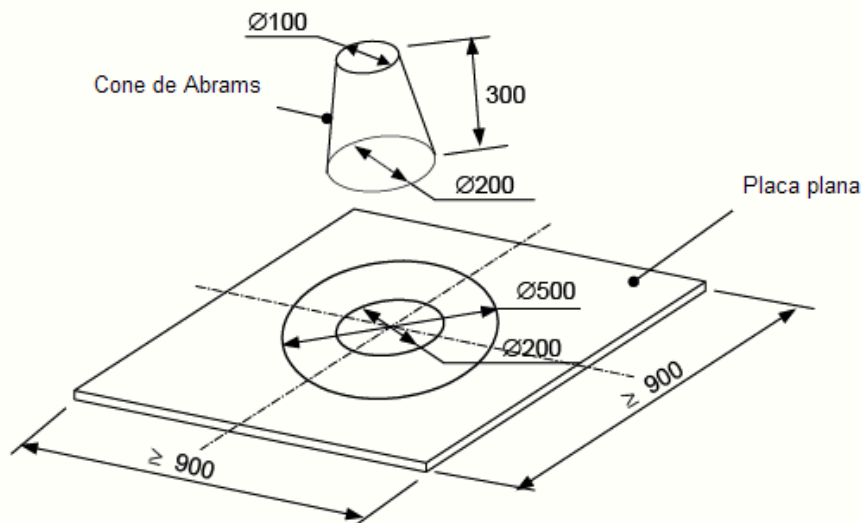


Figura 2.6.: Ensaio de Espalhamento (Slump Flow Test) (EFNARC (2002); Gomes et al. (2002))

#### 2.4.2. ENSAIO DE ESCOAMENTO (V-FUNNEL TEST)

Este ensaio, também referido como ensaio de fluidez, permite avaliar a capacidade do BAC no estado fresco passar através de pequenas aberturas, na direcção vertical, a partir da observação da velocidade de escoamento de uma amostra de betão, num funil, por acção do peso próprio (prEN 12350-9:2007).

O equipamento necessário para a realização deste ensaio consiste num funil (normalmente em aço e secção transversal rectangular), em forma de “V” com uma abertura na parte inferior, onde se coloca uma comporta que seja estanque quando estiver fechada e de rápida abertura (ver Figura 2.7.), e um cronómetro para medição do tempo.

O procedimento adoptado é o seguinte: humedece-se o interior do funil (passando com um pano húmido), coloca-se o funil numa posição vertical (com a parte superior horizontal) sobre uma superfície firme, plana e nivelada, posiciona-se um recipiente para receber o betão e fecha-se a comporta inferior. Em seguida, enche-se completamente o funil, com uma amostra representativa do betão, de forma contínua e sem qualquer tipo de compactação. Nivela-se o betão na parte superior do funil e, de seguida, abre-se a comporta e inicia-se a contagem do tempo, simultaneamente. Olhando de cima para baixo pela parte superior do funil, observa-se o movimento do betão, e pára-se a contagem do tempo logo que aparece a claridade na abertura inferior. Os principais resultados que se obtêm com este ensaio são o tempo de fluidez ( $T$ , em segundos) e/ou a velocidade relativa ( $R$ ). Em que  $R$  é calculada, a partir do tempo de fluidez  $T$ , pela expressão 2.1.:

$$R = \frac{10}{T} \quad (2.1.)$$

O ensaio de escoamento não avalia apenas a fluidez, mas também a capacidade de passagem do betão por espaços estreitos. A viscosidade da mistura, quando esta apresenta uma elevada dosagem de agregados grossos, condiciona bastante o comportamento neste ensaio. Uma viscosidade elevada resulta num tempo de escoamento elevado, enquanto que uma viscosidade baixa, pode também

resultar num tempo de escoamento elevado, se ocorrer algum efeito de bloqueio dos agregados na parte inferior do funil.

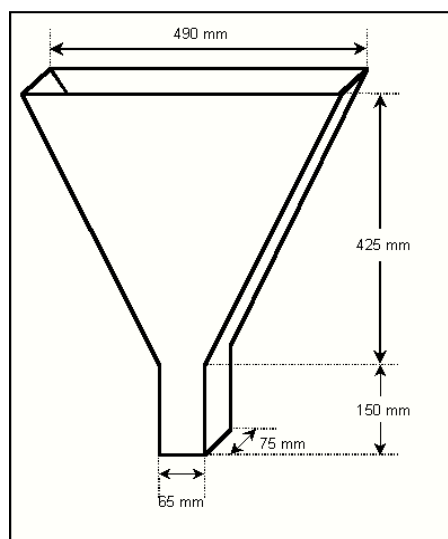


Figura 2.7.: Ensaio de Escoamento (V-Funnel Test) (EFNARC (2002); Gomes et al. (2002))

#### 2.4.3. ENSAIO NA CAIXA L (L-BOX TEST)

O ensaio da caixa-L (prEN 12350-10:2007) permite avaliar diferentes propriedades do BAC no estado fresco, tais como, a capacidade de enchimento, resistência ao bloqueio e resistência à segregação. O equipamento necessário para a realização deste ensaio consiste numa caixa em forma de L com um obstáculo na passagem do betão da parte da coluna vertical para a parte horizontal (ver Figura 2.8.), um cronómetro para medição do tempo e uma fita métrica.

O procedimento adoptado é o seguinte: monta-se a caixa com os varões de obstáculo e a comporta fechada, humedecem-se as suas paredes interiores, enche-se a parte vertical da caixa com betão sem qualquer tipo de compactação, e deixa-se repousar durante 60 segundos. Este tempo de espera permite avaliar a estabilidade da amostra (segregação). Em seguida, abre-se a comporta na vertical e deixa-se o betão fluir, da parte vertical para a parte horizontal da caixa, atravessando os varões verticais. No final, com o betão da amostra em repouso, medem-se as alturas H1 e H2, em mm, que se obtêm em ambos os extremos da parte horizontal da caixa. A razão  $H2/H1$  define-se como o coeficiente de bloqueio (CB).

Nos casos em que o betão apresenta uma forte tendência para segregar e/ou a quantidade de agregado grosso na mistura é relativamente grande, é possível que ocorra algum bloqueio na passagem pelos obstáculos. Nestes casos, os resultados obtidos não se relacionam com os valores obtidos no ensaio de espalhamento. Os ensaios realizados com a caixa L, equipada com os obstáculos simulando as armaduras, avaliam de modo bastante eficaz a capacidade que o betão apresenta em escoar por espaços reduzidos. Uma relação  $H2/H1$  elevada indica uma boa capacidade de passagem. A medição dos tempos em que o betão atinge determinadas distâncias (normalmente 20 cm e 40 cm) é útil para avaliar a capacidade de deformação.

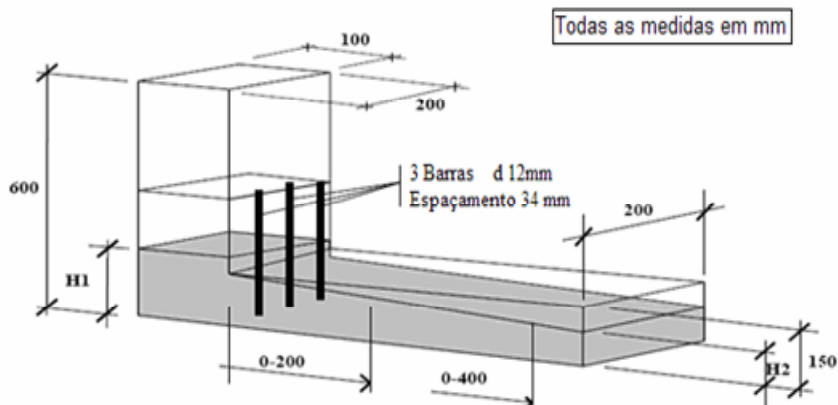


Figura 2.8.: Ensaio na Caixa L (L-Box Test) (Gomes et al. (2002))

#### 2.4.4. ENSAIO ANEL JAPONÊS (J-RING TEST)

O ensaio do anel japonês (prEN 12350-12:2007) destina-se a avaliar a fluidez e a capacidade de escoamento do BAC no estado fresco. Este ensaio utiliza todo o equipamento utilizado no ensaio de espalhamento ao qual se adiciona um anel de diâmetro 300 mm (ver Figura 2.9.), composto por diversos varões de aço verticais com um espaçamento que pode variar em função do diâmetro máximo dos agregados ou da densidade da armadura que se pretende simular.

O procedimento adoptado é o seguinte: coloca-se o cone de Abrams humedecido no interior do anel japonês, ambos centrados sobre a placa; enche-se o cone de uma vez, sem qualquer tipo de compactação, nivela-se o betão no topo do cone, em seguida, levanta-se de forma cuidadosa e contínua o cone na direcção vertical, e deixa-se fluir o betão livremente e através dos varões de aço. Tal como no ensaio de espalhamento, regista-se o tempo que o betão demora a alcançar 50 cm (T50, em segundos) e, com a amostra em repouso, mede-se o diâmetro de espalhamento (Df, em mm).

Para além disso, medem-se as alturas do betão na parte interior (Hint) e exterior do anel (Hext), em mm.

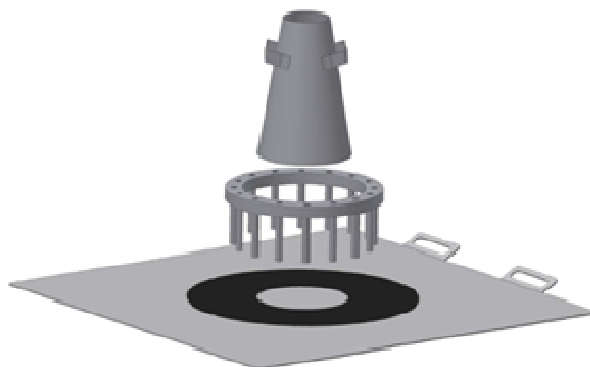


Figura 2.9.: Ensaio Anel Japonês (EFNARC (2002))



2.4.5. ENSAIO DE SEGREGAÇÃO (SIEVE SEGREGATION TEST)

O equipamento necessário para a realização deste ensaio consiste num peneiro com aberturas de 5 mm e diâmetro aproximado de 300 mm, uma balança com capacidade até 10 kg, um recipiente (para 11 litros) de material não absorvente e diâmetro aproximado de 200 mm, um cronómetro e um termómetro (prEN 12350-11:2007).

O procedimento adoptado é o seguinte: recolhe-se num recipiente aproximadamente 10 litros de betão fresco, mede-se a temperatura do betão, tapa-se para evitar evaporação, coloca-se esse recipiente na balança e regista-se o peso como  $W_c$  (em gramas). Deixa-se repousar durante 15 minutos e, de seguida, verte-se uma amostra de cerca de 5 litros, de uma altura de 500 mm, no centro do peneiro sem vibração. Regista-se o peso da massa que ficou no peneiro como  $W_p$  (em gramas) e o peso do material que passou pelo peneiro como  $W_{ps}$  (em gramas).

O objectivo deste ensaio é avaliar a resistência à segregação do betão auto-compactável, através do cálculo do índice de segregação ( $SR$ , em %) dado pela expressão 2.2.:

$$SR = \frac{W_{ps} - W_p}{W_c} \times 100 \quad (2.2.)$$

A figura 2.10. apresenta exemplos de aplicações nos elementos estruturais tendo em conta as classes de consistência.

Viscosidade ↓	<b>PL1/PJ1:</b> $e_{arm}=80$ a 100 mm <b>PL2/PJ2:</b> $e_{arm}=60$ a 80 mm			Capacidade de Passagem ←
<b>VS3/VF3</b>				
<b>VS2/VF2</b>				<b>SR2:</b> $d_{esc} > 5\text{ m}$ e $e_{arm} \geq 80\text{ mm}$ ou $d_{esc} < 5\text{ m}$ e $e_{arm} < 80\text{ mm}$ <b>SR1:</b> $d_{esc} \leq 5\text{ m}$ e $e_{arm} \geq 80\text{ mm}$
<b>VS1/VF1</b>				<b>SR1:</b> $d_{esc} \leq 5\text{ m}$ e $e_{arm} \geq 80\text{ mm}$
Espalhamento →	<b>SF1</b>	<b>SF2</b>	<b>SF3</b>	↑ Segregação

Se  $e_{arm} < 80\text{ mm}$  e  $d_{esc} > 5\text{ m}$  -  $SR \leq 5\%$

$d_{esc}$  – distância de escoamento  
 $e_{arm}$  – espaçamento de armaduras

Figura 2.10.: Tipos de aplicação do BAC em relação às classes de consistência (Walraven (2003))

## 2.4.6. VALORES RECOMENDADOS PARA OS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Como valores recomendados para os resultados obtidos nos diversos ensaios de caracterização do BAC, no estado fresco, podem considerar-se os referidos na Tabela 2.2.:

Tabela 2.2.: Critérios de aceitação para o BAC tendo em conta a classificação da consistência (ACM Centre (2005))

Ensaio	Resultado	Classes de Consistência	Valores
Espalhamento (Slump Flow Test)	Df (mm)	SF1	550-650
		SF2	660-750
		SF3	760-850
	t500 (s)	VS1	≤ 2
		VS2	3-6
		VS3	> 6
Escoamento (V-Funnel Test)	Tv (s)	VF1	< 9
		VF2	9-25
Caixa L (L-Box Test)	PA	PL1	≥ 0,8 com 2 varões
		PL2	≥ 0,8 com 3 varões
J-Ring Test	BJ (mm)	PJ1	≤ 10 com 12 varões
	SFJ (mm)	PJ2	≤ 10 com 16 varões
	T500J		
Sieve Stability	SR (%)	SR1	≤ 20
		SR2	≤ 15

## 2.5. MATERIAIS CONSTITUINTES

Os constituintes usados na composição do BAC são os mesmos que se utilizam para a fabricação de betões convencionais, devendo obedecer ao disposto na NP EN 206-1:2007. No entanto, os métodos de dosagem de misturas de BAC diferem dos métodos tradicionais empregues no betão, já que as proporções dos componentes estão condicionadas pelas propriedades no estado fresco, em particular, a fluidez e viscosidade exigidas.

A composição de um BAC deve ser resistente à ocorrência de segregação, de que são exemplos a exsudação e o assentamento das partículas mais grossas (sedimentação). O comportamento do betão fresco durante a colocação e consolidação é influenciado basicamente pelas suas características reológicas. Os principais mecanismos que influenciam a reologia são o atrito interno das partículas e a quantidade de água livre. O betão auto-compactável caracteriza-se por valores baixos da tensão de

cedência (tensão de corte que é preciso aplicar para iniciar o movimento) em simultâneo com um valor adequado da viscosidade plástica. Esta última depende bastante dos materiais a utilizar e do tipo de aplicação, nomeadamente, da técnica de colocação do betão, do tipo e configuração da estrutura que se pretende construir.

A elevada deformabilidade do BAC baseia-se principalmente na dispersão das partículas de cimento devido ao efeito do adjuvante e é também afectada significativamente pelas características dos finos. A selecção dos materiais finos é de extrema importância porque as suas propriedades afectam não só o grau de auto-compactabilidade, mas também a qualidade do betão endurecido.

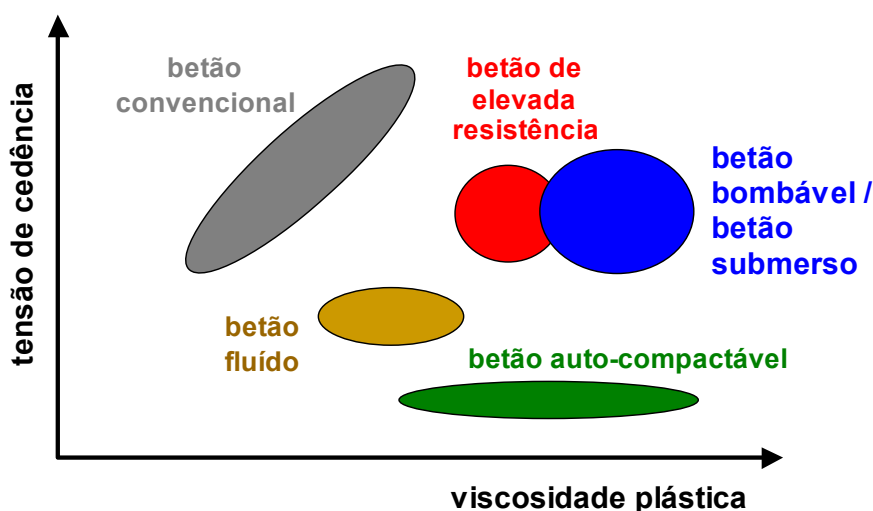


Figura 2.11.: Comportamento reológico de diferentes tipos de betão (Nunes (2001))

### 2.5.1. CIMENTO

A escolha do tipo de cimento deve-se principalmente a factores alheios à auto-compactabilidade como os requisitos de resistência, de durabilidade ou o volume de betão da aplicação em causa. Os cimentos do tipo Portland apresentam um bom comportamento (aumento da trabalhabilidade) com a adição de superplastificantes, porém o efeito de dispersão do superplastificante depende da composição química do cimento. Quanto maior a finura do cimento, menor a eficiência do superplastificante, pois ocorre uma redução na concentração das moléculas absorvidas nos grãos de cimento. De acordo com EFNARC (2002), um cimento conforme a NP EN 197-1:2001, com conteúdo de C3A maior que 10% pode causar problemas de trabalhabilidade.

Quanto maior for a relação água/cimento, maior será a taxa de hidratação dos componentes individuais do cimento. A quantidade de cimento habitual é, no mínimo de 350 kg/m<sup>3</sup>, variável segundo os requisitos de aplicação, e no máximo de 450 kg/m<sup>3</sup>. Uma quantidade superior a 500 kg/m<sup>3</sup> pode ser perigosa e aumentar a retracção; e uma quantidade inferior a 350 kg/m<sup>3</sup> somente poderá ser adoptada com a inclusão de outro tipo de materiais finos, como filer, por exemplo.

### 2.5.2. ADIÇÕES

Segundo a definição da EFNARC (2002), uma adição é um material inorgânico, finamente dividido, que pode ser adicionado ao betão (na amassadura) com a finalidade de melhorar algumas das suas propriedades, tornando-o mais adequado aos diversos tipos de situações em projectos, seja garantindo a coesão, a trabalhabilidade, a fluidez e/ou a durabilidade.

De acordo com a NP EN 12620:2004, os filers (ver Figura 2.12.) são partículas com dimensões inferiores a 0,125 mm e podem ser divididos em calcário e cinzas volantes. O filer calcário consiste em calcário pulverizado cujo principal componente é a calcite. Este material é utilizado para aumentar a viscosidade da pasta, em especial, quando se pretende que o aumento da quantidade de finos não se traduza directamente num aumento da resistência do betão. A qualidade das estruturas está directamente relacionada com a garantia de durabilidade, e esta está associada a uma menor permeabilidade e porosidade. A utilização de partículas finas, como os filers, ajuda na coesão da pasta (resistência à segregação) e a reduzir a porosidade e a permeabilidade de uma estrutura, implicando uma maior durabilidade. Entretanto, os filers afectam a trabalhabilidade do BAC, sendo necessária a determinação de uma dosagem adequada entre os filers e os superplastificantes. À medida que se aumenta a quantidade de finos existe uma melhoria das propriedades mecânicas do BAC no estado endurecido, mas ocorre um aumento no consumo de superplastificantes e de água em virtude da finura dos filers adicionados em excesso, porém pode ser obtida uma economia na produção de BAC incorporando altas quantidades de cinzas volantes.

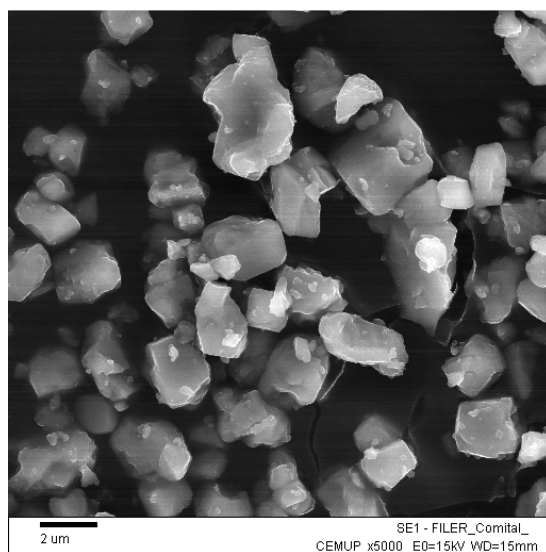


Figura 2.12.: Fotografia do microscópio electrónico de filer calcário

De acordo com as prEN 450-1:2010 e prEN 450-2:2010, as cinzas volantes são um sub-produto obtido quando se queimam carvões pulverizados, numa central de energia. As cinzas volantes podem substituir grandes quantidades de cimento (até 70%) conduzindo a elevadas resistências à compressão do betão, a longo prazo. O valor adequado de teor de cinzas volantes para o betão varia entre 30 a 50% em relação ao cimento. As cinzas volantes permitem diminuir a retracção por secagem.

A qualidade das cinzas varia com o tipo de carvão e da caldeira utilizada, algumas delas, especialmente aquelas que têm propriedades pozolânicas, são utilizadas na produção de betão aplicado num largo número de estruturas, principalmente em obras de arte. A forma esférica das cinzas de boa qualidade e a elevada finura das cinzas volantes influenciam claramente o comportamento reológico do betão (ver Figura 2.13.). Conduzem a baixos coeficientes de atrito entre as suas partículas e também entre estas e as partículas dos outros componentes, minorando a energia dispendida para a realização do fluxo e, por consequência, afectam a trabalhabilidade, melhorando a deformabilidade do betão. Por esta razão, as cinzas volantes são utilizadas frequentemente no BAC.

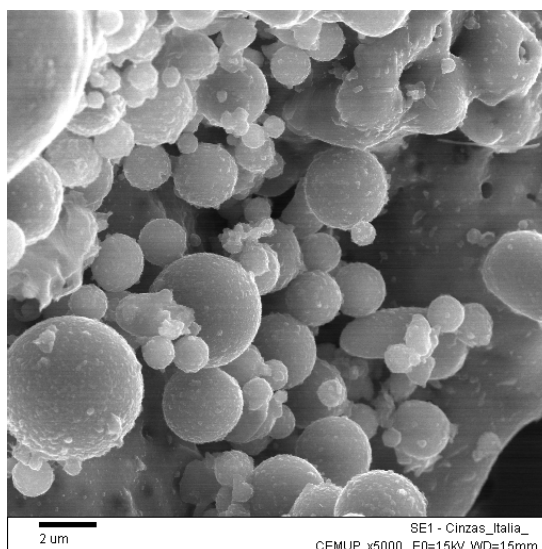


Figura 2.13.: Fotografia do microscópio electrónico de cinzas volantes

A sílica activa consiste num aditivo que quando aplicado no betão reduz drasticamente a porosidade e a permeabilidade do betão, aumentando a sua durabilidade. Esta, adicionada à mistura em substituição de uma parcela igual de cimento, combinada com a utilização de superplastificantes, aumenta também significativamente a resistência do betão.

A quantidade de finos ( $< 0,1$  mm) necessária para uma composição de BAC é no mínimo de 400-600 kg/m<sup>3</sup>, definida em função de uma composição de adição e cimento. A elevada quantidade de finos justifica-se pela necessidade de evitar a segregação dos agregados e para reduzir o atrito entre os agregados graúdos. O conteúdo de adição deve corrigir o conteúdo de finos até conseguir uma relação água/finos (a/f) em volume de 0,8-1,10.

### 2.5.3. AGREGADOS - AREIA FINA, AREIA MÉDIA, BRITA

Os agregados são o constituinte mais durável e resistente do betão e devem estar conforme a NP EN 12620:2004. A dimensão máxima do agregado depende da geometria e densidade de armadura da peça a betonar, mas geralmente não ultrapassa os 20 mm. No caso do BAC, recomendam-se tamanhos máximos do agregado entre 12 e 16 mm, já que tamanhos superiores implicam maior risco de bloqueio e segregação.

De acordo com EFNARC (2002), qualquer tipo de agregado pode ser utilizado, tanto o britado como o natural. Devem-se empregar areias contínuas, sem cortes na granulometria. Um certo contributo de finos por parte da areia reduzirá a necessidade de adição de cimento. A quantidade de areia na mistura do BAC, geralmente entre 50 a 60% da quantidade total de agregados (soma dos agregados finos (areia) e grãos (brita)), é importante, uma vez que a razão areia/agregados, influencia o módulo de elasticidade longitudinal do betão. Este último é influenciado pela relação água/cimento e a idade do betão na altura do ensaio. A utilização de agregados miúdos de pequena granulometria melhora a trabalhabilidade e aumenta a viscosidade do BAC, pois reduz o conteúdo de vazios. Os agregados britados tendem a possuir maior resistência por causa do travamento existente entre os ângulos das partículas, enquanto os agregados naturais, que não possuem ângulos agudos, por serem mais arredondados aumentam a capacidade de fluidez da pasta em função do menor atrito interno entre partículas.

#### 2.5.4. ADJUVANTES - SUPERPLASTIFICANTE

A introdução de um superplastificante na composição do BAC ajuda a melhorar a deformabilidade, confere coesão interna à massa, reduz essencialmente a tensão de cedência (aumenta a fluidez), sem aumentar o risco de ocorrência de segregação e causa uma diminuição limitada da viscosidade. Teria sido impossível obter um BAC sem o desenvolvimento dos superplastificantes, seus constituintes imprescindíveis. Este betão aparece inicialmente no Japão por ter sido aí que surgiram, mais cedo, os superplastificantes, que são incorporados no betão com a finalidade de reduzir a quantidade de água de amassadura, mantendo a trabalhabilidade ou aumentando-a. Essa redução da quantidade de água resulta em menor relação água/cimento ( $\leq 0,35$ ). É necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre a razão água/finos e a dosagem de superplastificante, para que sejam respeitadas simultaneamente as exigências de deformabilidade e resistência à segregação.

Os superplastificantes utilizados no BAC, de acordo com a NP EN 934-2:2000, são essencialmente de dois tipos: agentes redutores de água de alta gama e agentes introdutores de ar. A utilização de agentes redutores de água de alta gama (superplastificantes) permite uma melhoria da trabalhabilidade e capacidade de bombeamento, com a possibilidade de economia de cimento e melhoria das propriedades mecânicas do betão.

O efeito de dispersão do superplastificante depende do instante em que o superplastificante é adicionado à mistura, em geral, o seu efeito é maior quando se junta o superplastificante após a mistura do cimento com a água, aumentando significativamente a trabalhabilidade. Independentemente do poder redutor de água, o aditivo deve ajustar-se às características de cada aplicação (em função de ser exigida elevada resistência inicial, prolongada manutenção da consistência, etc.) e em correspondência ao tipo de cimento, adição e agregados empregues. Uma vez que é utilizada uma grande quantidade de superplastificante num BAC há uma tendência para retardar o início da presa. A escolha do tipo de superplastificante deve ter em consideração estes aspectos e ainda a interação com outros adjuvantes (por exemplo, um agente de viscosidade). O uso de um aditivo modulador de viscosidade (ou agente de viscosidade) não é imprescindível e emprega-se caso o contributo de finos seja insuficiente ou o conteúdo de humidade do agregado seja variável, para garantir a coesão e uniformidade das amassaduras.

A introdução de bolhas de ar no interior do betão, pela utilização de agentes introdutores de ar, é necessária para o aumento da resistência à acção de gelo-degelo do betão endurecido. No betão fresco, as bolhas de ar absorvem uma quantidade mínima de água na sua superfície. Uma vez que as bolhas de ar não são capazes de suportar o choque das partículas dos agregados tais como os finos, as bolhas de

ar têm uma pequena influência na prevenção dos choques entre as partículas. No entanto, quando há falta de finos, permitem corrigir a granulometria, melhorando a trabalhabilidade, devido ao efeito lubrificante de “rolamento de esferas” das bolhas de ar.

#### 2.5.5. ÁGUA DE AMASSADURA

A água utilizada na amassadura do betão deve obedecer à NP EN 1008. Além da função de hidratação do cimento, a dosagem de água permite alterar a deformabilidade, reduz a tensão de cedência e a viscosidade do betão fresco. Existe uma gama óptima da razão volumétrica água/finos para conferir à pasta a viscosidade adequada para um BAC e esta gama está directamente relacionada com a quantidade de água absorvida pelos materiais finos. A razão água/finos deve ser controlada de modo a não ser demasiado baixa nem demasiado elevada, uma vez que, ambas as situações põem em causa a deformabilidade. Muito baixa razão água/finos com um superplastificante incorporado leva a uma elevada capacidade de deformação e baixa velocidade de deformação. Relações (a/f) superiores a 1,10 implicam um elevado risco de exsudação.

A quantidade de água confinada por materiais finos com uma forma regular tais como as cinzas volantes é muito baixa e, desta forma, o valor óptimo da razão água/finos, em volume, é igualmente baixo. O cálculo da relação água/cimento (a/c) deve considerar a quantidade e o tipo de adição. A relação resultante nem sempre é baixa, já que o conteúdo de finos pode ser elevado. A relação (a/c) é fundamental para a durabilidade e resistência mecânica do betão. Pode existir, contudo, um problema na qualidade do acabamento dos elementos de betão caso se empreguem relações (a/c) extremamente baixas e não se tomem precauções adicionais.

#### 2.5.6. PROPORÇÕES NA MISTURA

O BAC tem que cumprir com três exigências de trabalhabilidade para garantir a sua auto-compactabilidade, as quais são:

- Capacidade de enchimento;
- Resistência à segregação;
- Capacidade de passagem.

A capacidade de enchimento está relacionada com a facilidade com que o betão preenche o interior da cofragem e envolve as armaduras. O betão deve possuir mobilidade e fluidez para se deformar e moldar no interior cofragem unicamente sob a acção do próprio peso e sem utilização de meios mecânicos externos.

Para se obter uma capacidade de enchimento adequada é necessário reduzir o atrito inter-partículas e melhorar a deformabilidade da pasta. Para tal consideram-se os seguintes procedimentos:

- Diminuir o volume de agregado grosso;
- Optimizar a granulometria da fase sólida;
- Adicionar um superplastificante;
- Controlar a razão água/finos.

A segregação do betão ocorre quando os componentes do betão se separam e a sua distribuição não é homogénea. A segregação pode manifestar-se de várias formas como: exsudação, separação da areia

grossa, ou distribuição não uniforme dos poros de ar. O BAC, ao ser mais fluido, está mais propenso à segregação do que o betão convencional. Para se obter uma boa resistência à segregação consideram-se os seguintes procedimentos:

- Diminuir a dosagem de água;
- Diminuir a razão água/finos;
- Utilizar materiais finos com maior superfície específica;
- Introduzir um agente de viscosidade;
- Diminuir o volume de agregado grosso;
- Diminuir a máxima dimensão dos agregados.

A capacidade de passagem está relacionada com a facilidade com que o betão passa por espaços estreitos resultantes da cofragem e das armaduras. Para se obter uma boa capacidade de passagem consideram-se os seguintes procedimentos:

- Diminuir a razão água/finos;
- Introduzir um agente de viscosidade;
- Diminuir o volume de agregado grosso;
- Diminuir a máxima dimensão dos agregados.



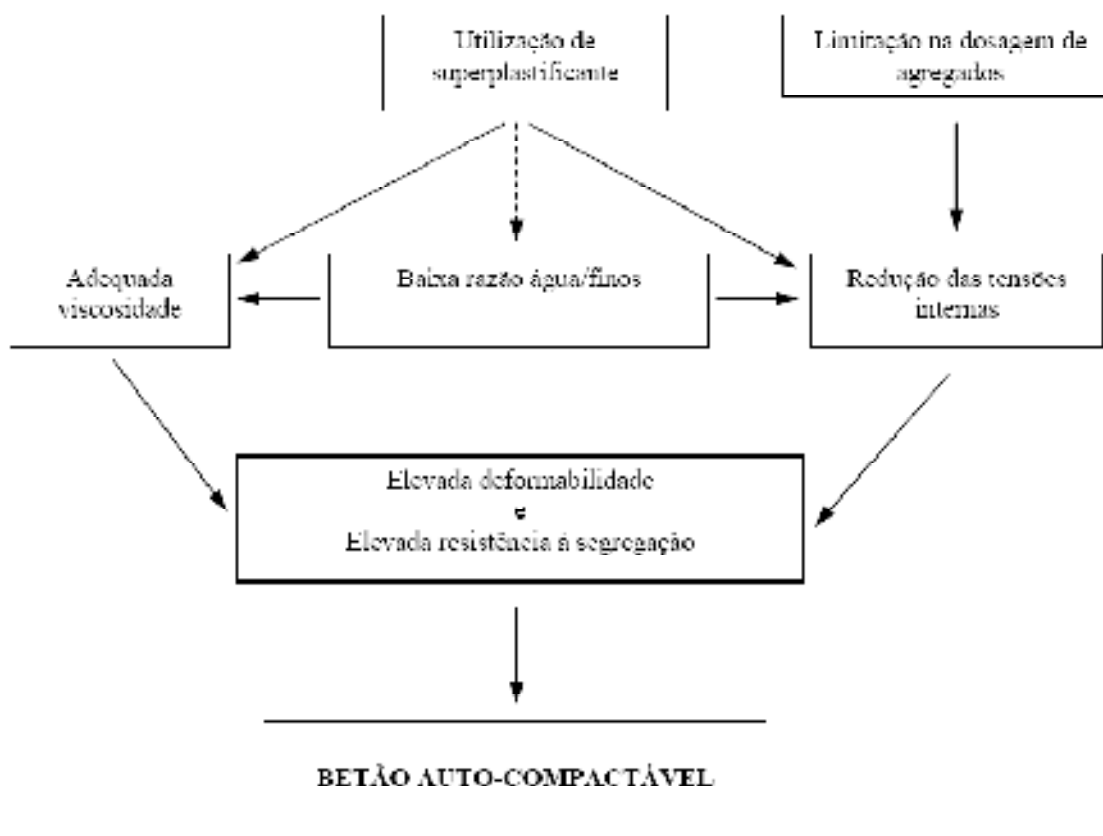


Figura 2.14.: Metodologia para alcançar a auto-compactabilidade

Tabela 2.3: Proporções dos materiais do BAC versus Betão Convencional (Rodríguez (2006))

<b>BAC</b>	Cimento + adição	Areia	Agregados	Água
	18,1%	33,8%	28,6%	20%
<b>Betão Convencional</b>	Cimento	Areia	Agregados	Água
	9,4%	32,8%	37%	20%

Na Tabela 2.4 apresentam-se exemplos de composições de BAC estabelecidas por diferentes autores onde se pode observar as proporções na mistura dos diversos materiais constituintes (em kg/m<sup>3</sup>). Em geral, as quantidades de finos e superplastificante são mais elevadas, comparadas com as utilizadas em betões convencionais (ver Tabela 2.3 e Figura 2.15). A dosagem de agregado grosso é menor do que a habitual, sendo inferior em peso, ou da mesma ordem de grandeza que a da areia.

Tabela 2.4.: Misturas típicas de BAC (Rodríguez (2006))

	Bartos e Grauers (1999)	Ambroise e Pêra (2001)	Su et al. (2001)
Cimento	280	380	300
Cinzas volantes	-	-	148
Escórias	-	-	63
Filer calcário	240	20	-
Areia	865	900	928
Agregado máx. 16mm	-	800	-
Agregado máx. 20mm	750	-	718
Superplastificante	4,2	4,0	8,2
Agente de viscosidade	-	2,0	-
Relação (a/c)	0,71	0,53	0,57
Relação (a/f)	0,36	0,50	0,40
Resistência a 28 dias (MPa)	47	48	41

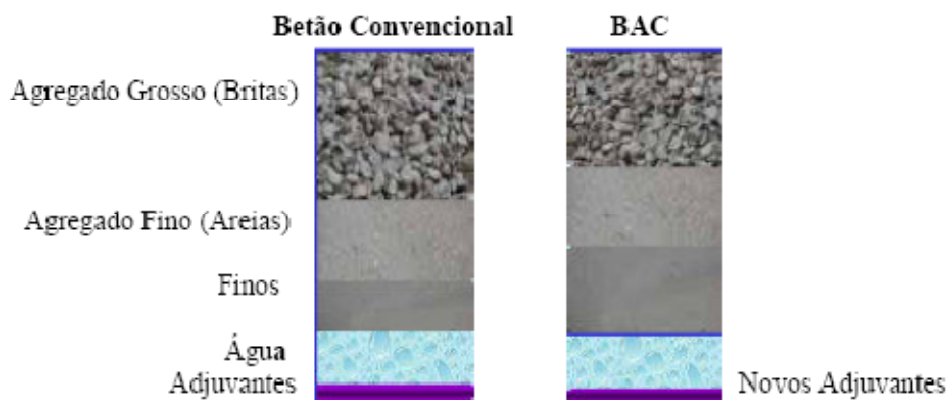


Figura 2.15.: Materiais constituintes do BAC versus Betão Convencional (Oliveira e Almeida (2007))

## 2.6. MÉTODOS DE ESTUDO DA COMPOSIÇÃO

Para a concepção da composição do BAC não existe nenhum método aceite universalmente, o seu desenvolvimento baseou-se em diversos métodos distintos e na experiência adquirida com betões convencionais. A definição da composição deste tipo de betão, que apresenta características inovadoras em termos de consistência, é mais trabalhosa do que a de um betão convencional, e não pode ser efectuada com os métodos utilizados para este último (como é o caso do Método de Faury). As misturas de BAC caracterizam-se pela sua elevada fluidez, falta de segregação e baixo risco de

bloqueio. Tais características dependem dos componentes da mistura, contudo a diversidade de materiais existentes no mercado e os diferentes usos que se pretende dar ao betão em função do tipo de estrutura a que se destina o material, dificulta a determinação de uma composição-tipo para os BAC.

Os requisitos básicos a cumprir quanto aos materiais a empregar na dosagem de BAC, segundo (EFNARC (2002)), são:

- Elevado volume de pasta de cimento (35-40% do volume de betão);
- Elevada quantidade de finos ( $< 0,1$  mm) entre 400-600 kg/m<sup>3</sup>;
- Relação água/finos em volume (a/f) entre 0,8-1,10;
- Relação de areia grossa não superior a 50% da areia total;
- Dimensão máxima do agregado graúdo entre 10-20 mm;
- Volume de agregado graúdo entre 28-35% do volume total de betão;
- Curvas granulométricas do agregado contínuas e com adequado coeficiente de forma;
- Aditivos superplastificantes de última geração;
- Aditivos moduladores de viscosidade (quando necessário).

Existem várias metodologias para determinar a composição do BAC, com destaque para o método de Okamura et al. (2000), por ter sido o primeiro método proposto e que permitiu o estudo de uma forma racional e simples. O método de concepção da composição proposto pelo grupo de investigação liderado pelo Prof. Okamura (Okamura et al. (2000)), considerando um fornecimento normal numa central de betão, parte do princípio que a única fonte de materiais finos é o cimento “Portland” de baixo calor de hidratação. Com este método a qualidade do betão no estado endurecido é, normalmente, automaticamente assegurada quando alcançada a auto-compactabilidade do betão no estado fresco. Segundo este método, é fixado um nível de auto-compactabilidade elevado realizando-se apenas um ajuste das tolerâncias em função da estrutura em questão.

Mesmo quando um nível de auto-compactabilidade baixo é adequado, é mais seguro optar por um nível mais elevado, e depois adaptar as diversas condicionantes da estrutura e da construção, permitindo uma maior variabilidade na produção e alargando os limites de controlo. Neste método, começa-se por fixar o teor de ar, sendo recomendado o intervalo de valores entre 4,0 e 7,0%, dependendo do ambiente ao qual a estrutura vai estar exposta. O volume real de agregado grosso, por unidade de volume de betão, é o correspondente a um volume aparente de 0,50 m<sup>3</sup>, dependendo do grau de compactação que as partículas do agregado permitem, excluindo o ar previsto para a composição. É possível determinar o volume de argamassa, considerando-se que o volume de agregado fino corresponde a 40% desse volume. Com os volumes de agregado grosso e fino assim definidos, obtém-se auto-compactabilidade adequada mas, para percentagens superiores rapidamente se deixa de verificar esta característica.

O ajuste da razão volumétrica água/finos e da dosagem do superplastificante, passa inicialmente pela realização de dois tipos de ensaios da argamassa, o “Ensaio de Espalhamento” e o “Ensaio de fluidez do betão” que fornecem os parâmetros Gm (diâmetro de espalhamento relativo) e Rm (tempo de escoamento relativo), respectivamente.

Uma argamassa adequada para um BAC deverá conduzir a  $Gm = 5,0$  e  $Rm = 1,0$  simultaneamente, correspondendo respectivamente a uma elevada deformabilidade e suficiente viscosidade.

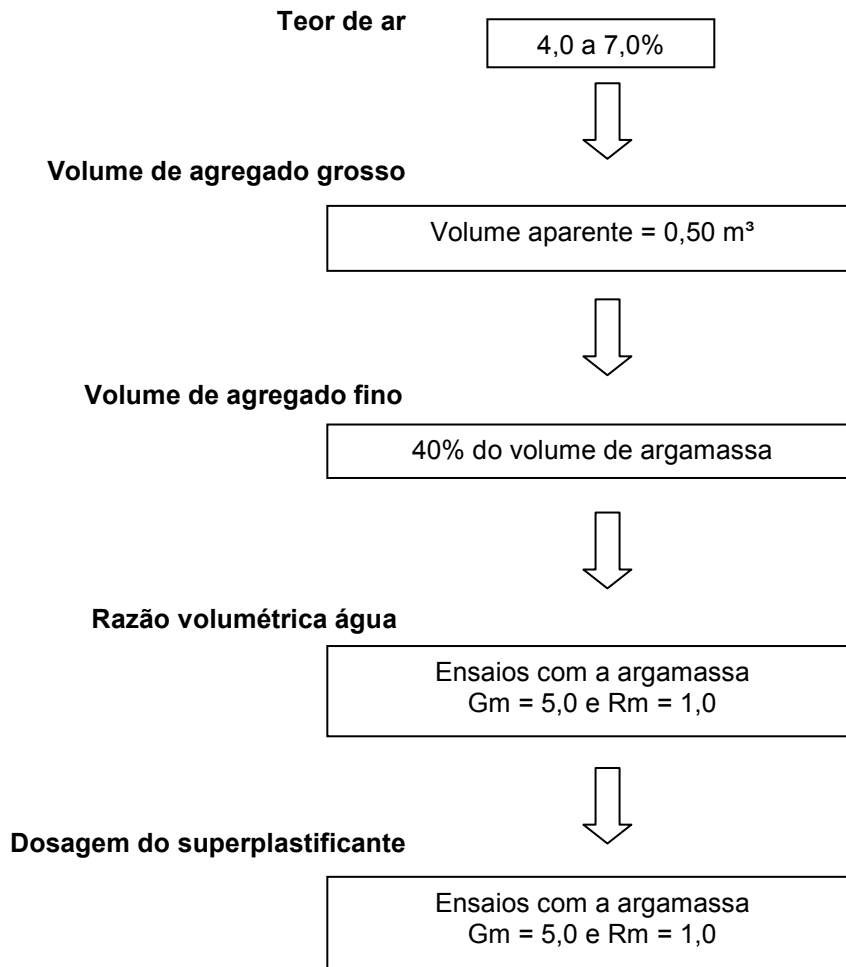


Figura 2.16.: Método de concepção da composição proposto por Okamura et al. (2000)

No entanto, este método conduz geralmente a um betão com um volume de pasta mais elevado do que o exigido numa composição “óptima”. O acréscimo de custo associado pode tornar-se inaceitável em países onde o custo dos materiais está sujeito a uma competição intensa. Na tabela seguinte são apresentadas, de uma forma resumida, as recomendações do Comité Técnico 174-SCC da RILEM (2001) para obter um BAC.

Tabela 2.5.: Recomendações do Comité Técnico 174-SCC da RILEM (2001)

<b>Parâmetro / Composição</b>	<b>Recomendações do Comité Técnico 174-SCC da RILEM</b>
Total de finos	450 – 600 kg/m <sup>3</sup>
Total de agregado grosso	750 – 920 kg/m <sup>3</sup>
Total de agregado fino	710 – 900 kg/m <sup>3</sup>
Dosagem de água	155 – 200 kg/m <sup>3</sup>
Volume de agregado grosso	30 – 34%
Volume de agregado fino	*
Razão água/finos em massa	*
Razão água/finos em volume	0,8 – 1,2
Volume de pasta	34 – 40%
Volume de agregado fino em relação ao volume de argamassa	40 – 50%

\* Não existem valores recomendados

A “European Group Project of Self-Compacting Concrete – EPG SCC”, que realizou o “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use” (2005), sugere alguns limites para vários componentes da composição de um BAC, apresentados na seguinte tabela.

Tabela 2.6: Recomendações da EFNARC (2005)

<b>Componente</b>	<b>Varição de Massa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Varição de Volume (l/m<sup>3</sup>)</b>
Finos (Pó)	380 - 600	*
Pasta	*	300 - 380
Água	150 - 210	150 - 210
Agregado grosso	750 - 1000	270 - 360
Agregado fino	48% - 55% do peso total do agregado	
Razão água/finos	*	0,85 – 1,10

\* Não existem valores recomendados

Em 2004, na Universidade Politécnica da Catalunha (UPC), Gettu & Agulló desenvolveram um método de dosagem, baseado na pesquisa de Gomes (2002). Segundo essa análise, a composição do BAC pode ser determinada a partir da otimização separada da composição da pasta e do esqueleto granular dos agregados.

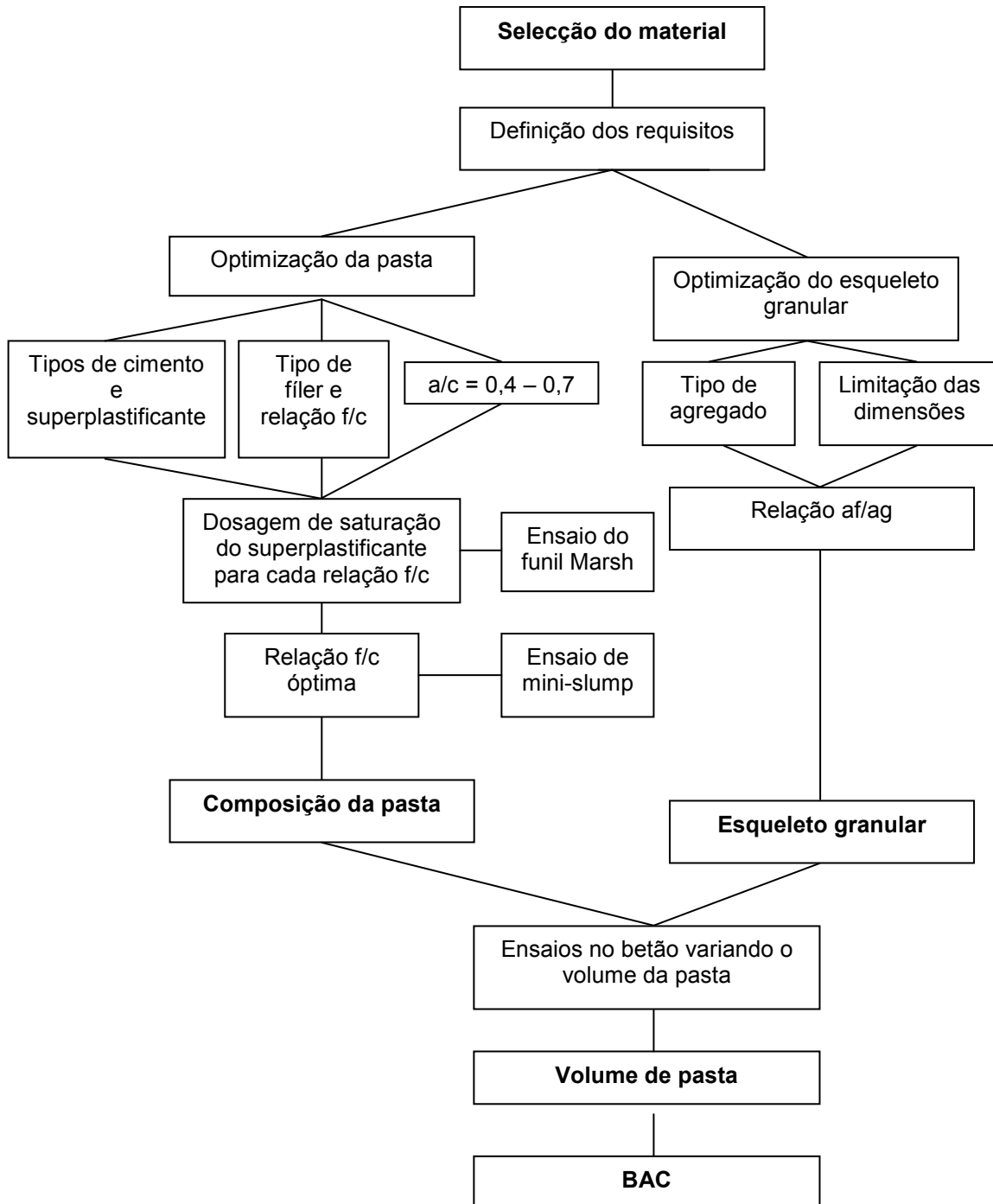


Figura 2.17.: Método de concepção da composição proposto pela UPC (Gomes (2002))

No âmbito do projecto BACPOR, Nunes et al. (2005) desenvolveram uma metodologia para definição da composição do BAC, à semelhança dos métodos existentes para o betão convencional, baseado em procedimentos e equipamentos acessíveis. A metodologia desenvolvida pretende por um lado, permitir a utilização de uma grande variedade de materiais existentes no mercado português e, por outro lado, conceber composições económicas capazes de competir com o betão convencional. A optimização da composição desenvolveu-se ao nível da pasta, argamassa e betão, recorrendo a ensaios simples e a ensaios mais sofisticados para medição de parâmetros reológicos. Por um lado, procedeu-se à caracterização dos parâmetros reológicos de pastas de cimento e adições, o que foi fundamental para a selecção da dosagem do superplastificante, estudo do efeito das várias adições, efeito na trabalhabilidade e estabilidade do betão fresco. Por outro lado, foi desenvolvido um procedimento para optimização da composição de um BAC no qual se fazem variar as proporções dos diferentes materiais, no sentido de alcançar as características da auto-compactabilidade e, simultaneamente, atender a outras condicionantes como a classe de resistência. A metodologia apresentada destina-se a composições de BAC do tipo “Finos”, ou seja, a viscosidade é conseguida à custa de uma quantidade maior de finos e sem ajuda de adjuvantes agentes de viscosidade.

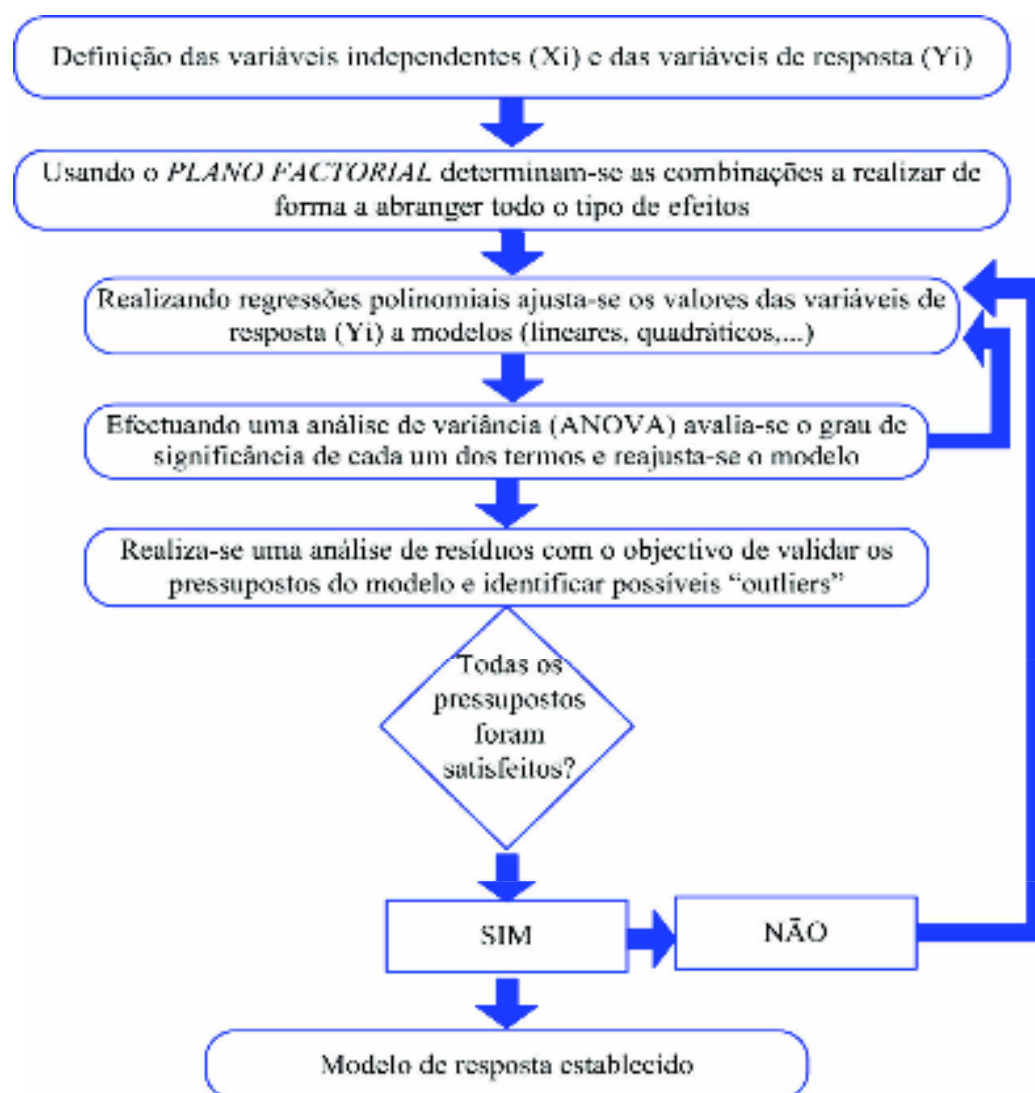


Figura 2.18.: Método proposto pela FEUP (Figueiras (2006))





## 3

## ADERÊNCIA

## 3.1. AÇO-BETÃO

## 3.1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O comportamento da aderência entre os varões da armadura e o betão circundante tem uma importância decisiva no comportamento mecânico e no desempenho das estruturas de betão armado, especialmente sob os pontos de vista da fissuração, condições de serviço e situações limites. A aderência pode ser entendida como a ligação existente entre o aço e o betão, a qual impede o deslocamento relativo entre os dois materiais e assegura um funcionamento em conjunto. Ao exercerem-se esforços de tracção numa barra de armadura embebida num provete de betão produzem-se esforços de tracção e compressão no betão, cujas trajectórias das respectivas tensões principais estão ilustradas na Figura 3.1.

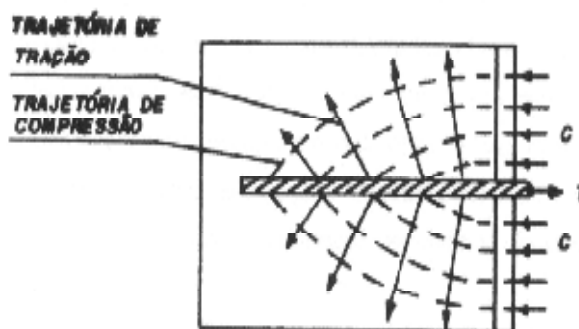


Figura 3.1.: Desenvolvimento das trajectórias das tensões principais junto a uma barra de armadura (Leonhardt (1979))

Logo que surja fissuração no betão, as deformações, na proximidade das fissuras, passam a ser diferentes, a armadura desloca-se mais do que o betão. A diferença de deslocamento dos materiais implica a existência de deslizamento da armadura em relação ao betão. No caso em que há igualdade de deformações, tem-se a chamada aderência rígida, pois não há deslizamentos; no caso em que os alongamentos diferem entre si esta aderência é chamada deslizante ou móvel. O estudo da aderência

deslizante entre as barras de armadura e o betão que as envolve está, portanto, intimamente relacionado com a fissuração.

De acordo França (2004), entre outros, não se faz uma consideração directa da lei de tensão de aderência em função do deslizamento, mas antes estabelecem-se leis constitutivas do aço em termos de deformações médias. Na deformação média do betão, igual à da armadura, inclui-se o seu efectivo alongamento e as aberturas destas transformadas em deformação, dividindo as distâncias entre as fissuras, as quais são assim espalhadas ao longo da peça. Por outro lado, o problema pode ser tratado por meio da definição de uma lei de tensão de aderência em função do deslizamento, surgindo como uma simplificação da lei tensão de armadura na fissura, associada a sua deformação média. De qualquer forma, fica considerado o chamado efeito de endurecimento provocado pelo aço na tracção (tension stiffening).

Segundo França (2004), com o intuito de facilitar a sua análise, a aderência pode ser dividida em três tipos:

a) Aderência por adesão

A aderência por adesão é estabelecida pela ligação físico-química que se estabelece na interface aço-betão durante as reacções de presa do cimento e depende da limpeza da superfície e da rugosidade das barras. No entanto, esta parcela da aderência não é suficiente para assegurar uma boa aderência, pois é destruída mal ocorram pequenos deslocamentos do varão.

b) Aderência por atrito

Este tipo de aderência é devida a forças de atrito existentes entre o betão e o aço desde que existam pressões transversais às armaduras. Esta depende do coeficiente de atrito entre o aço e o betão, o qual é função do estado superficial da barra.

c) Aderência mecânica

A parcela da aderência mecânica diz respeito à interacção mecânica entre o aço e betão, decorrente da presença de saliências na superfície da barra (nervuras laminadas, estrias, irregularidades na superfície da barra). Esta parcela da aderência depende da forma, altura, inclinação das nervuras e da distância entre elas. A aderência mecânica é o tipo de ligação mais fiável, pois contribui de maneira fundamental para a solidarização dos dois materiais e possibilita melhor aproveitamento das resistências mais elevadas do aço. As barras nervuradas oferecem resistência ao escorregamento da ordem de duas a três vezes a das barras lisas, pois as asperidades do varão entrelaçam-se no betão e fixam-se.

De acordo com França (2004) a rotura da aderência nas barras nervuradas pode ocorrer:

- Pelo esmagamento do betão junto das nervuras;
- Pelo corte do betão em torno da barra entre nervuras;
- Por destacamento betão de recobrimento ao longo da barra;
- Pela combinação dos três modos.

### 3.1.2. FACTORES QUE AFECTAM O COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA

Existem vários factores que podem intervir na quantificação da tensão de aderência e influenciar o comportamento da mesma:

#### a) Composição do betão

Em princípio, qualquer alteração na composição do betão que não altere a resistência à compressão nem a resistência à tracção do betão, também não deverá alterar o seu comportamento na aderência.

Segundo França (2004), utilizando agregados de diâmetro maior e diminuindo a relação água/cimento, observa-se uma melhoria no comportamento da aderência. Em misturas com agregados muito finos, as partículas finas e também a água acumulam-se nas vizinhanças da barra, provocando nesta zona uma quebra na resistência, o que facilita o esmagamento do betão por compressão junto aos flancos das nervuras, quando a barra for solicitada.

Betões convencionais com elevado abaixamento têm uma resistência de aderência mais baixa do que os betões com menor abaixamento, com a mesma resistência à compressão, independentemente da presença do aditivo superplastificante (França (2004)).

#### b) Idade de carregamento

A influência da idade do carregamento na aderência aço-betão pode ser considerada como sendo da mesma intensidade que a sua influência sobre a resistência à compressão ou à tracção do betão (França (2004)).

Nos varões nervurados, a idade do carregamento influencia de forma significativa as características de aderência; no entanto, o mesmo não ocorre para os varões lisos, pois com o aumento da resistência à compressão, a resistência da aderência permanece a mesma (França (2004)).

#### c) Resistência mecânica do betão

A resistência mecânica do betão é um dos factores que influenciam de maneira mais significativa a aderência. Quanto maior for a resistência mecânica do betão, maiores serão as tensões de aderência que o betão pode suportar na interface aço-betão.

Em provetes com diferentes níveis de resistência, a resistência à compressão do betão exerce o papel principal na resistência da aderência, e esta última aumenta proporcionalmente à raiz quadrada da resistência à compressão do betão (França (2004)).

A resistência à tracção do betão é o factor principal que condiciona a resistência da aderência quando a rotura ocorre por fendilhação. No entanto, no caso em que ocorre rotura por arrancamento, o factor determinante é a resistência de compressão do betão (França (2004)).

A tensão de aderência aumenta com o aumento da resistência do betão que envolve a armadura; devido à densificação e à diminuição da espessura da zona de transição entre o betão e o varão de aço (França (2004)).

Nos varões nervurados, criados para desenvolver maior aderência do que os lisos, o fenómeno da aderência tem uma natureza diferente. Embora nesses varões se desenvolvam também a adesão e o atrito, a resistência aos deslizamentos deve-se principalmente à resistência que o betão oferece às pressões que sobre ele são exercidas pelas nervuras, ou seja, nos varões nervurados a aderência depende principalmente da acção mecânica entre o betão e as nervuras.

#### d) Diâmetro do varão

O diâmetro do varão não tem influência no comportamento da aderência (França (2004)).

O ACI Committee 408 (2005) considera a tensão de aderência independente do diâmetro do varão, sendo esta uma variável de menor importância, desde que o recobrimento e o comprimento de ancoragem sejam proporcionais ao diâmetro do varão.

A resistência da aderência diminui com o aumento do diâmetro do varão. Tal facto pode ser explicado pelo aumento da espessura na zona de transição entre a armadura e o betão. O aumento do diâmetro da secção transversal da barra de aço implica maiores alturas das nervuras; e as nervuras de maiores dimensões retêm mais água da amassadura na face inferior da barra, reflectindo uma zona de transição de maior espessura e enfraquecendo a ligação entre a argamassa e a armadura, tornando-se esta mais porosa e mais vulnerável ao esmagamento do betão por compressão junto às nervuras (França (2004)).

Através de ensaios “pull-out test” realizados de acordo com CEB RC6 (1983) verificou-se que à medida que aumenta o diâmetro da barra a tensão de aderência aumenta, estando este resultado directamente relacionado com o adensamento do betão e não com a espessura da zona de transição (França (2004)).

#### e) Posição dos varões

A posição do varão influi na resistência ao arrancamento. As armaduras betonadas em posição horizontal na parte superior da cofragem apresentam pior comportamento do que as betonadas na parte inferior da cofragem. Isto deve-se ao facto de as armaduras inferiores se situarem numa zona em que o adensamento é mais acentuado e, portanto, a existência de argamassa porosa na metade inferior das barras é menor (França (2004)).

Na Figura 3.2. pode-se verificar que a segregação do betão fresco faz com que haja uma acumulação de água sob as barras, posteriormente, ao ser absorvida pelo betão endurecido deixa vazios ou inúmeros poros na sua face inferior, prejudicando sensivelmente a aderência, pois compromete a zona de transição existente entre o aço e o betão.

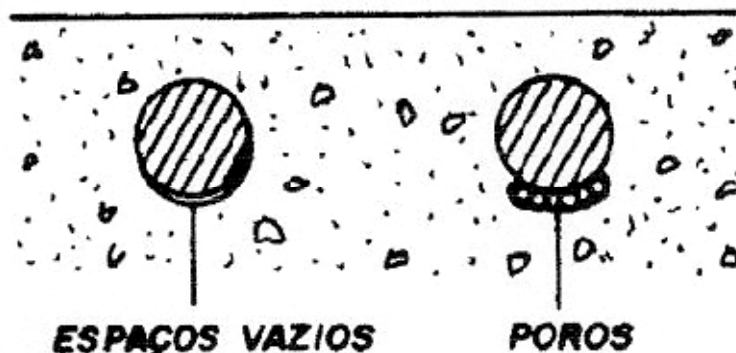


Figura 3.2.: Formação de espaços vazios ou poros sob as barras betonadas em posição horizontal, devida à segregação e à acumulação de água (Leonhardt (1979))

As armaduras horizontais inferiores têm maior aderência do que as barras horizontais superiores. De acordo com o CEB 151 (1982), o desempenho da aderência nas barras verticais, quando a carga é aplicada na direcção contrária à da betonagem, é muito melhor do que o das barras na posição horizontal ou betonadas na posição vertical e solicitadas no mesmo sentido da colocação do betão. Quando a carga é aplicada na direcção da betonagem, a aderência pode registar valores mais baixos do que no caso das barras horizontais na parte superior da cofragem (França (2004)).

A influência da posição da armadura durante a betonagem sobre a aderência diminui quando a resistência do betão aumenta, e a posição dos varões em relação ao sentido do enchimento dos moldes pelo betão influenciou de maneira menos acentuada sobre a aderência do betão auto-compactável do que nos betões convencionais (França (2004)).

f) Compactação do betão

O estado de compactação do betão pode ser crítico para a aderência uma vez que as zonas de ancoragem são pontos onde normalmente se tem uma elevada percentagem de armadura, ocasionando maiores dificuldades de betonagem e, como consequência, maior a possibilidade de surgimento de vazios, tornando esta região mais fraca quando solicitada. Segundo o CEB 151 (1982) a compactação do betão tem uma influência na aderência similar à influência na resistência à compressão.

g) Estado superficial dos varões

O estado superficial dos varões lisos, onde a resistência de aderência está ligada à adesão, tem influência significativa sobre a aderência que estes podem desenvolver. Para varões nervurados, onde a adesão representa uma pequena parcela da resistência da aderência, o estado superficial do varão não influencia significativamente essa resistência (França (2004)).

### 3.1.3. BETÃO CONVENCIONAL VS. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

Segundo “Association Française de Génie Civil” (AFGC) a aderência betão/armadura para os betões auto-compactáveis obedece às mesmas regras do betão convencional. Em geral, com o BAC há uma maior estabilidade da mistura com diminuição da exsudação que elimina os defeitos decorrentes do envolvimento das armaduras, encontrados em alguns betões convencionais. O BAC com uma razão água/finos semelhante à de um betão corrente, geralmente tem um valor de resistência à compressão superior, porque a ausência de vibração origina uma interface melhorada entre os agregados e a pasta endurecida. O desenvolvimento da resistência ao longo do tempo é semelhante em ambos os tipos de betão (European Guidelines (2005)).

Em relação à resistência à tracção de um betão auto-compactável esta é semelhante à do betão convencional, já que o volume de pasta não tem influência significativa no valor da resistência à tracção (European Guidelines (2005)). A razão entre a resistência obtida a partir de carotes e a resistência de provetes cúbicos é superior no betão auto-compactável face à de um betão corrente vibrado.

O volume e o tipo de agregados envolvidos na composição do betão influenciam o valor do módulo de elasticidade do betão. A selecção de um determinado tipo de agregado com um módulo de elasticidade elevado incrementa o módulo de elasticidade do betão. No entanto, o aumento do volume de pasta pode diminuir o módulo de elasticidade do betão. Em consequência, o módulo de elasticidade do betão auto-compactável é inferior ao do betão convencional vibrado, devido a conter maior volume de pasta na sua composição (European Guidelines (2005)).

Tal como se referiu atrás, a ligação entre as armaduras e o betão é afectada pela posição dos varões da armadura, e pela espessura de recobrimento do betão. Geralmente, uma deficiente aderência está relacionada com um deficiente recobrimento das armaduras durante a colocação, ou por exsudação e segregação do betão antes do seu endurecimento. A fluidez e a coesão do betão auto-compactável minimizam estes efeitos negativos especialmente na parte superior das armaduras em grandes secções de betão armado (European Guidelines (2005)).

As diferenças aqui apontadas entre o BAC e o betão convencional fazem antever a existência de diferenças no comportamento da aderência aço-betão quando se utiliza o BAC, daí a necessidade de efectuar mais estudos neste âmbito.

#### 3.1.4. ENSAIOS DE ADERÊNCIA AÇO-BETÃO

As propriedades do betão no estado endurecido são essenciais para a verificação da segurança das estruturas e para a previsão do seu comportamento ao longo da vida útil. Nestas propriedades estão geralmente incluídas: a resistência mecânica, a deformabilidade e ainda propriedades relacionadas com a durabilidade. Para avaliar a resistência e o desempenho das ligações de aderência, são realizados ensaios mecânicos (conhecidos como ensaios de arrancamento) através de provetes prismáticos de betão. Estes ensaios são realizados com auxílio da máquina universal de ensaios, onde através da aplicação de uma força de tracção é extraída a barra de aço do provete de betão, ocorrendo então a rotura da ligação de aderência e o deslocamento relativo entre os dois materiais. Em geral, instala-se um transdutor de deslocamentos para registar o deslocamento relativo entre a barra de aço e a superfície livre do betão. Desta forma, obtém-se informação sobre o nível máximo de resistência, a forma da curva «força×deslizamento», e a inclinação dos ramos da curva.

Dos vários ensaios que permitem determinar os valores da tensão de aderência entre o aço e o betão, salientam-se os seguintes.

##### 1 - Ensaio de arrancamento directo (pull-out test)

O ensaio de arrancamento é o mais tradicional dos ensaios de aderência e consiste em extrair uma barra de aço posicionada no centro de um provete de betão, colocado sobre placas de apoio de uma máquina de ensaio. As duas extremidades da barra são projectadas para fora do provete, medindo-se a força de tracção aplicada num dos extremos e os escorregamentos no outro extremo.

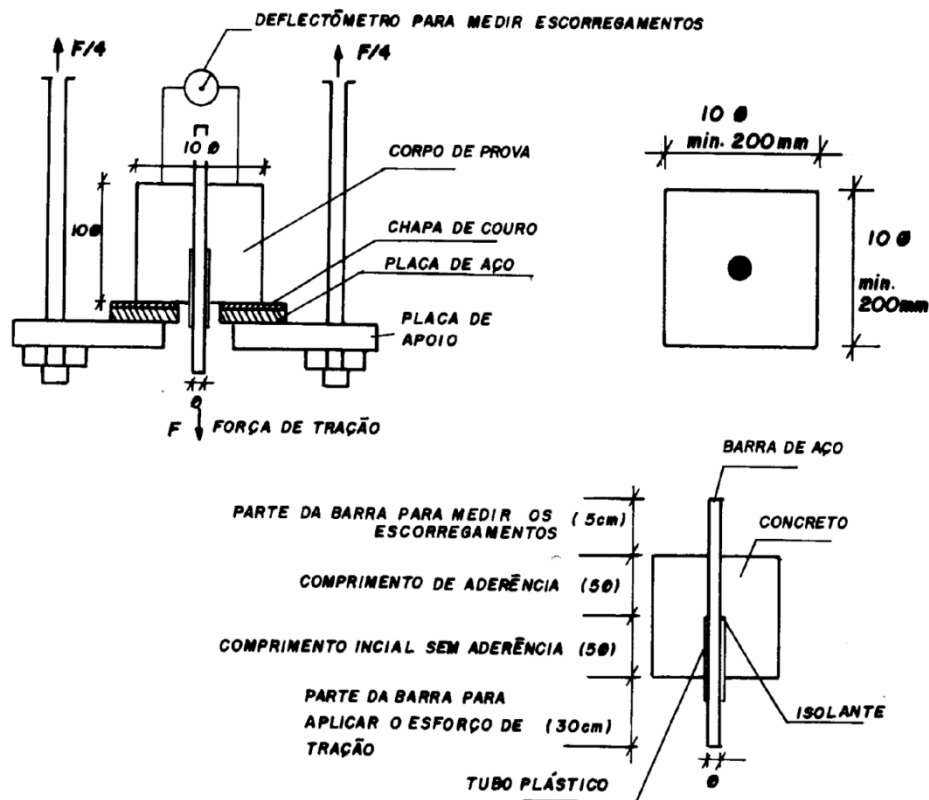


Figura 3.3.: Ensaio de arrancamento directo proposto pela RILEM (1973)

A vantagem deste ensaio, para além do baixo custo e simplicidade, é que fornece uma ideia clara do conceito de ancoragem, isto é, o comprimento embebido no betão é o que define o próprio comprimento de ancoragem.

Tem como desvantagem que os resultados obtidos servem apenas para ensaios comparativos ou estudos qualitativos, pois a forma de solicitar o provete não reproduz as condições reais de solicitação dos varões de aço inseridos nas estruturas correntes.

Este ensaio de arrancamento directo é normalizado pela RILEM, doc 7.II.128 (1973), com todo o detalhe necessário para a sua execução em laboratório.

Obtido o valor máximo da resistência, a tensão média de aderência é dada pela expressão 3.1.:

$$\tau = \frac{F_{\max}}{\pi \times \phi \times L} \quad (3.1.)$$

onde:

$\tau$  - Tensão média de aderência na interface

$L$  - Comprimento da barra envolvida pelo betão

$F_{\max}$  - Força máxima de arrancamento

$\phi$  - Diâmetro da barra

Pela forma da curva «deslizamento»esforço», pode-se obter a rigidez da ligação, o início dos deslocamentos relativos e os deslocamentos específicos após o ponto de máximo esforço de arrancamento. O deslizamento, no início do carregamento, é causado em parte pela deformação elástica do betão; entretanto, para cargas mais altas, ele é causado pelo esmagamento do betão em frente às nervuras.

## 2 - Ensaio de flexão (beam test)

O “beam test” consiste num provete constituído por dois blocos paralelepípedicos, ligados na parte inferior pela barra de aço destinada ao estudo de aderência e na parte superior por uma rótula metálica.

A viga assim constituída é solicitada à flexão simples, sobre dois apoios, por duas forças concentradas de mesma magnitude, aplicadas de forma simétrica.

Nos extremos das barras colocam-se deflectómetros, para que possam ser medidos os deslocamentos relativos da barra em relação ao betão.

A ancoragem é limitada ao comprimento especificado, com a ajuda de tubos plásticos que eliminam a aderência nos trechos desejados.

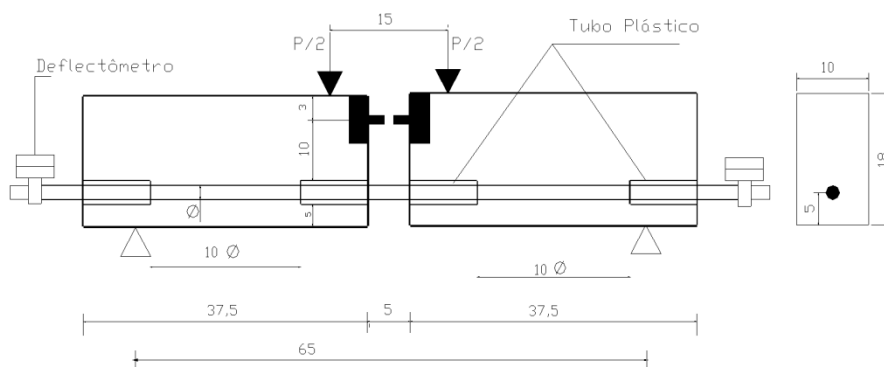


Figura 3.4.: Ensaio de flexão “beam test” proposto pelo Comité Euro-International du Béton (1983)

## 3 - Ensaio de extremo de viga (beam end test)

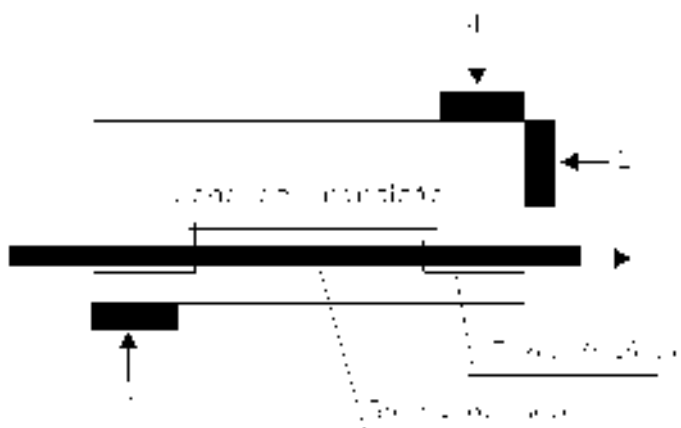
Este ensaio representa a situação de aderência que existe entre uma fissura de flexão-corte e o extremo de uma viga simplesmente apoiada.

Representa um progresso sobre o tradicional “pull-out test”, visto que estabelece um gradiente de deformações ao longo da altura do provete mais realista.

O ensaio consiste numa barra situada na parte inferior do provete, que é traccionada e a reacção, que simula a zona de compressão da viga, é aplicada na parte superior do provete.

O momento criado é equilibrado por outro par de forças que actuam perpendicularmente à barra e simulam a reacção de apoio e o esforço de corte que seria transmitido através do betão.





- 1 – Força de tração na barra
- 2 – Placa de reacção que simula a zona de compressão da viga
- 3 – Placa de reacção de apoio
- 4 – Placa de reacção que simula o esforço de corte que seria transmitido através do betão

Figura 3.5.: Ensaio de extremo de viga “beam end test” (França (2004))

#### 4 - Ensaio de tirante de betão

Este ensaio consiste em exercer um esforço de tração aos dois extremos de uma barra mergulhada no centro de um provete de betão prismático, com o objectivo de avaliar a aderência entre o betão e o aço.

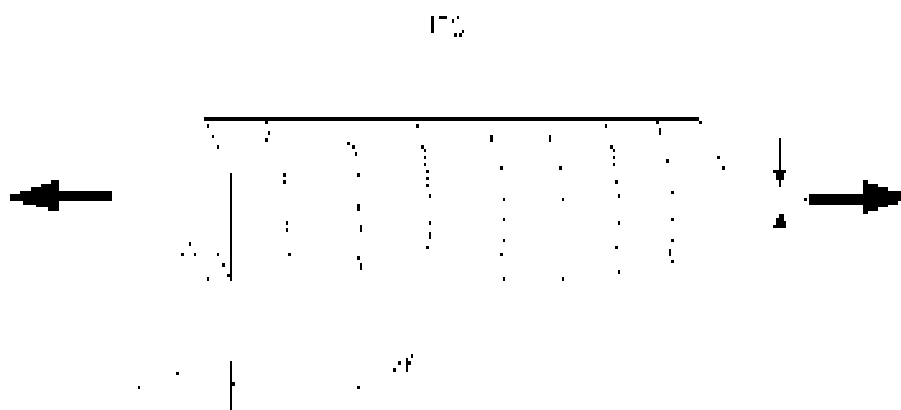


Figura 3.6.: Ensaio especificado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (1982)

Em geral, estes ensaios destinam-se ao estudo da fissuração e reproduzem muito bem as condições reais de solicitação das barras na região traccionada.

Através da avaliação do afastamento e abertura das fissuras verificadas, este ensaio permite a determinação do chamado coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados à armadura do betão armado.

Enquanto barras lisas apresentam fissuras de maior abertura e mais afastadas entre si, barras nervuradas apresentam fissuras mais próximas e com menor abertura.

Através da avaliação do afastamento e abertura das fissuras, o Ensaio de Conformação Superficial ou Ensaio de Tirante de Betão permite determinar o valor do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados à armadura do betão armado.

A partir do cálculo do espaçamento médio entre fissuras  $\Delta l_{medio}$ , é possível determinar o coeficiente de conformação superficial através da equação 3.2.:

$$\eta = \frac{2,25 \times d}{\Delta l_{medio}} \quad (3.2.)$$

Onde:

$\eta$  - Coeficiente de conformação superficial

$d$  - Lado da secção do tirante, calculado pela fórmula 3.3.:

$$d = \left( \pi \times \phi \times \left( \frac{\phi}{4} + 7 \right) \right)^{1/2} \quad (3.3.)$$

$\phi$  - Diâmetro nominal da barra ou fio

$\Delta l_{medio}$  - Distância média entre fissuras, considerando as quatro faces

A partir do cálculo do espaçamento médio entre fissuras é possível determinar a tensão média de aderência das barras de aço em betões de diferentes classes de resistência, aplicando-se a equação 3.4. (França (2004)):

$$\tau_m = 0,375 \times \frac{f_{ct} \times \phi}{X_m} \times \rho \quad (3.4.)$$

Onde:

$\tau_m$  - Tensão média de aderência

$f_{ct}$  - Resistência à tracção simples do betão

$\phi$  - Diâmetro da barra

$X_m$  - Distância média entre fissuras

$\rho = As/Ac$

De modo geral, as solicitações que mobilizam a aderência aço-betão são: os carregamentos externos; a fissuração do betão que pode criar tensões de aderência pela transferência de esforços resistidos; as forças de ancoragem nas extremidades das barras; as variações de temperaturas que provocam dilatações diferenciadas no betão e no aço; a retracção do betão que é impedida pela armadura; a fluência do betão. As tensões originadas pelas solicitações na superfície de contacto aço-betão são denominadas tensões de aderência, as quais podem ser estimadas a partir de expressões de cálculo propostas por normas baseadas em ensaios efectuados ou modelos matemáticos.

Segundo o Eurocódigo 2, o valor de cálculo da tensão de rotura da aderência,  $f_{bd}$ , para varões de alta aderência, pode ser calculado pela expressão 3.5.:

$$f_{bd} = 2,25 \times \eta_1 \times \eta_2 \times f_{ctd} \quad (3.5.)$$

Em que:

$f_{ctd}$  é o valor de cálculo da resistência do betão à tracção

$\eta_1$  é o coeficiente relacionado com as condições de aderência e com a posição do varão durante a betonagem:  $\eta_1 = 1,0$  para condições de boa aderência ou  $\eta_1 = 0,7$  para todos os outros casos

$\eta_2$  está relacionado com o diâmetro do varão:  $\eta_2 = 1,0$  para  $\phi \leq 32$  mm ou  $\eta_2 = (132 - \phi) / 100$  para  $> 32 \phi$  mm

## 3.2. BETÃO-BETÃO

### 3.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS (JUNTAS FRIAS)

O faseamento de uma betonagem, com um intervalo, conduz à formação de uma “junta fria”. Este facto suscita uma questão acerca da qualidade da aderência entre os betões de ambas as fases, quando a superfície de contacto não sofre qualquer tipo de tratamento, nem vibração, como é o caso do betão auto-compactável.

A força de aderência entre duas camadas de betão é altamente influenciada pela rugosidade da superfície de contacto do betão. O conhecimento sobre a influência do tratamento de superfície e o método de criar rugosidade, na capacidade de aderência entre BAC's e um BAC e betão convencional é ainda limitado devido à diversidade de tipos de misturas de betão, tratamentos da superfície e força compressiva aplicados. A distribuição dos agregados num BAC homogéneo pode ser diferente da distribuição dos agregados de um betão convencional na proximidade da superfície.

Num betão convencional os agregados permanecem frequentemente visíveis na superfície após a betonagem, o que aumenta a rugosidade. Dependendo da composição da mistura e das características no estado fresco, este pode não ser sempre o caso num betão auto-compactável. Uma superfície do BAC, sem tratamento, pode ser mais lisa quando comparada com a do betão convencional. Devido à viscosidade do BAC e/ou à perda de trabalhabilidade causada pelo atraso na betonagem, podem-se formar camadas que reduzem a força de aderência na área de contacto.

Mesmo quando a superfície do betão não está danificada, é usual aumentar a rugosidade da sua superfície com o objectivo de melhorar a ligação entre ambos os materiais. A rugosidade é geralmente avaliada somente qualitativamente, observando a superfície de contacto e classificando-a de muito liso a muito áspero.

O Eurocódigo 2 indica que, no betão moldado em tempos diferentes, na ausência de mais informações detalhadas, as superfícies podem ser classificadas como muito lisas, lisas, rugosas ou indentadas. O ACI Comité 318-5 (2005) especifica duas categorias para a rugosidade, enquanto que, a BS 8110 (1985) apenas considera o equipamento que deve ser usado para se criar a rugosidade desejada.

Uma junta de interface diz respeito a uma superfície de ligação directamente entre betões de idades diferentes.

Segundo o “American Concrete Institute”, uma junta fria consiste numa junta ou descontinuidade resultante do atraso na betonagem com um período suficiente para impossibilitar a união do betão de duas camadas sucessivas.

Considerando que a água é o material de menor massa específica, a exsudação é uma forma de sedimentação em que parte da água de amassadura tende a subir para a superfície, carregando uma quantidade considerável das partículas mais finas do cimento, formando uma camada porosa de nata fraca.

Uma vez formada uma junta fria, a aderência torna-se incipiente e a sua resistência na tracção à flexão nessa secção é reduzida em mais de 50%, diminuindo consideravelmente a capacidade de resistência a esforços cortantes da peça estrutural ([www.exemplo.eng.br/css/JUNTAS,MC.pdf](http://www.exemplo.eng.br/css/JUNTAS,MC.pdf)).

A formação de uma junta fria implica a existência de um ponto fraco na massa do betão endurecido, uma descontinuidade que impede a transmissão de modo satisfatório dos esforços a que estará sujeito o elemento da estrutura, constituindo, assim, um local de provável ocorrência de fissuras.

Para além disso, pode ser uma região de maior porosidade do betão, vazios de segregação, falta de compactação, facilitando a passagem da água (infiltrações) ou a maior exposição ao ar.

Esta falta de homogeneidade do betão pode provocar a corrosão precoce das armaduras, o que tem como consequência a menor durabilidade da estrutura.

Uma junta fria (ver Figura 3.7.) é, portanto, uma união precária entre duas camadas de betão e deve ser evitada a todo custo, pois, uma vez formada, não há forma de a consertar satisfatoriamente.



Figura 3.7.: Vista da parte lateral da peça betonada onde é visível a junta de betonagem

Para quantificar o nível de aderência entre camadas de betão de idades diferentes têm sido utilizados vários ensaios, como o ensaio de “pull-off”, o ensaio de compressão ou o ensaio de “slant shear”.

#### a) Ensaio “pull-off”

O ensaio de aderência por tracção directa “pull-off test” consiste na aplicação suave de uma força de tracção, exercida manualmente no volante de tensão de um aparelho concebido para esse fim.

A tracção é transmitida axialmente a uma peça metálica de ensaio colada previamente ao provete.

O aumento gradual da força pode ser observado directamente numa escala e é registado assim que se dá o arrancamento do provete na secção mais frágil deste.

Analisando o provete, pode-se observar se a secção pertence a um dos materiais (arrancamento por tracção), ou se, por outro lado, está contida na superfície de ligação entre os materiais (arrancamento por aderência entre os materiais).

É usado para medir a resistência superficial do betão ou, recorrendo à carotagem parcial, em testes de aderência de elementos separados.

Dada a sua grande simplicidade, este ensaio pode ser executado na própria estrutura, traduzindo melhor as condições reais existentes.

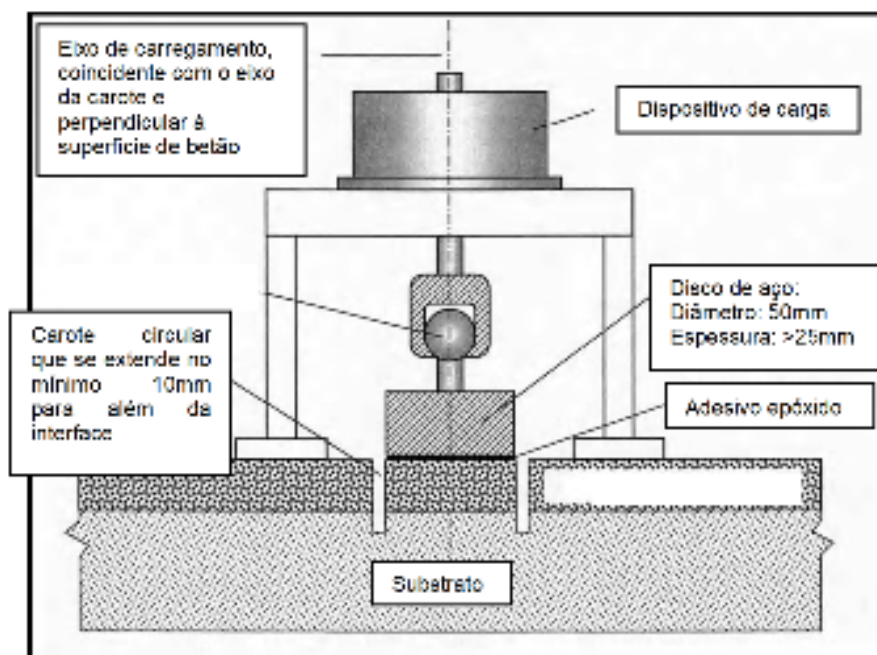


Figura 3.8.: Ensaio "pull-off" (ASTM C1583-04 (2004))

#### b) Ensaio compressão (corte)

Como exemplo para este tipo de ensaio refere-se o trabalho realizado por Cuenca e Serna (2010), que consistiu na execução de provetes em "Z" com forma e dimensões indicadas na Figura 3.9.

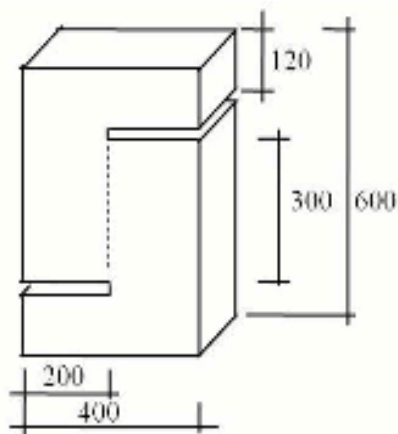


Figura 3.9.: Forma e dimensões dos provetes em “Z” e linha prevista de rotura (Cuenca e Serna (2010))

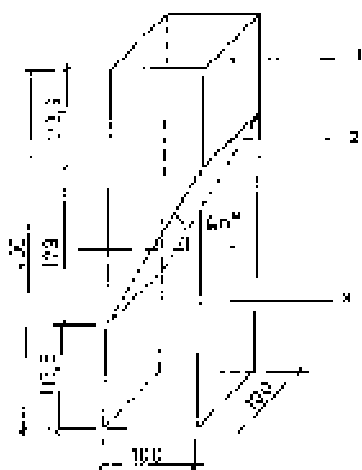
O procedimento do ensaio consiste em aplicar progressivamente uma carga vertical “P” até que ocorra a rotura na zona indicada na Figura 3.9. Durante o processo controla-se a evolução da fissura, medindo o deslocamento relativo entre as peças. As variáveis principais são: a composição granulométrica e consistência do betão e a possibilidade de existência de fissura prévia na linha prevista de rotura.

c) Ensaio “slant shear”

O ensaio “slant shear” tem mostrado ser um ensaio interessante, sendo um ensaio económico, sensível à rugosidade da superfície de ligação e apresentando uma boa correlação com o ensaio de “pull-off”.

O ensaio "slant shear" é sugerido para o restauro de primas de betão com as dimensões 100 mm x 100 mm x 400 mm (ver Figura 3.10.), de acordo com a prEN 1766, cuja superfície de aderência faz um ângulo de inclinação de 60° em relação à linha central de secção transversal do prisma.

O ensaio consiste em aplicar, ao longo da linha central longitudinal do prisma até que a rotura ocorra, uma força de compressão constante entre 1 kN e 10 kN, por segundo, e com uma capacidade de pelo menos 1000 kN (para os prismas de 100 mm x 100 mm x 400 mm).



- 1 - Betão 2ª fase
- 2 - “Junta fria”
- 3 - Betão 1ª fase

Figura 3.10.: Geometria e forma do provete (BS EN 12615:1999)

A força de aderência ( $f_b$ ) em N/mm<sup>2</sup>, para cada provete, ensaiado pelo "slant shear", será calculada através da fórmula 3.6.:

$$f_b = F \times \sqrt{\frac{3}{400000}} \quad (3.6.)$$

para provetes de 100 mm x 100 mm x 400 mm; sendo  $F$  (em N) a carga de rotura.

Os modos de rotura podem ser do tipo:

A: rotura de coesão entre as duas superfícies de betão

B: rotura de aderência numa das interfaces

C: rotura de coesão entre adesão

D: rotura de aderência em ambas as interfaces de adesão

Se houver uma mistura destes tipos de rotura, procede-se a uma avaliação visual para determinar a percentagem da área de superfície para cada tipo de rotura, recorrendo à relação: A:C = 60:40.

Neste estudo de aderência entre dois betões betonados faseadamente, foi utilizado o ensaio "slant shear" dado tratar-se de um método bastante acessível para quantificar a tensão de rotura e visualizar o modo de rotura das peças de betão.

No entanto, foram introduzidas algumas alterações ao estabelecido na BS EN 12615:1999 uma vez que neste caso não se trata de reparação com qualquer tipo de argamassa, não existe nenhum material de separação na interface entre as duas camadas, nem se fez qualquer tratamento das superfícies.

Segundo o Eurocódigo 2, a força de resistência na interface ( $V_{rdi}$ ) da aderência pode ser calculada pela expressão 3.7.:

$$V_{rdi} = c \times f_{ctd} + \mu \times \sigma_n \quad (3.7.)$$

Em que:

$c, \mu_n$  são parâmetros que dependem da rugosidade da interface

$c=0,35$  e  $\mu_n=0,60$  – superfície lisa (mais desfavorável)

$f_{ctd}$  é o valor de cálculo da tensão de rotura do betão à tracção simples

$\sigma_n$  é a força por unidade de área causada por força externa normal à interface





# 4

## INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é efectuada uma descrição dos ensaios realizados para caracterização do betão auto-compactável no estado fresco: ensaio de espalhamento (slump flow test), ensaio de escoamento (v-funnel test) e ensaio na caixa I (I-box test).

A definição da composição do bac fabricado neste estudo foi baseada no método proposto pela FEUP (Figueiras (2006)), apresentando-se a caracterização dos materiais utilizados: cimento, filer calcário, adições, agregados (areia fina, areia média e brita) e superplastificante.

Para caracterização do betão convencional é apresentada a composição fornecida pelo fabricante. Referem-se também as características de forma e dimensão dos varões de aço e o modo de preparação dos provetes utilizados no estudo da aderência aço-betão e betão-betão.

Dos vários ensaios descritos no capítulo anterior, foram realizados, para estudo da aderência aço-betão, o ensaio de arrancamento directo (“pull-out test”), e o ensaio “slant shear”, para análise da aderência betão-betão.

### 4.2. CARACTERIZAÇÃO DO BAC

#### 4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS, COMPOSIÇÃO E PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

Em seguida, apresentam-se os materiais utilizados no presente estudo bem como as suas características/propriedades principais. Refira-se que a maior parte das propriedades foi indicada pelos fornecedores.

##### 4.2.1.1. Cimento

Neste estudo foi utilizado cimento CEM I 42.5 R fornecido pela SECIL e produzido na fábrica do Outão. Na Tabela 4.1. apresentam-se os resultados do controlo estatístico fornecido pela SECIL.

Tabela 4.1.: Caracterização do Cimento (valores típicos)

<b>Ensaio Químico</b>	
SiO <sub>2</sub>	19,82%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,22%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,40%
CaO total	62,66%
MgO	2,21%
SO <sub>3</sub>	3,47%
Perda ao fogo	3,0%
Cloretos	0,03 %
Cal livre	1,28%
Resíduo insolúvel	1,10%
<b>Ensaio Físico</b>	
Massa volúmica	3010 kg/m <sup>3</sup>
Superfície específica (Blaine)	4112 kg/m <sup>3</sup>
Resíduo 45 µm	2,0%
Água na pasta normal	28,70%
Tempo início de presa	127 min
Tempo fim de presa	162 min
Expansibilidade	0,70 mm
<b>Ensaio Mecânico</b>	
Resistência à flexão 2 dias	6,10 MPa
Resistência à flexão 7 dias	7,80 MPa
Resistência à flexão 28 dias	8,90 MPa
Resistência à compressão 2 dias	33,40 MPa
Resistência à compressão 7 dias	46,60 MPa
Resistência à compressão 28 dias	58,10 MPa

## 4.2.1.2. Fíler Calcário

Como adição mineral utilizou-se filer calcário BETOCARB P1 – OU, da Comital. Na Tabela 4.2. apresentam-se as características deste material, segundo a ficha técnica deste produto, fornecida pela Comital.

Tabela 4.2.: Caracterização do Fíler Calcário

<b>Ensaio Químico</b>	
CaCO <sub>3</sub>	99%
MgCO <sub>3</sub>	0,30%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02%
Insolúveis em HCl	0,20%
Sulfatos solúveis em ácido	< 0,05%
Cloretos	< 0,001%
Enxofre total	< 0,04%
<b>Ensaio Físico</b>	
Massa volúmica	2680 kg/m <sup>3</sup>
Densidade aparente	900 kg/m <sup>3</sup>
Teor de humidade	0,10%
Azul de metileno	0,06 g/100 g
Partículas < 2 mm	100%
Partículas < 125 µm	99%
Partículas < 63 µm	85%

## 4.2.1.3. Agregados

## 4.2.1.3.1. Areia Fina

Usou-se uma areia fina natural, proveniente das dunas de Ovar. Na Tabela 4.3. apresenta-se a distribuição granulométrica (análise realizada no LABEST) e na Tabela 4.4. apresentam-se as restantes características da areia fina (fornecidas pelo produtor).

Tabela 4.3.: Curva Granulométrica da Areia Fina

Abertura Malha (mm)	Massa Retida (g)	Retidos %	Retidos Acumulados %	Passados Acumulados %
2	0	0	0	100
1	3	1	1	99
0,5	103	23	24	76
0,25	277	62	85	15
0,125	61	14	99	1
0,063	4	1	100	0
Resto	0	0	100	0

Tabela 4.4: Caracterização da Areia Fina

Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2630
Absorção (%)	0,2
Baridade não compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1599
Baridade compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1690

## 4.2.1.3.2. Areia Média

Usou-se uma areia média natural, proveniente do rio Tejo.

Na Tabela 4.5. apresentam-se as características da areia média (fornecidas pelo produtor) e na Tabela 4.6. apresenta-se a distribuição granulométrica (análise realizada no LABEST).

Tabela 4.5.: Caracterização da Areia Média

Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2620
Absorção (%)	0,4
Baridade não compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1533
Baridade compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1638

Tabela 4.6.: Curva Granulométrica da Areia Média

Abertura Malha (mm)	Massa Retida (g)	Retidos %	Retidos Acumulados %	Passados Acumulados %
8	0	0	0	100
4	12	1	1	99
2	165	17	19	91
1	348	37	55	45
0,5	330	35	90	10
0,25	74	8	98	2
0,125	14	1	99	1
0,063	7	1	100	0
Resto	1	0	100	0

## 4.2.1.3.3. Brita

Usou-se uma brita calcária lavada proveniente de Leiria.

Na Tabela 4.7. apresenta-se a distribuição granulométrica (análise realizada no LABEST) e na Tabela 4.8. apresentam-se as restantes características da brita (fornecidas pelo produtor).

Tabela 4.7.: Curva Granulométrica da Brita

Abertura Malha (mm)	Massa Retida (g)	Retidos %	Retidos Acumulados %	Passados Acumulados %
16	0	0	0	100
8	453	39	39	61
4	686	59	97	3
2	29	2	100	0
1	3	0	100	0
Resto	0	0	100	0

Tabela 4.8.: Caracterização da Brita

Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2680
Absorção (%)	1,4
Baridade não compactada (kg/m <sup>3</sup> )	-
Baridade compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1380

#### 4.2.1.4. Adjuvantes

Neste trabalho foi usado o superplastificante Viscocrete 3006 da Sika.

As propriedades deste adjuvante podem ser facilmente consultadas na ficha técnica do fornecedor.

Contudo, apresenta-se na Tabela 4.9. as informações mais relevantes.

Tabela 4.9.: Propriedades do Superplastificante

Designação	Viscocrete 3006
Base	Policarboxilatos modificados
Aspecto	Líquido levemente amarelado
Peso específico	1,05 ± 0,02 kg/dm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	18,0 + 1,8%
PH	4,5 ± 1,0
Teor de cloretos	< 0,1%
Dosagem recomendada	1,0% a 2,0% sobre o peso do cimento



Figura 4.1.: Materiais utilizados

## 4.2.2. COMPOSIÇÃO DO BAC

A Tabela 4.10. apresenta a composição do betão auto-compactável utilizado neste estudo.

Tabela 4.10: Composição do Betão Auto-Compactável (kg/m<sup>3</sup>)

BAC	kg/m <sup>3</sup>
Cimento (CEM I 42,5 R)	400
Fíler calcário (Comital)	180
Superplastificante (Viscocrete 3006)	6
Brita	840
Areia fina	395
Areia média	395
Água total	160
Água 1 (1/4 agua total)	40
Água 2 (restante)	120

Nas várias amassaduras realizadas foi sempre utilizada uma betoneira com capacidade de 50 litros.

Adoptou-se o seguinte procedimento de amassadura: misturam-se os agregados (areia fina, areia média e brita) com  $\frac{1}{4}$  da água total da amassadura, durante 2,5 minutos. Aguarda-se em repouso 2,5 minutos para que se dê a absorção, e misturam-se o cimento, as adições (fíler calcário) e os adjuvantes (superplastificante) com a restante água ( $\frac{3}{4}$  da água total da amassadura), durante 5 minutos. Depois de descolar o material aderente às paredes e nas pás da betoneira, com a ajuda de uma colher, reinicia-se a mistura durante mais 3 minutos.



Figura 4.2.: Amassadura

#### 4.2.3. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Para avaliar as propriedades do BAC no estado fresco realizaram-se três ensaios específicos, nomeadamente, os ensaios de espalhamento, do funil-V e da caixa- L, ilustrados nas Figuras 4.3., 4.4. e 4.5., respectivamente. Estes ensaios foram conduzidos de acordo com os procedimentos descritos na secção 2.4. Os resultados dos ensaios obtidos em cada um dos ensaios são apresentados na Tabela 4.11. Estes resultados demonstram que a composição utilizada satisfaz todas as exigências da auto-compactabilidade.



Figura 4.3.: Ensaio de espalhamento



Figura 4.4.: Ensaio caixa em L





Figura 4.5.: Ensaio funil em V

Tabela 4.11.: Resultados obtidos nos ensaios do BAC no estado fresco

Ensaio Realizado	Parâmetro Medido	Resultado Obtido
Espalhamento	T50 (s)	2,2
	Df (mm)	747,5
Caixa em L	H2/H1	0,8
Funil em V	Tv (s)	13,2

#### 4.2.4. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Para a realização do ensaio para a determinação do módulo de elasticidade e resistência à compressão simples, aos 28 dias, foram utilizados três provetes cilíndricos de BAC com um diâmetro de 0,15 m e altura de 30 cm.

No ensaio do módulo de elasticidade a medição das variações de comprimento foi realizada mediante a utilização de um dispositivo composto por dois anéis independentes que servem de suporte a três LVDT's colocados ao longo do perímetro do cilindro e situados no terço central do provete (ver Figura 4.6.). Após a realização do ensaio do módulo de elasticidade, cada um dos provetes foi carregado até à rotura, por compressão simples (ver Figura 4.7.). Na Tabela 4.12. apresentam-se os resultados obtidos para o módulo de elasticidade e resistência à compressão. A partir do valor médio da resistência à compressão, aos 28 dias, podemos concluir que o betão pertence à classe C60/75, cujo módulo de elasticidade médio esperado é de 39 GPa, de acordo com o Eurocódigo 2; este valor é da ordem de grandeza do valor obtido experimentalmente.



Figura 4.6.: Ensaio para determinação do módulo de elasticidade

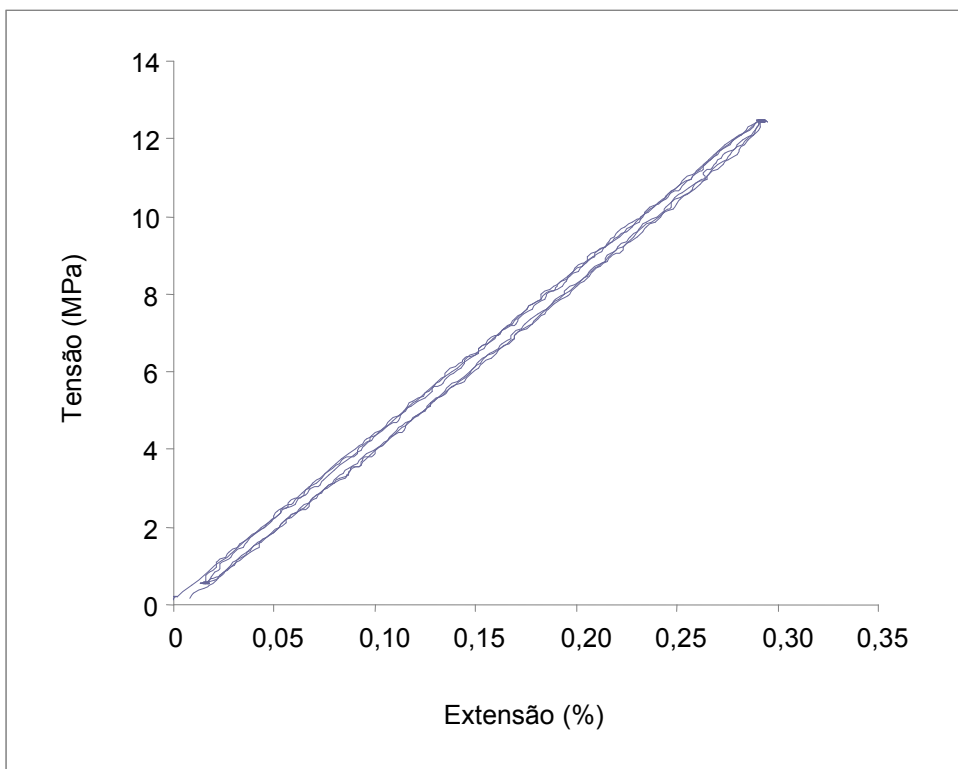


Figura 4.7.: Carregamento utilizado na determinação do módulo de elasticidade

Tabela 4.12.: Resultados do módulo de elasticidade e resistência à compressão

Provete	Massa (g)	$E_{ci}$ (GPa)	$E_{cm}$ (GPa)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	$\delta$ (%)
Cil 1	12442	42,9		1285,5	72,8			
Cil 2	12452	44,7	43,6	1361,0	77,0	76,0	2,8	3,7
Cil 3	12516	43,1		1378,8	78,1			

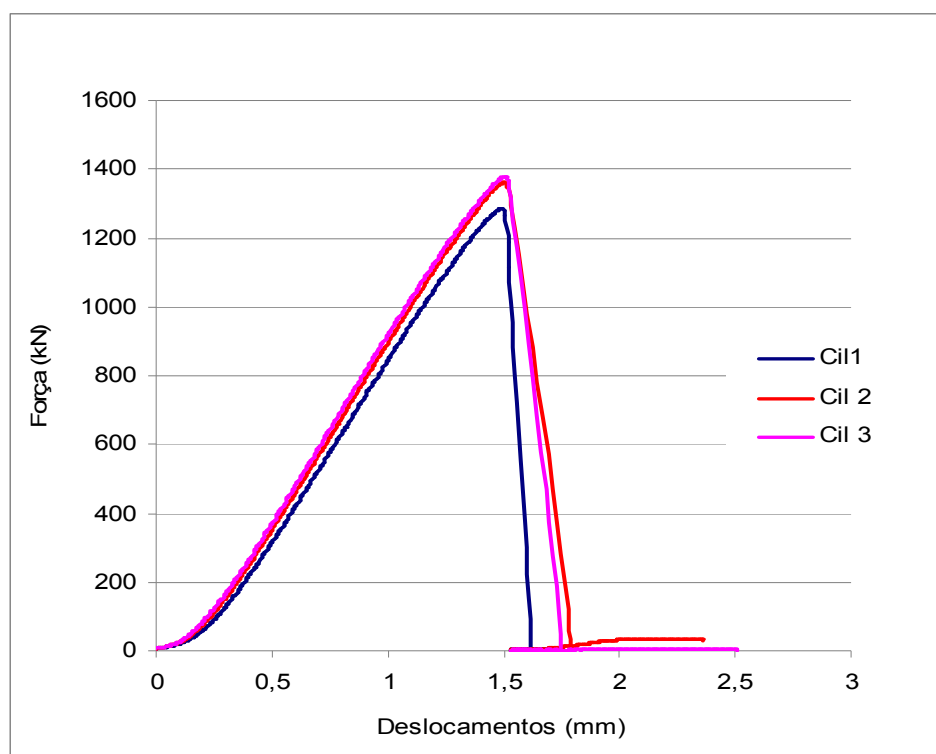


Figura 4.8.: Curvas de força - deslocamentos dos cilindros

### 4.3. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO CONVENCIONAL

A Tabela 4.13. apresenta a composição do betão convencional utilizado neste estudo, fornecido pela Betão Liz, S.A. – Centro de Produção da Senhora da Hora.

Tabela 4.13: Composição do Betão Convencional (kg/m<sup>3</sup>)

<b>C30/37.S2.XC2 (P). D22.CI0,4</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
Ligante	310
Cimento	260
Fíler	50
Areia M	600
Brita 0	340
Brita 1	350
Brita 2	600
Água	165
Plastificante	3,7
Razão A/L	0,5

Ligante: Mistura equivalente a cimento Portland de Calcário CEM II/B-L

Cimento: CEM II/A-L 42,5 R – Cimpor Souselas

Fíler: Fíler Calcário Micro 200 OU – Omya Comital Soure

Plastificante: Adjuvante Plastificante Sikament 400 Plus – Sika (0,5% a 1,4%)

Superplastificante: Adjuvante Superplastificante SikaPlast 626 (VP) – Sika (0,6% a 1,2%)



Figura 4.9.: Ensaio de abaixamento

Para a determinação da resistência à compressão do betão convencional utilizado foram moldados três cubos de 150x150x150 (mm) para ensaio aos 7 e 28 dias, cujos resultados se apresentam na Tabela 4.14..

Tabela 4.14: Resultados de ensaio à compressão - betão convencional

Cubo	Idade (dias)	Abaixamento (mm)	Secção (mm <sup>2</sup> )	Massa (kg)	Força (kN)	Tensão (MPa)
1	7	80	80	8,0	815,2	36,2
2	28	80	80	8,0	950,0	42,2
3	28	80	80	8,0	965,2	42,9

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

A Tabela 4.15. apresenta as características de forma e dimensão dos varões utilizados no presente estudo, nos ensaios da aderência aço-betão, fornecidos pela Megafer - Maia. Na Figura 4.10. e na Tabela 4.16. apresentam-se os resultados do ensaio à tracção de 2 amostras deste aço.

Tabela 4.15.: Características de forma e dimensão dos varões

A500 NR SD	
Diâmetro nominal (mm)	16
Secção nominal (mm <sup>2</sup> )	201
Peso nominal (kg/m)	1,58
Nervura transversal	
Afastamento entre nervuras (mm) – Valor nominal	9,6
Altura máxima das nervuras (mm) – Valor mínimo	1,04

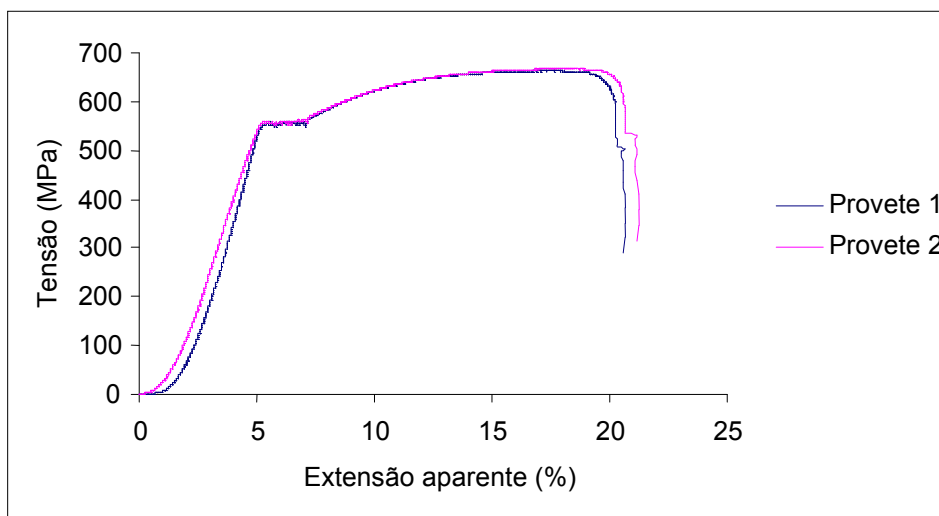


Figura 4.10.: Curva tensão - extensão aparente do ensaio do aço à tracção

Tabela 4.16.: Resultados do ensaio à tracção do aço

Provete	Ø (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	f <sub>su</sub> (MPa)	f <sub>sy</sub> (MPa)	E <sub>s</sub> (GPa)
1	15,5	188,7	662,1	555,5	200,1
2	15,4	187,4	666,6	556,6	197,9

## 4.5. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

### 4.5.1. ADERÊNCIA AÇO-BETÃO

Para a avaliação da tensão de aderência em função da posição das armaduras foram preparados os seguintes moldes:

- 3 moldes prismáticos de 200×150×150 (mm<sup>3</sup>) com o varão de aço colocado na posição horizontal e centrado na face do molde, de tal forma que o sentido de betonagem seja perpendicular ao sentido de arrancamento do varão;
- 3 moldes prismáticos de 150×150×200 (mm<sup>3</sup>) com o varão de aço na posição vertical e centrado na face do provete, de tal forma a que o sentido da betonagem coincida com o sentido de arrancamento da barra de aço; e
- 2 moldes prismáticos de 200×150×1200 (mm<sup>3</sup>) com 4 varões de aço dispostos na horizontal ao longo da altura da parede, de tal forma que o sentido de betonagem seja perpendicular ao sentido de arrancamento dos varões de aço (ver Figura 4.11.).

Este conjunto de moldes foi betonado com BAC e com betão convencional com o objectivo de comparar o comportamento da aderência aço-betão, nestes dois tipos de betão.

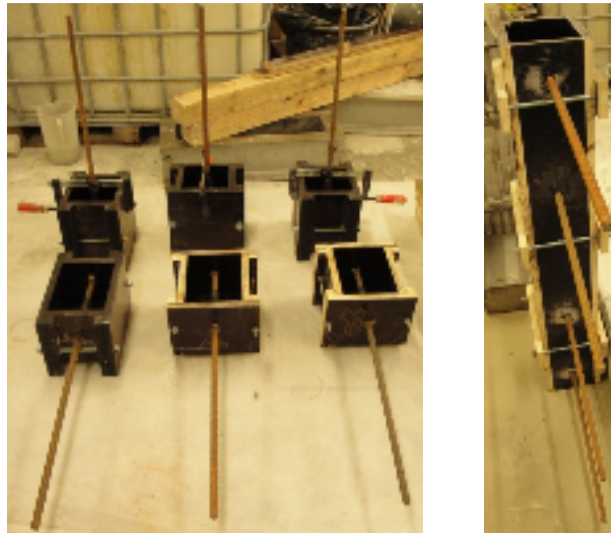


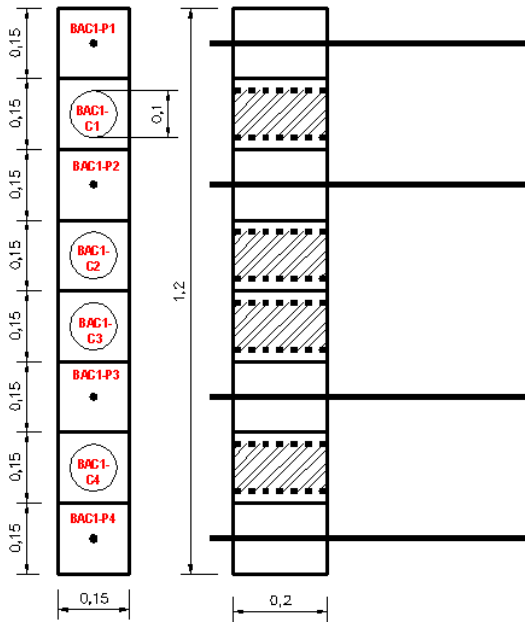
Figura 4.11.: Moldes dos provetes

Na Figura 4.13. está indicada a distribuição em altura dos provetes destinados aos ensaios de aderência assim como a localização e identificação das carotes ( $\varnothing=100$  mm) extraídas das mesmas paredes (ver Figura 4.12.), destinadas a avaliar a evolução da resistência à compressão do betão em altura. Para todos os provetes adoptou-se o mesmo diâmetro do varão ( $\varnothing_s=16$  mm) e um comprimento de aderência correspondente a  $5 \times \varnothing_s$ , ou seja, 8cm. Tal como se pode observar na Figura 4.14., este comprimento foi assegurado isolando com uma manga plástica lisa a parte restante do varão que fica embebida no betão, de modo a impedir totalmente o desenvolvimento da aderência nessa zona.

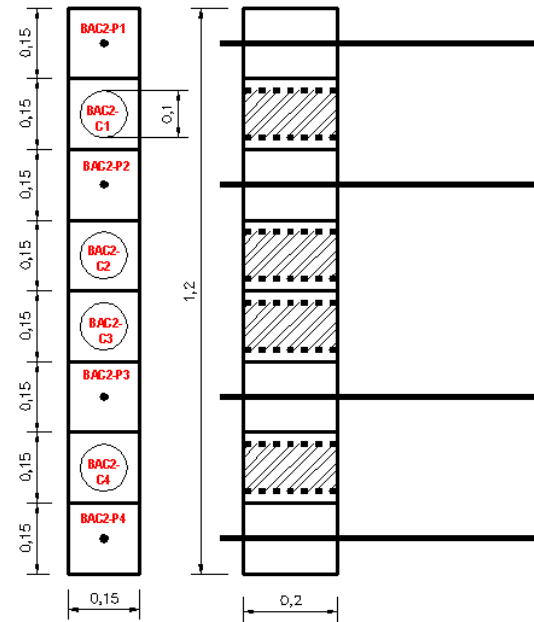


Figura 4.12.: Extração de carotes das paredes

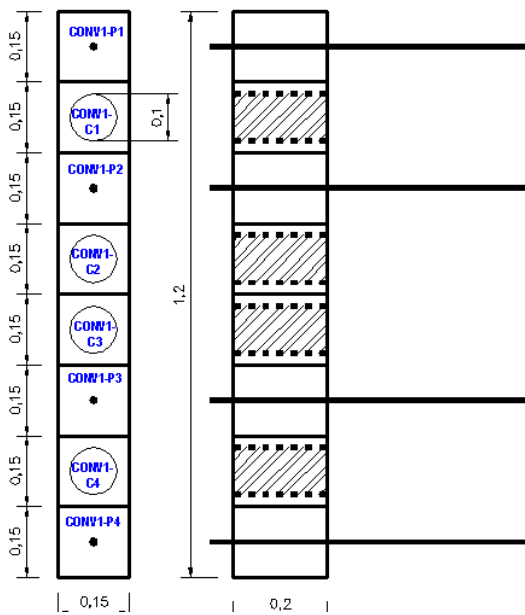
**Betão auto-compactável - Parede 1**



**Betão auto-compactável - Parede 2**



**Betão convencional - Parede 1**



**Betão convencional - Parede 2**

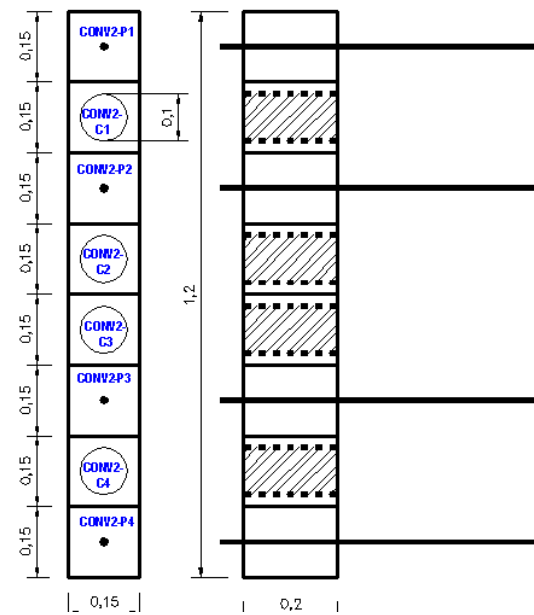


Figura 4.13.: Identificação e localização dos provetes retirados das paredes



Figura 4.14.: Aspecto do varão inserido no interior do provete de betão. Zona isolada com manga plástica



Após a betonagem os moldes foram cobertos com um plástico até serem descofrados, após 24 horas, e em seguida, foram mantidos numa câmara húmida (temperatura = 20°C; HR=95-98%) até à data do ensaio de arrancamento. Na figura 4.15. é possível observar o aspecto dos provetes de betão convencional, depois de descofrados.

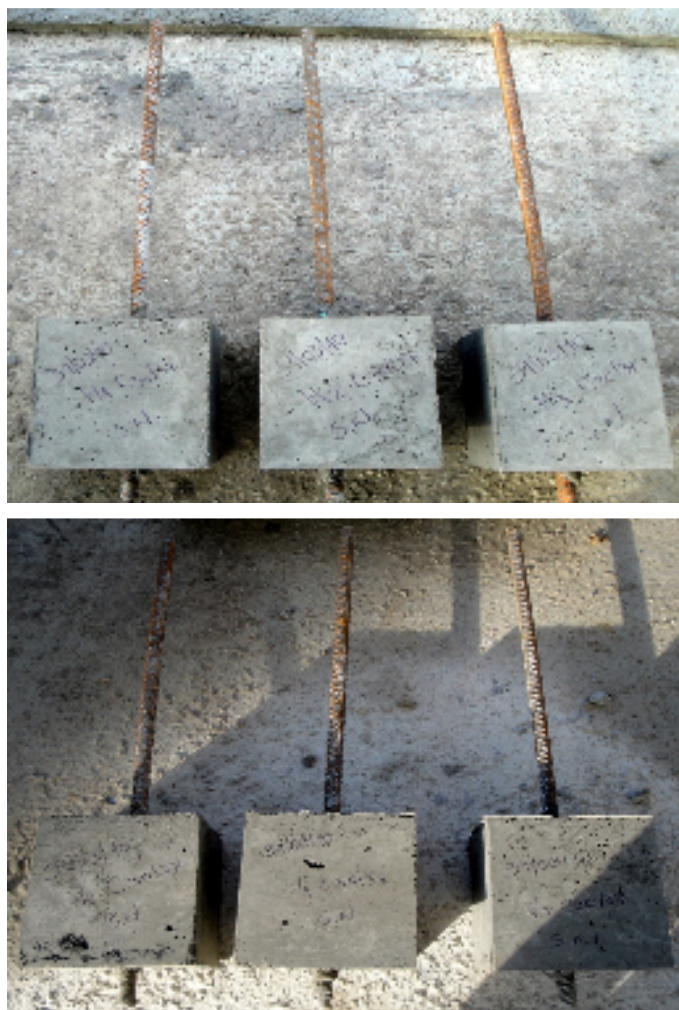


Figura 4.15.: Provetes de betão convencional

A tensão de aderência do betão à armadura depende da resistência mecânica do mesmo.

#### 4.5.2. ADERÊNCIA BETÃO - BETÃO

Tendo por objectivo analisar a qualidade da aderência entre BAC's correspondentes a diferentes fases de betonagem, foram moldados três conjuntos de seis prismas de 100x100x400 (mm<sup>3</sup>), em duas fases, com diferentes intervalos entre elas. Os moldes foram colocados numa posição inclinada de modo a formar uma junta de cerca de 30° com a vertical.

Outro conjunto de três prismas de 100x100x400 (mm<sup>3</sup>), foi cheio de uma só vez, colocado na vertical, para servir de referência.

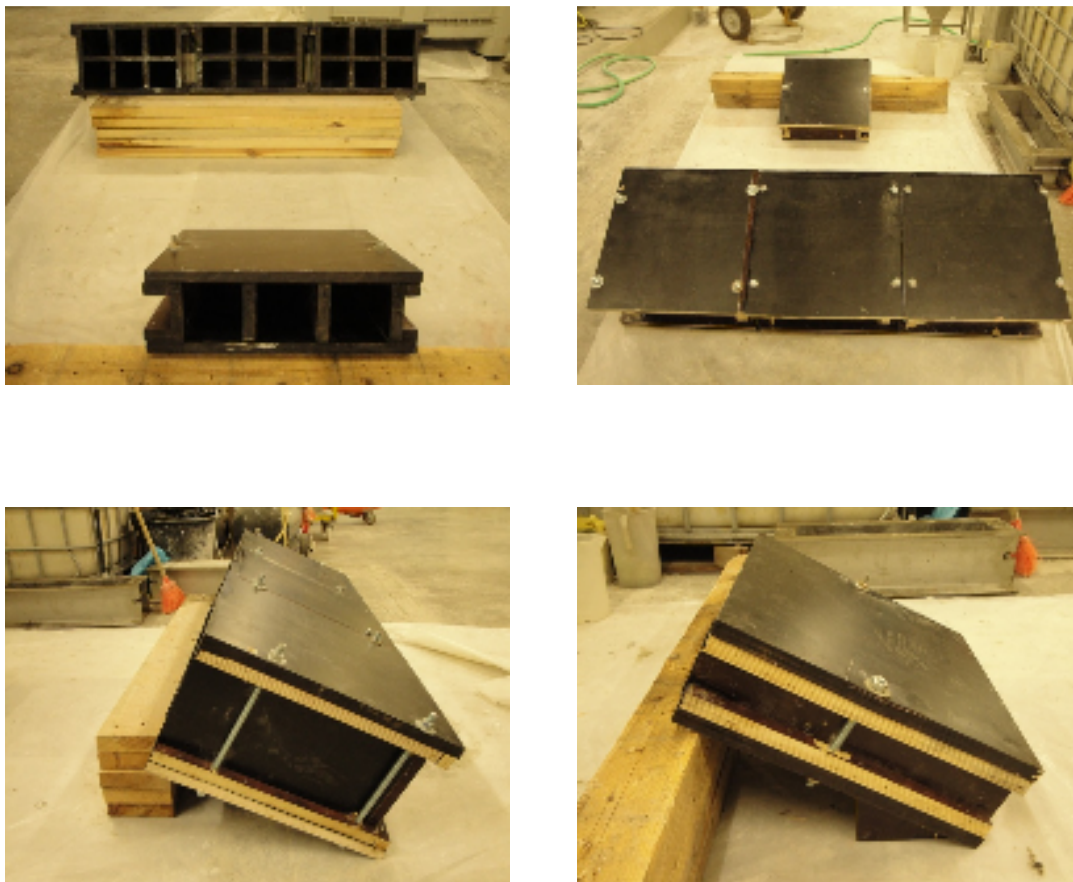


Figura 4.16.: Posicionamento dos moldes dos prismas de modo a formar uma junta inclinada

Após a betonagem os moldes ficaram cobertos com um plástico até serem descofrados 24 horas depois, e armazenados em câmara húmida até à data do ensaio de “slant shear”.

Na Tabela 4.17. descreve-se o procedimento adoptado na betonagem dos prismas:

Tabela 4.17.: Procedimento adoptado na betonagem dos prismas

Tempo (minutos)	Fases de betonagem
0	Imediatamente após a 1ª amassadura foi betonada metade de cada um dos prismas inclinados (2 litros/prisma)
45	45 minutos após a 1ª amassadura, encheu-se completamente os prismas do molde 1, colocado na vertical
90	90 minutos após a 1ª amassadura, completou-se a betonagem dos prismas inclinados do molde 2, colocando-o na vertical
120	120 minutos após a 1ª amassadura, completou-se a betonagem dos prismas do molde 3
135	135 minutos após a 1ª amassadura, completou-se a betonagem dos prismas inclinados do molde 4, colocando-o na vertical
180	180 minutos após a 1ª amassadura, completou-se a betonagem dos prismas do molde 5
210	210 minutos após a 1ª amassadura, completou-se a betonagem dos prismas inclinados do molde 6, colocando-o na vertical
240	240 minutos após a 1ª amassadura, completou-se a betonagem dos prismas do molde 7

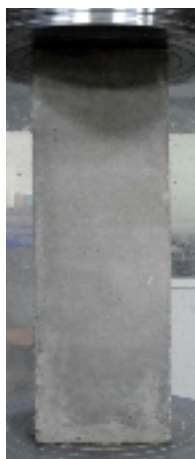


Figura 4.17.: Aspecto final de um prisma betonado de uma só vez

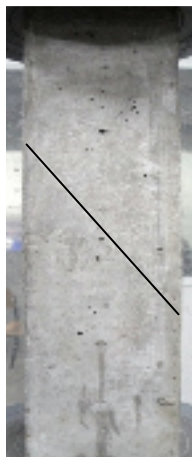


Figura 4.18.: Aspecto final de um prisma betonado em duas fases

Molde 1	P1 45 min	P2 45 min	P3 45 min
Molde 2	P1 90 min	P2 90 min	P3 90 min
Molde 3	P1 120 min	P2 120 min	P3 120 min
Molde 4	P1 135 min	P2 135 min	P3 135 min
Molde 5	P1 180 min	P2 180 min	P3 180 min
Molde 6	P1 210 min	P2 210 min	P3 210 min
Molde 7	P1 240 min	P2 240 min	P3 240 min

Figura 4.19.: Identificação dos moldes

## 4.6. ENSAIOS REALIZADOS/ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 4.6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS CAROTES

Tal como mencionado anteriormente foram extraídas carotes ao longo da altura das paredes para avaliar a resistência do betão ao longo da altura dessas paredes betonadas quer com BAC quer com betão convencional. Depois de rectificadas, as carotes foram ensaiadas à compressão simples utilizando a prensa hidráulica da série 315 MTS, disponível no Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural da FEUP. Os ensaios foram levados a cabo com controlo de deslocamentos, impondo-se uma velocidade constante de 0.02 mm/s (ver Figura 4.20.). Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 4.18. e as respectivas curvas força - deslocamento nas Figuras 4.21. e 4.22.. As composições de BAC e betão convencional utilizadas pertencem a classes de resistência bem distintas. Os resultados obtidos nas carotes de BAC confirmam que este betão pertence à classe C60/75 enquanto os resultados obtidos com as carotes de betão convencional levam-nos a concluir que este pertence aproximadamente à classe C20/25. De destacar também, as diferenças em termos das curvas força - deslocamento obtidas para cada um dos betões. Nas Figuras 4.21. e 4.22. é bem visível o comportamento mais dúctil do betão convencional face ao BAC, como seria de esperar atendendo às diferentes classes de betão. Da análise dos resultados da Tabela 4.18. e da Figura 4.23., nos valores referentes ao BAC, verifica-se uma variação significativa da resistência à compressão em altura.



Figura 4.20.: Ensaio à compressão simples de carotes

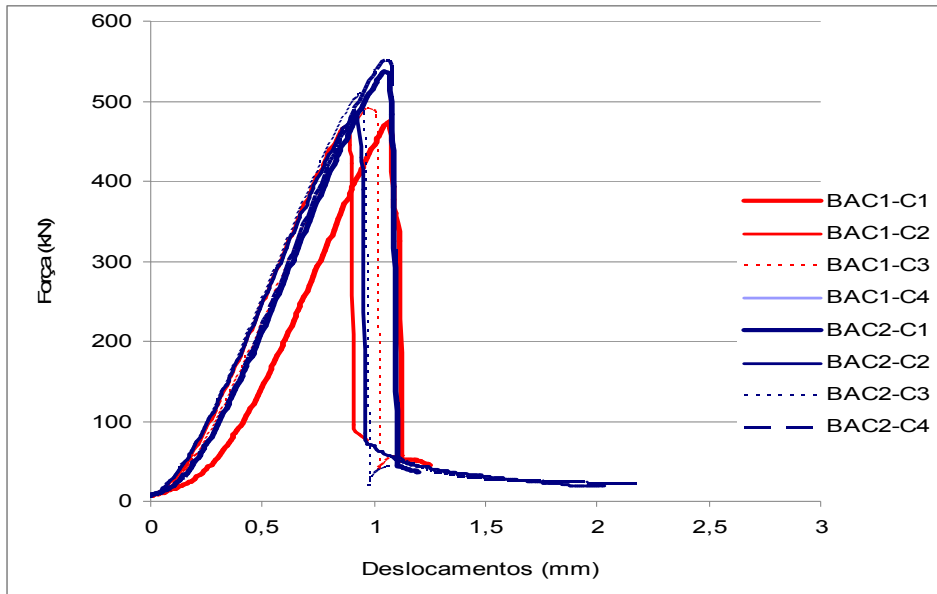


Figura 4.21.: Ensaio à compressão – carotes BAC

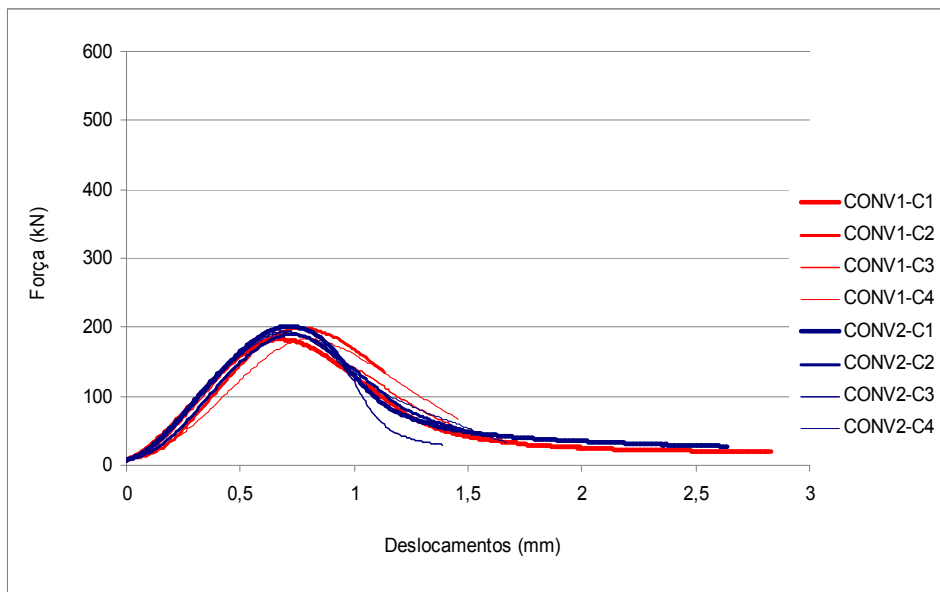


Figura 4.22.: Ensaio à compressão – carotes betão convencional

Tabela 4.18.: Resultados de ensaio à compressão das carotes

Provete	Massa (g)	$F_{max}$ (kN)	$f_c$ (MPa)	L (mm)	$\varnothing$ (mm)	$L/\varnothing$	$f_{cm}$ (MPa)	Desvio (MPa)	$\delta$ (%)
BAC1-C1	3200	475,10	68,13	194	94,23	2,06			
BAC1-C2	3126	468,05	67,53	191	93,94	2,03			
BAC1-C3	3214	490,98	71,16	195	93,73	2,08			
BAC1-C4	3195	521,08	74,87	195	94,13	2,07			
BAC2-C1	3211	537,13	76,91	195	94,30	2,07	72,53	4,10	5,6
BAC2-C2	3174	486,04	69,55	195	94,33	2,07			
BAC2-C3	3158	509,65	73,53	193	93,94	2,05			
BAC2-C4	3236	551,76	78,59	195	94,54	2,06			
CONV1-C1	3136	182,38	26,33	192	93,91	2,04			
CONV1-C2	3062	198,83	28,75	190	93,83	2,02			
CONV1-C3	3051	190,62	27,32	189	94,25	2,00			
CONV1-C4	3131	183,02	26,36	184	94,02	1,96			
CONV2-C1	3108	201,60	29,07	191	93,96	2,03	27,41	0,94	3,4
CONV2-C2	3073	189,30	27,34	191	93,89	2,03			
CONV2-C3	3000	193,66	27,92	185	93,97	1,97			
CONV2-C4	3064	191,90	27,53	191	94,2	2,03			

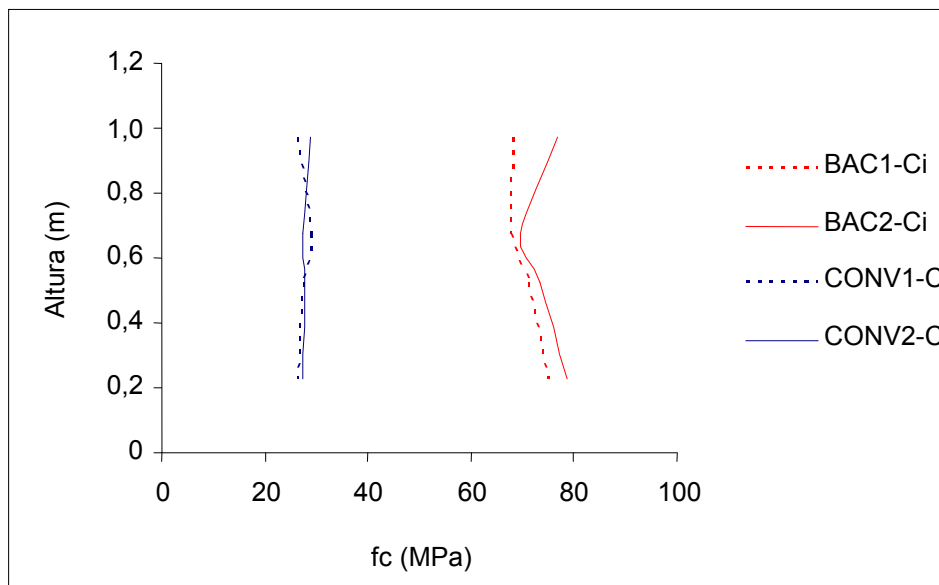


Figura 4.23.: Variação da resistência do betão com a altura

#### 4.6.2. ADERÊNCIA AÇO - BETÃO

O comportamento da aderência aço-betão nos diversos provetes descritos anteriormente foi avaliado através do ensaio de arrancamento directo. Para este ensaio utilizou-se uma prensa servo comandada da Instron com 300 kN de capacidade máxima que permitiu aplicar uma força de tracção crescente numa das extremidades do varão, a uma velocidade constante de 0,125 kN/s até se observar um escorregamento significativo do varão. O esquema de ensaio utilizado está ilustrado na Figura 4.24.. Na extremidade do varão onde não foi aplicada carga colocou-se um transdutor de deslocamentos que permitiu registar o deslocamento relativo do varão face ao provete de betão. Desta forma foi possível obter a curva força vs. deslocamento relativo entre o varão de aço e o betão.





Figura 4.24.: Esquema do ensaio de arrancamento directo (pull-out test)

Na Figura 4.25. apresenta-se o aspecto interior de um dos provetes após o ensaio de arrancamento directo. Nestas imagens é possível distinguir claramente a zona da manga plástica, onde se observou uma superfície perfeitamente lisa o que comprovou que nesta zona não se desenvolveu nenhuma aderência, e uma zona de betão esmagado localmente que corresponde à zona onde houve ligação aço-betão. Desta forma, através da observação do interior dos provetes no final do ensaio foi possível verificar o comprimento efectivo de aderência, ou seja, verificar se houve algum desvio no posicionamento dos varões durante a betonagem que tenha originado um aumento ou diminuição do comprimento de aderência.

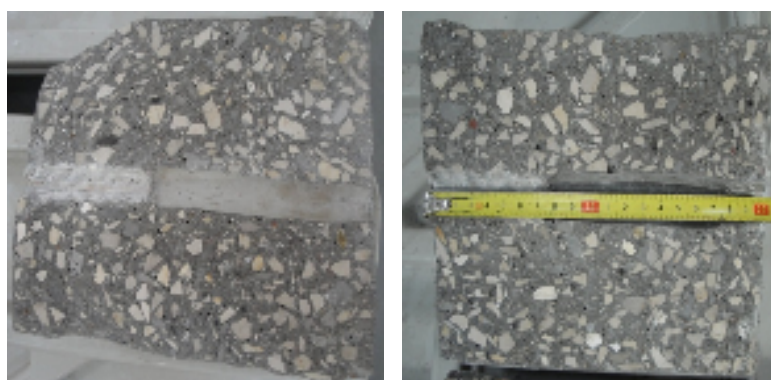


Figura 4.25.: Aspecto da superfície de aderência

Na Tabela 4.19. indica-se os comprimentos de aderência medidos após o final do ensaio; de facto, em alguns casos houve um ligeiro desvio relativamente ao comprimento pretendido. Na mesma tabela indica-se os valores da força máxima obtida durante o ensaio, para cada um dos provetes. A partir do

conhecimento da força máxima ( $F_{max}$ ), do comprimento de aderência ( $L$ ) e do diâmetro do varão ( $\phi_s$ ) foi possível determinar o valor da tensão média de aderência ( $\tau$ ), recorrendo à expressão 4.1.:

$$\tau = \frac{F_{max}}{\pi \times \phi_s \times L} \quad (4.1.)$$

O valor da tensão de aderência obtido para cada um dos provetes ensaiados está indicado na Tabela 4.19..

Com base nos valores da Tabela 4.19. foi elaborada a Figura 4.26., onde é possível observar a variação da tensão de aderência com a altura de betonagem e também a variação em função do posicionamento da barra de aço em relação ao sentido de betonagem.

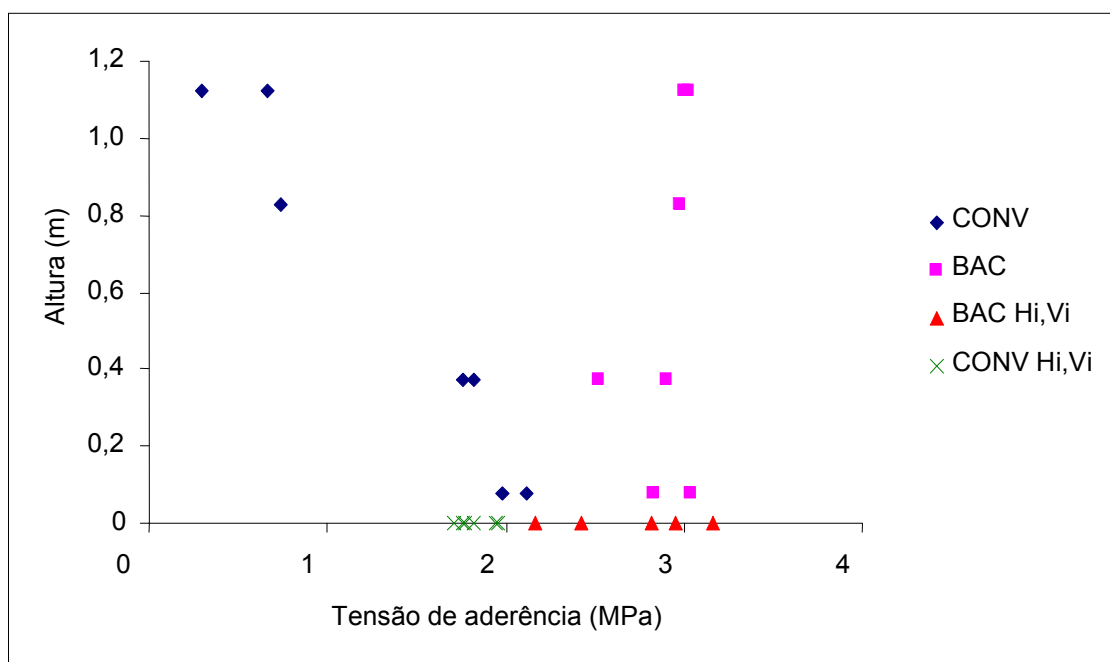


Figura 4.26.: Variação da tensão de aderência com a altura

Do conjunto de resultados obtidos (ver Tabela 4.19. e Figura 4.26) constata-se o seguinte:

- No betão convencional há uma grande dispersão da tensão de aderência, diminuindo em função da altura de queda do betão;
- No BAC a tensão de aderência praticamente não varia com a variação das alturas de betonagem;
- Nos casos dos provetes com armadura na horizontal ou na vertical, praticamente não há variação da tensão de aderência, embora sejam mais uniformes no caso da armadura perpendicular ao sentido de betonagem;
- No BAC as tensões de aderência são mais elevadas para os casos de armaduras horizontais, enquanto que no betão convencional não há diferenças.

Tabela 4.19.: Resultados dos ensaios de arrancamento directo

Provete	L (cm)	Ø (cm)	F <sub>max</sub> (kN)	τ (MPa)	f <sub>c</sub> (MPa)	τ/f <sub>c</sub>
BAC1-P1	8,0	16	121,6	3,0	75	0,04
BAC1-P2	8,5	16	127,3	3,0	75	0,04
BAC1-P3	8,0	16	101,2	2,5	75	0,03
BAC1-P4	7,7	16	109,3	2,8	75	0,04
BAC2-P1	8,0	16	120,7	3,0	75	0,04
BAC2-P2	*	*	*	*	*	*
BAC2-P3	8,0	16	116,9	2,9	75	0,04
BAC2-P4	8,0	16	122,5	3,0	75	0,04
BAC-V1	8,0	16	118,9	3,0	75	0,04
BAC-V2	7,0	16	76,3	2,2	75	0,03
BAC-V3	8,0	16	97,7	2,4	75	0,03
BAC-H1	**	**	**	**	**	**
BAC-H2	8,0	16	107,5	3,2	75	0,04
BAC-H3	7,6	16	127,1	2,8	75	0,04
CONV1-P1	8,0	16	26,7	0,7	27	0,02
CONV1-P2	*	*	*	*	*	*
CONV1-P3	9,0	16	82,4	1,8	27	0,07
CONV1-P4	8,4	16	83,7	2,0	27	0,07
CONV2-P1	8,0	16	11,9	0,3	27	0,01
CONV2-P2	8,0	16	29,9	0,7	27	0,03
CONV2-P3	8,0	16	70,9	1,8	27	0,07
CONV2-P4	8,0	16	85,2	2,1	27	0,08
CONV-V1	8,0	16	70,6	1,7	27	0,06
CONV-V2	8,0	16	78,9	2,0	27	0,07
CONV-V3	8,0	16	78,1	1,9	27	0,07
CONV-H1	8,0	16	68,9	1,7	27	0,06
CONV-H2	8,0	16	73,2	1,8	27	0,07
CONV-H3	8,0	16	71,2	1,8	27	0,07

\* - Ensaio interrompido

\*\* - Provete não ensaiado/varão inclinado

As Figuras 4.27., 4.28., 4.30. e 4.31. apresentam as curvas da variação do deslocamento relativo entre a barra de aço e a superfície livre do betão, ao longo da aplicação da força de arrancamento.

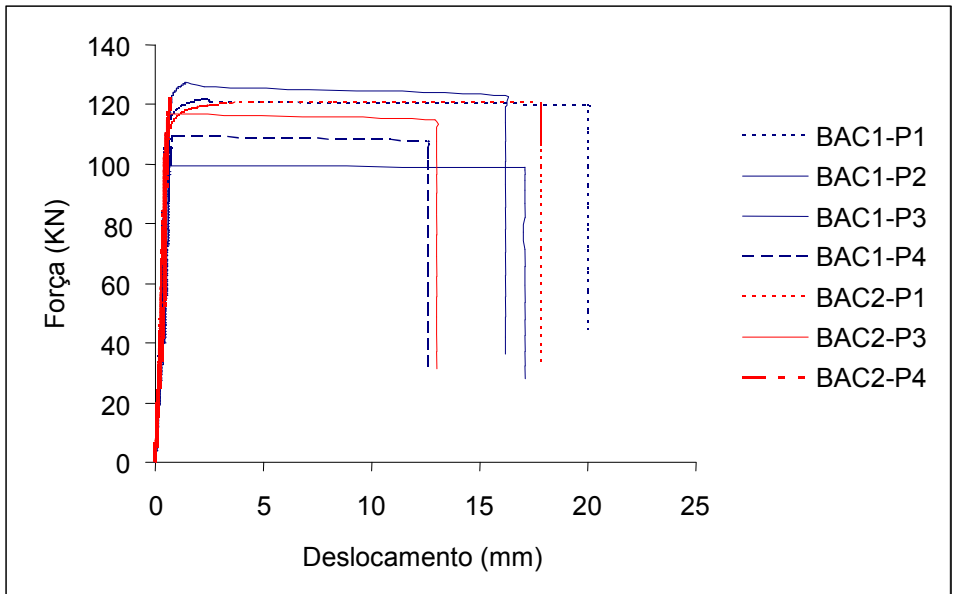


Figura 4.27.: Curvas força - deslocamento relativo entre barra de aço e o BAC

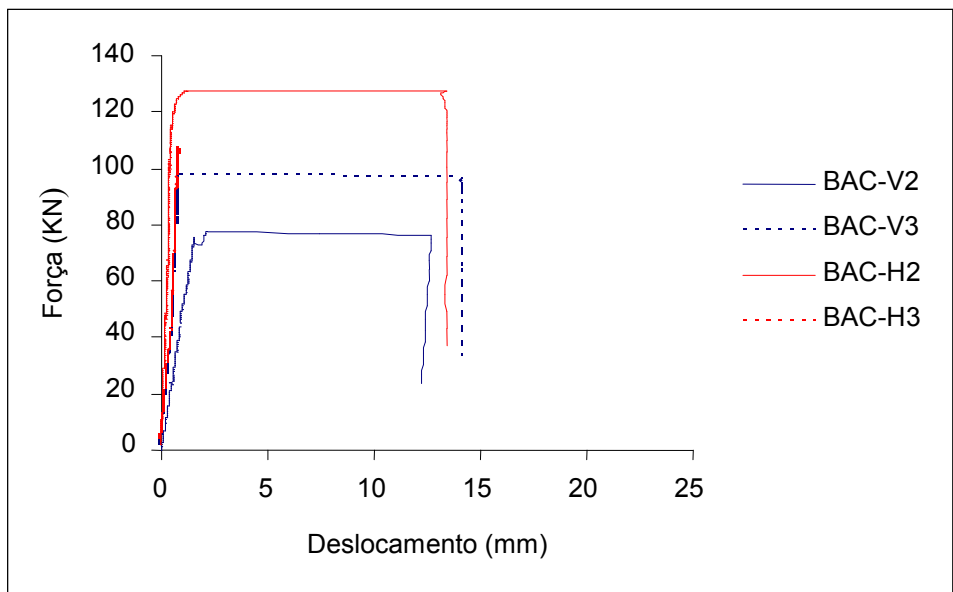


Figura 4.28.: Curvas força - deslocamento relativo entre barra de aço e o BAC

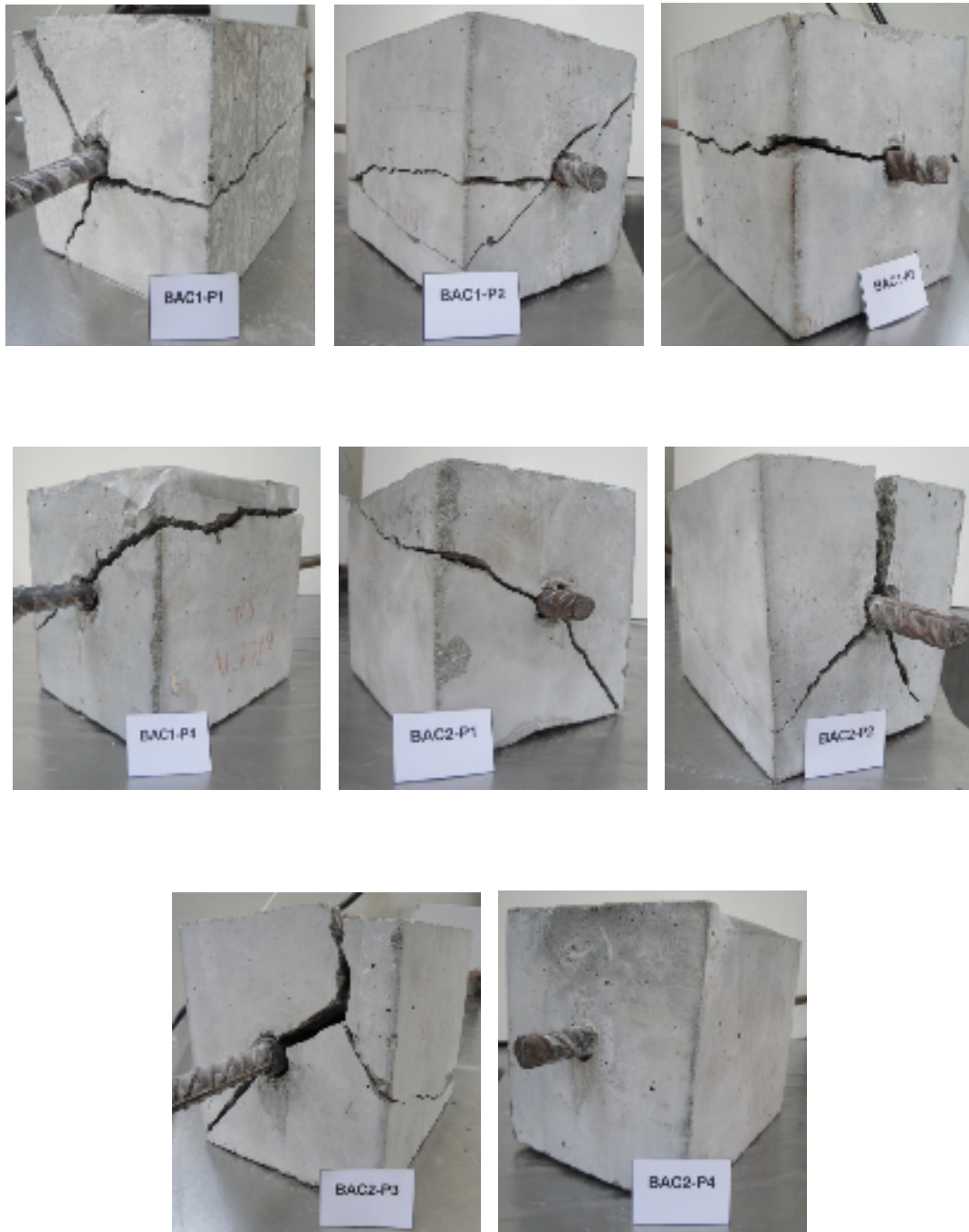


Figura 4.29.: Modos de rotura dos provetes de BAC

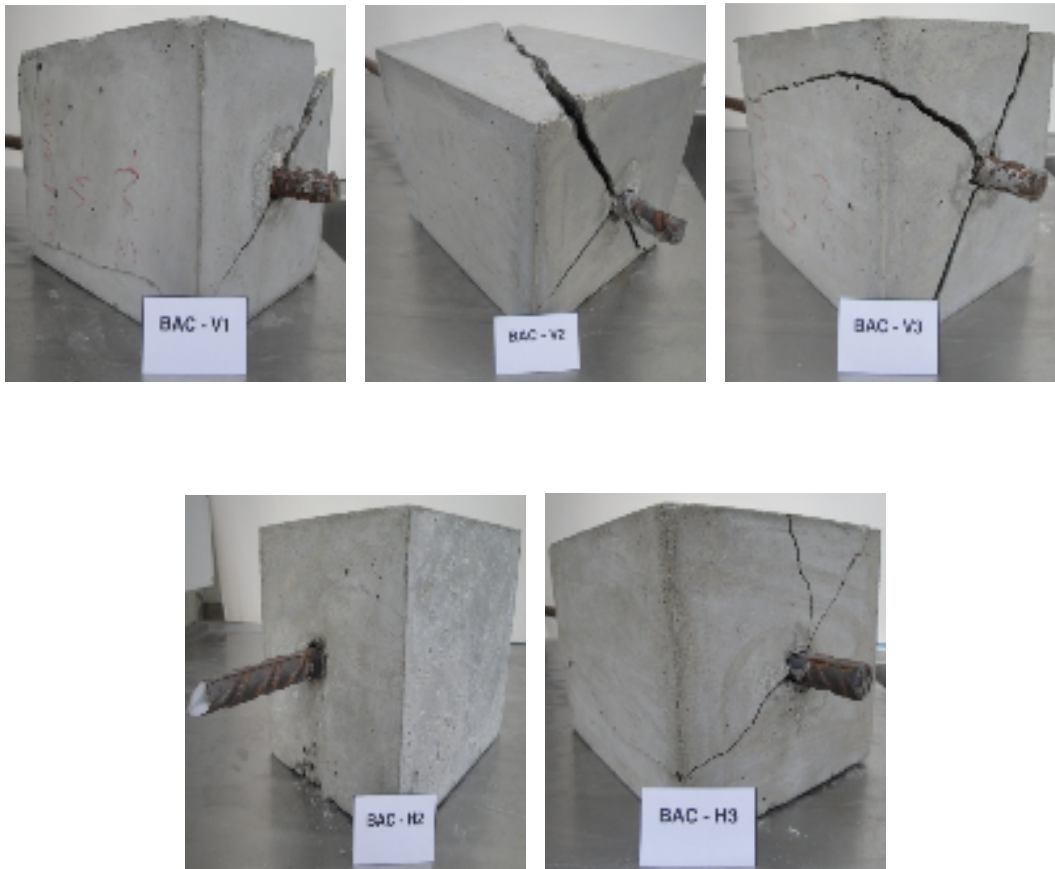


Figura 4.29. (continuação): Modos de rotura dos provetes de BAC

Analisando o modo de rotura dos provetes ensaiados (ver Figura 4.29.) constata-se que no caso do BAC, em geral, a fendilhação ocorre sempre do mesmo modo, atravessando o provete em três partes, excepto no caso do provete BAC-H2 que rompeu primeiro o varão.

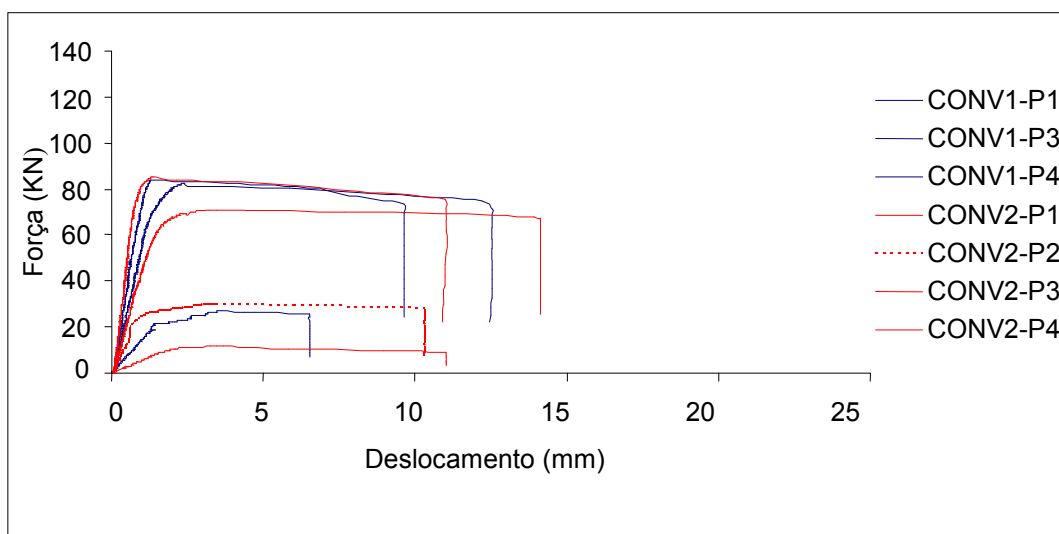


Figura 4.30.: Curvas força - deslocamento relativo entre barra de aço e betão convencional

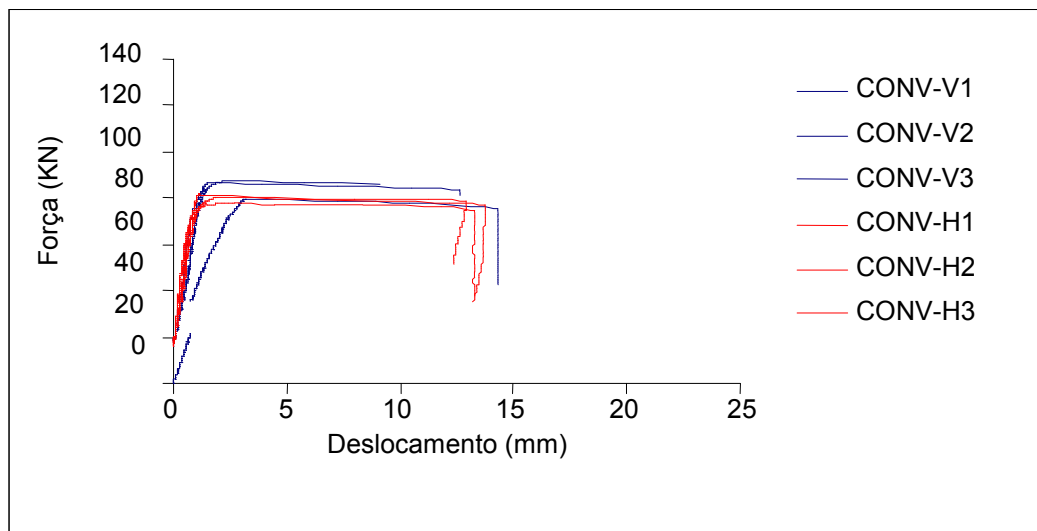


Figura 4.31.: Curvas força - deslocamento relativo entre barra de aço e betão convencional



Figura 4.32.: Modos de rotura dos provetes de betão convencional

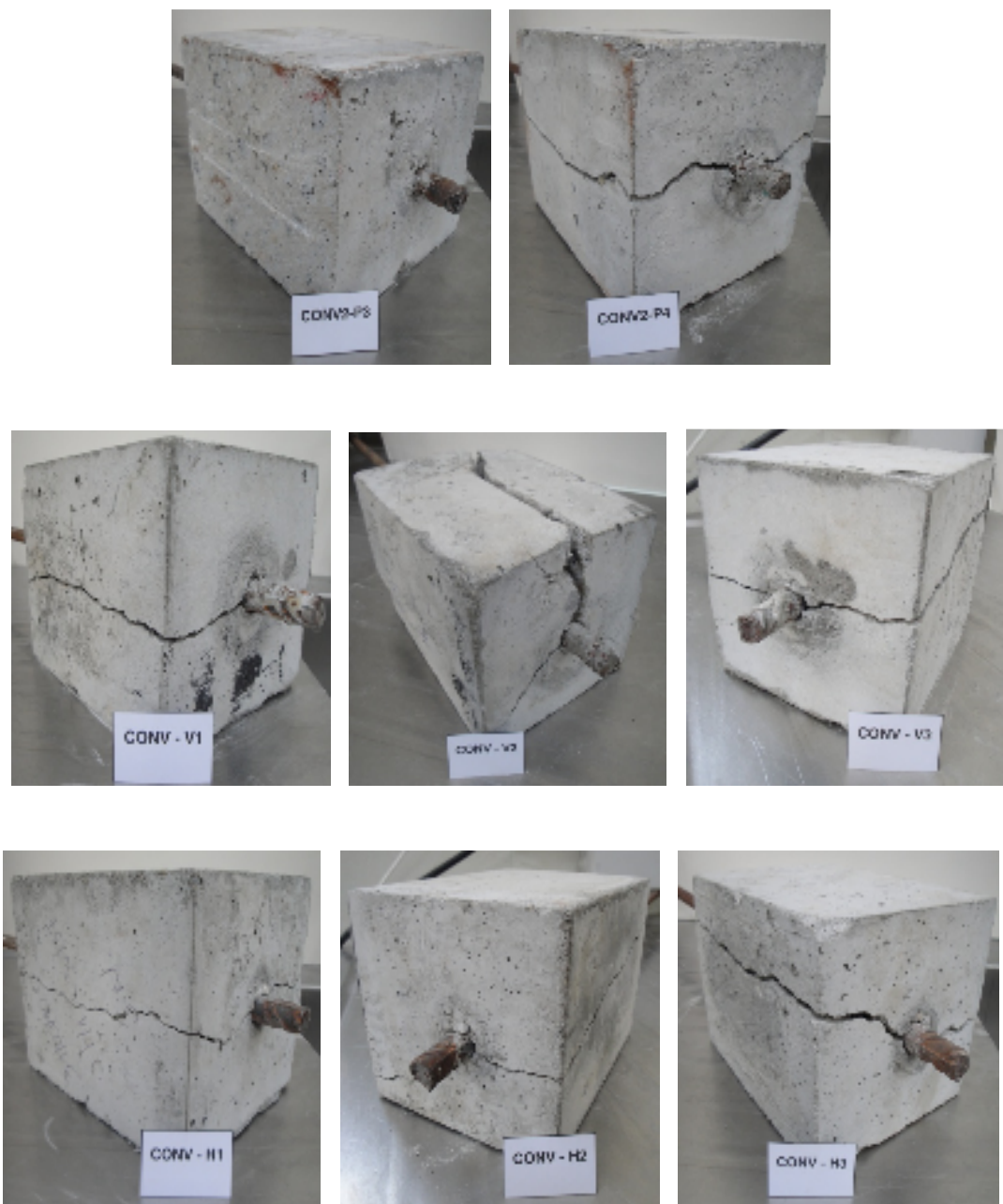


Figura 4.32. (continuação): Modos de rotura dos provetes de betão convencional

Analisando o modo de rotura dos provetes ensaiados (ver Figura 4.32.) constata-se que no caso do betão convencional, em geral, a fendilhação atravessa transversalmente todo o provete, excepto nas secções superiores das paredes (P1 e P2) que, por terem menor aderência, permitiram o escorregamento do varão, não ocorrendo portanto fendilhação.



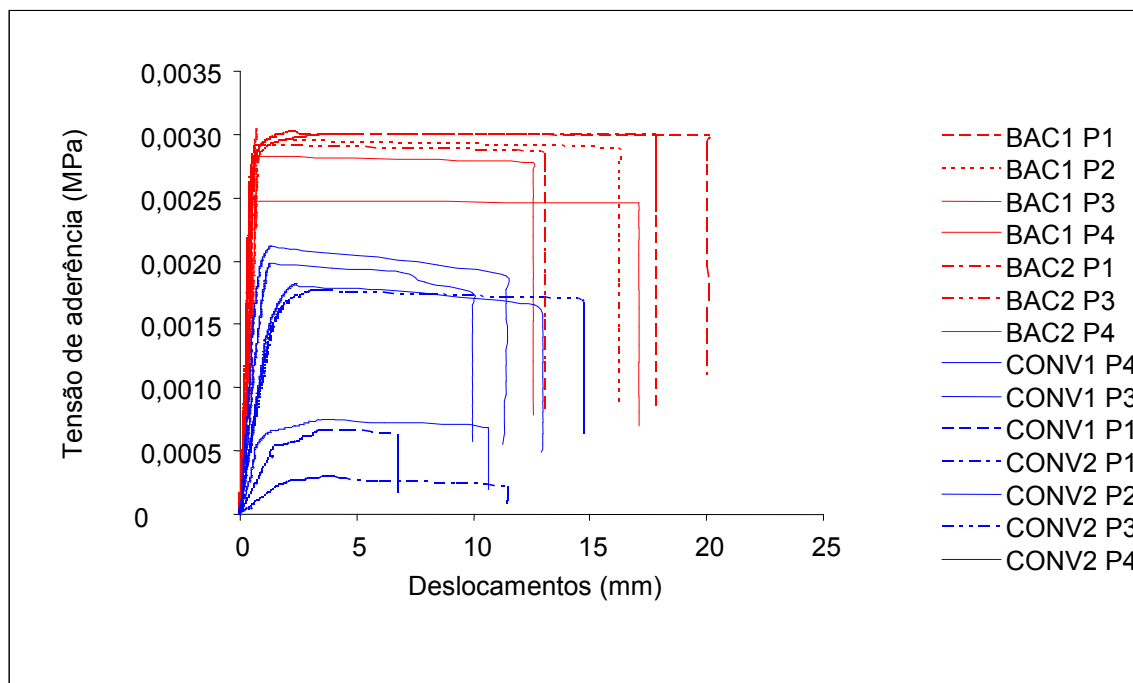


Figura 4.33.: Curvas tensão de aderência - deslocamentos para BAC e betão convencional

Na Tabela 4.20. apresentam-se os valores de cálculo da tensão de rotura da aderência,  $f_{bd}$ , segundo o Eurocódigo 2, considerando  $\eta_2 = 1$  para  $\varnothing \leq 32\text{mm}$ , e para  $h > 600\text{ mm}$ , os provetes a 300 mm da parte superior teriam condições de fraca aderência, ou seja, isto aplica-se aos provetes BAC1-P1, BAC2-P1, CONV1-P1 e CONV2-P1.

Tabela 4.20.: Cálculo da tensão de rotura da aderência segundo o EC2

Betão	Aderência	$\eta_1$	$f_{ctd}$ (MPa)	$f_{bd}$ (MPa)
BAC (C60/75)	Boa	1,0	2,07	4,66
	Fraca	0,7	2,07	3,26
CONV (C20/25)	Boa	1,0	1,00	2,25
	Fraca	0,7	1,00	1,57

A tensão de rotura da aderência obtida nos ensaios, para o BAC é da mesma ordem de grandeza da obtida segundo o EC2; No entanto, para o betão convencional a tensão obtida nos ensaios é muito inferior ao valor previsto pelo EC2 (ver Tabela 4.19.e Tabela 4.20).

## 4.6.3. ADERÊNCIA BETÃO - BETÃO

Todos os prismas foram submetidos ao ensaio de rotura por compressão simples, aos 28 dias, para verificar as diferenças no valor da carga máxima e no modo de rotura.

Na Tabela 4.21. apresenta-se os resultados obtidos nesse ensaio para os provetes do molde 1.

Tabela 4.21.: Resultados obtidos no ensaio de rotura por compressão simples

<b>Prismas</b>	<b>F<sub>máx</sub> (kN)</b>	<b>σ (MPa)</b>	<b>σ<sub>cm</sub> (MPa)</b>	<b>Desvio (MPa)</b>	<b>δ (%)</b>
Molde 1 45 min	P1	638,995	63,899		
	P2	657,153	65,715	66,196	2,572
	P3	689,747	68,975		3,885

Apresenta-se na tabela 4.22. os valores da tensão de aderência dada pela fórmula 4.2.:

$$\tau = F_{\max} \times \sqrt{\frac{3}{400000}} \quad (4.2.)$$

Tabela 4.22.: Valores tensão de aderência obtidos

<b>Prismas</b>	<b>F<sub>max</sub> (kN)</b>	<b>τ (MPa)</b>	
45 min	P1	638,995	27,669
	P2	657,153	28,456
	P3	689,747	29,867



Figura 4.34.: Modos de rotura dos provetes de BAC



Figura 4.34. (continuação): Modos de rotura dos provetes de BAC

Analisando o modo de rotura dos provetes de BAC ensaiados (ver Figura 4.34.) constata-se que houve deslizamento das duas peças praticamente pela junta de betonagem; e ocorrência de fissuração do betão quando sujeito a esforço de compressão.

O valor de cálculo da força de resistência na interface é dado pela fórmula 4.3.:

$$V_{rdi} = c \times f_{ctd} + \mu \times \sigma_n \quad (4.3.)$$

Considerando para uma superfície lisa (mais desfavorável)  $c=0,35$  e  $\mu=0,60$ .

Na Tabela 4.23. apresenta-se os valores da tensão de aderência obtidos nos ensaios para todos os moldes betonados.

Tabela 4.23.: Valores da tensão de aderência obtidos nos ensaios

PRISMA	45 min	90 min	120 min	135 min	180 min	210 min	240 min
1	27,7	18,6	29,3	14,1	13,6	25,3	29,1
2	28,5	17,4	21,9	23,6	17,8	23,5	21,8
3	29,9	16,3	18,2	11,3	14,2	23,0	26,3

Tabela 4.24.: Valores de  $\sigma_n$ 

PRISMA	45 min	90 min	120 min	135 min	180 min	210 min	240 min
1	16,0	10,7	16,9	8,2	7,8	14,6	16,8
2	16,4	10,1	12,6	13,6	10,3	13,6	12,6
3	17,2	9,4	10,5	6,5	8,2	13,3	15,2

Tabela 4.25.: Valores de  $V_{rdi}$ 

PRISMA	45 min	90 min	120 min	135 min	180 min	210 min	240 min
1	10,3	7,2	10,9	5,6	5,4	9,5	10,8
2	10,6	6,8	8,3	8,9	6,9	8,9	8,3
3	11,1	6,4	7,0	4,6	5,6	8,7	9,8

Os valores estimados para  $V_{rdi}$  (Fórmula 12.) apresentados na Tabela 4.25. são muito inferiores aos valores obtidos para a tensão de rotura da aderência (ver Tabela 4.22.).



# 5

## CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTA PARA INVESTIGAÇÕES FUTURAS

### 5.1. CONCLUSÕES FINAIS

O presente trabalho relata um estudo do comportamento da aderência de um varão de aço nervurado inserido no betão auto-compactável e no betão convencional, quando colocado em diferentes posições relativamente ao sentido da betonagem. Para além disto, estudou-se o efeito do atraso entre fases de betonagem na qualidade da ligação entre as camadas de betão e a respectiva influência na tensão de aderência betão-betão neste tipo de juntas.

Após a revisão bibliográfica e em função da análise dos resultados obtidos no programa experimental, destacam-se as seguintes conclusões:

- As classes de resistência do BAC e do betão convencional resultaram muito distintas, ou seja, o BAC pertencia à classe C60/75 e o betão convencional pertencia aproximadamente à classe C20/25;
- O betão convencional apresentou um comportamento mais dúctil comparativamente ao BAC, para o mesmo deslocamento a resistência à compressão é muito mais baixa;
- Relativamente ao comportamento de aderência aço-betão, a tensão de aderência nas paredes betonadas com BAC praticamente não variou em altura; já para o betão convencional, a tensão de aderência diminuiu significativamente com a da altura de peça, ou seja, observou-se que a tensão de aderência é menor na parte superior da parede do que na parte inferior;
- Quanto aos provetes com o varão colocado na posição horizontal versus na posição vertical relativamente ao sentido de betonagem, tanto para o BAC como para o betão convencional, a tensão de aderência apresentou valores sensivelmente da mesma ordem de grandeza;
- Os provetes de BAC apresentaram, praticamente todos, o mesmo modo de rotura (com fendas que atravessam o provete dividindo-o em três partes) independentemente da posição em altura do provete na parede e da posição do varão relativamente ao sentido de betonagem;
- No que respeita aos provetes de betão convencional o modo de rotura foi também, em geral, do mesmo tipo (1 fenda que atravessou o provete dividindo-o em 2 partes), com excepção dos provetes da parte superior das paredes;
- Nos provetes de betão convencional da parte superior das paredes a rotura deu-se por escorregamento do varão, associado a uma redução da tensão de aderência;

- A tensão de aderência obtida nos ensaios com o BAC foi da mesma ordem de grandeza do valor de cálculo da tensão de aderência calculada de acordo com o Eurocódigo 2, no entanto, para o betão convencional foi muito inferior em todas as camadas;
- Relativamente à aderência betão-betão não se observou uma tendência clara de evolução da tensão de aderência com o tempo de espera entre betonagens sucessivas, no entanto, verificou-se que pode haver uma redução significativa da tensão de aderência no contacto entre camadas de BAC, betonadas em fases distintas;
- Os valores da tensão na interface do BAC obtidos experimentalmente resultaram muito mais elevados do que os estimados pela expressão do Eurocódigo 2.

## 5.2. PROPOSTA PARA INVESTIGAÇÕES FUTURAS

Como proposta de continuidade desta investigação devem ser realizados outros estudos para caracterizar melhor o comportamento da aderência aço-betão, nomeadamente,

- Diversificar nos diâmetros dos varões de armadura utilizados;
- Desenvolver novos métodos de avaliação da tensão de aderência;
- Investigar o efeito da deterioração da superfície do aço no comportamento da aderência.

No que diz respeito à aderência betão-betão sugerem-se para estudos futuros:

- Avaliar a influência da homogeneidade e da concentração de agregados na superfície de contacto entre camadas distintas na aderência de juntas frias no BAC;
- Estudar diversos tipos de rugosidade nas superfícies de contacto;
- Analisar a influência do tratamento das superfícies de betões auto-compactáveis no comportamento da aderência.



## BIBLIOGRAFIA

- ACHE (1990). *Código modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural*, Madrid.
- ACI Comité 237R-07. *Self-compacting Concrete*.
- ACI Comité 318-5 (2005). *Building code requirements for reinforced concrete*, American Concrete Institute, Detroit.
- ACI Committee 408 (1991). *Abstract of: state of the art report: bond under cyclic loads*. American Concrete Institute Materials Journal, volume 88, nº6.
- ACM Centre (2005). *Measurement of properties of fresh self-compacting concrete*. Final report (EU Project G6RD-CT-2001-00580, Testing-SCC), Technical report, University of Paisley.
- AFGC (2000). *Bétons auto-plaçants: recommandations provisoires*, Association Française de Génie Civil.
- Aitcin, P. (1998). *High-performance concrete*, London and New York, E & FN SPON.
- Alcântara, M. (2001). *Le béton auto-plaçant armé*. Dissertação de Doutorado, INSA Toulouse.
- Alcântara, M. et al. (2004). *Avaliação da influência da posição da armadura no desenvolvimento das tensões de aderência na interface entre o concreto auto-adensável e a armadura*. 46º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON), volume 5 - Pré-Fabricados em Concreto, Trabalho CBC0165, Agosto de 2004, Florianópolis, Brasil.
- Almeida Filho, F.M. (2006). *Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concreto auto-adensável*. Dissertação de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Al-Ostaz, A. et al. (2010). *Deterioration of bond integrity between repair material and concrete due to thermal and mechanical incompatibilities*, ASCE.
- Ambrosie, J.; Pera, J. (2001). *Propriedades del concreto autonivelante, construcción y tecnología*. Instituto Mexicano del Cemento y de Concreto, A.C..
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1982). *NBR 7477: Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armadura de concreto armado*, São Paulo.
- ASTM C1583-04 (2004). *Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method)*
- Austin, S. et al.. *Tensile bond testing of concrete repairs*.
- Barbosa, M. et al.. *Concreto auto-adensável: avaliação da aderência aço-concreto através dos ensaios de determinação do coeficiente de conformação superficial das barras de aço* (IBRACON), volume 2 - Construções em concreto, Trabalho CBC0167, Brasil.
- Barbosa, M. T. G. (2002). *Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Bartos, P. J. M.; Grauers, M. (1999) *Self-compacting concrete*. Concrete, volume 33, nº4.

Behfarnia, K. et al. (2005). *The bond between repair materials and concrete substrate in marine environment*. Asian Journal of civil Engineering, volume 6.

Bernabeu (2000). *Final report of task 7: form system and surface quality, rational production and improved working environment through using self-compacting concrete*, Brite Euram project BRPR-CT96-0366.

BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, and ERMCO (2005). *The european guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use*.

BS EN 12615:1999. *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – test methods – determination of slant shear strength*.

BSI, BS:1881 (1983). *Testing concrete: part 120 – method for determination of compressive strength of concrete cores*. British Standards Institution, Londres.

Caetano, L. (2008). *Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e altas temperaturas*. Dissertação de Mestrado, PPGEC/Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CEN. Testing fresh concrete (DRAFT prEN 12350-8:2007: E): Part 8: Self-compacting concrete - slump-flow test.

CEN. Testing fresh concrete (DRAFT prEN 12350-9:2007: E): Part 9: Self-compacting concrete - V-funnel test.

CEN. Testing fresh concrete (DRAFT prEN 12350-10:2007: E): Part 10: Self-compacting concrete - L-box test.

CEN. Testing fresh concrete (DRAFT prEN 12350-11:2007: E): Part 11: Self-compacting concrete - sieve segregation test.

CEN. Testing fresh concrete (DRAFT prEN 12350-12:2007: E): Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test.

CEN. Concrete: (DRAFT prEN 206-9: 2007): Part 9: Additional rules for self-compacting concrete (SCC).

Comité Euro-International du Béton 151 (1982). *Bond action and bond behavior of reinforcement*. Bulletin d'information, Paris.

Comité Euro-International du Béton (1983). *Recommandation RC 5: Bond test reinforcement steel – beam test*. Concrete reinforcement technology, Georgi Publishing Company, Paris.

Comité Euro-International du Béton (1991). CEB – FIP Model Code 1990. Bulletin d'information, n° 204, Julho 1991, Paris.

Courard, L.. *Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products*.

Courard, L. (2006). *Durabilité des réparations de béton: entre théorie et pratique*, Toulouse, França.

Cuenca, E.; Serna, P. (2010). *Respuesta frente a cizallamiento en probetas tipo Z fabricadas com HACs de diferente estructura granular*. BAC2010 – 2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável, Julho 2010, Guimarães.

Daoud, A. et al. (2002). *Résistance à l'arrachement d'armatures ancrés dans du béton autoplaçant*. Materials and Structures.

- Daoud, A.; Lorrain, M. (2003). *Influence de la position des armatures sur l'adhérence des bétons autoplaçants: interprétation par analyse d'image*, Materials and Structures.
- Daoud, A. (2003). *Etude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton auto-plaçant – contribution à la modélisation numérique de l'interface*, Toulouse, França.
- David, J. (1999). *Betão auto-compactável: um material novo para a pré-fabricação*. 3<sup>as</sup> Jornadas de estruturas de betão, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Desnerck, P. et al. (2010). *Modelling of local bond stress-slip behaviour in self-compacting concrete*, Croácia.
- Devillers, P. et al. (2008). *Etudes des reprises de bétonnage de bétons autoplaçantes*. XXVIe Rencontres Universitaires de Génie civil, Junho 2008, Nancy, França.
- EFNARC (2002). *Especificaciones y directrices para el hormigón autocompactable – HAC*.
- EFNARC (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org). Fevereiro 2002.
- EFNARC (2005). *The european guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use*. [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org). Maio 2005.
- EHE - Instrucción del hormigón estructural (2008). *Anejo 21, Recomendaciones para hormigón autocompactante*.
- E. N. B. S. Júlio et al. (2004). *Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface*. Construction and Building Materials.
- EN 1992-1-1 (2004). Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- Esfahani M. R. et al. (2008). *Top-bar effect of steel bars in self-consolidating concrete (SCC)*. Cement Concrete Comp.
- França, V. H. (2004). *Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- Garbacz, A. et al. (2005). *On the effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems*. Magazine of Concrete Research.
- Gettu, R.; Agulló, L. (2003). *Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización*. Informe C4745/1 – Depart. de Ing. de la Construcción - Universidad Politécnica de Catalunya, Abril 2003.
- Giordano, L. et al. (2010). *Bond-slip in presence of cyclic actions*, Croácia.
- Gomes, P. C. C. (2002). *Diseno de hormigones autocompactables de alta resistencia. Procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización*. Hormigón Preparado, Janeiro 2002.
- Goodier, C. (2003). *Development of self-compacting concrete*. Structures & Buildings 156.
- Grunewald, S.; Bennenk, W. (2010). *The transfer of shear forces on the surface of self-compacting concrete*, Holanda.
- Hadiwidodo, Y.S., Mohd, S. (2008). *Review of Testing Methods for Self-compacting Concrete*. ICCBT.

- H. Figueiras. (2006). *Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável. Aferição das suas características mecânicas e durabilidade*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Isa, M. et al. (2004). *Aderência entre concreto auto-adensável de alta resistência e armadura*, São Paulo.
- JSCE (1998). *Recommendation for construction of self-compacting concrete*. In *International Workshop on SCC*, Japan Society of Civil Engineers, Agosto 1998, Japão.
- Jonhson W.; Rigueira V. (2007). *Estudio de la sensibilidad e influencia de la composición en las propiedades reológicas y mecânicas de los hormogones autocompactantes*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Politécnica de Valência.
- Kumar, P. (2006). *Self-compacting concrete: methods of testing and design*.
- Leonhardt, F. (1979). *Construções de concreto*". Interciência, 6v Rio de Janeiro.
- Lorrain, M.; Daud, A. (2002). *Bond in self-compacting concrete, proceedings bond in concrete from research to standards*, Novembro 2002, Budapeste.
- Molina, M. et al. (2004). *Influencia del diametro de la barra y del recubrimiento en las características adherentes del hormigón armado*. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio.
- Noguchi, T. e Mori, H. (1998). *State-of-the-art report: evaluation of fresh properties of self-compacting concrete in laboratory and on site*. International workshop on self-compacting concrete, Japão.
- NP EN 196-1 (2006). *Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*.
- NP EN 197-1 (2001). *Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*.
- NP EN 206 (1993). *Betão. Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*.
- NP EN 206-1 (2005). *Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*.
- NP EN 397 (1993). *Determinação do módulo de elasticidade em compressão*.
- NP EN 450-1 (2006). *Cinzas volantes para betão - Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*.
- NP EN 934-2 (2000). *Aditivos para betão*.
- NP EN 1008 (2003). *Água de amassadura para betão*.
- NP EN 12350-1 (2006). *Ensaio de betão fresco*.
- NP EN 12350-2 (2002). *Ensaio de betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento*.
- NP EN 12350-2 (2006). *Ensaio de betão fresco - Slump Test*.
- NP EN 12350-4 (2009). *Betão fresco - Determinação da consistência – Índice de compactabilidade*.
- NP EN 12390-3 (2003). *Ensaio de betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*.
- NP EN 12390-4 (2003). *Ensaio de betão endurecido - Parte 4: Resistência à compressão*.

- NP-EN 12390-6 (2003). *Ensaaios do betão endurecido - Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes*.
- NP EN 12504-1 (2003). *Ensaio do betão nas estruturas - Parte 1: Carotes. Extração, exame e ensaio à compressão*.
- NP EN 12620 (2004). *Agregados para betão*.
- NP EN 13263-2 (2005). *Sílica de fumo para betão*.
- Nunes, S. et al. (2000). *Betão auto-compactável (BAC): uma composição*. Encontro Nacional Betão Estrutural.
- Nunes, S. (2001). *Betão auto-compactável. Tecnologias e propriedades*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Nunes, S. et al. (2005). *Desenvolvimento de uma tecnologia robusta para o fabrico, transporte e aplicação do betão auto-compactável*. Relatório final do projecto de investigação BACPOR. Technical report, LABEST/FEUP, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto.
- Nunes, S. et al (2005). *Método para definição da composição de betão auto-compactável*, e-Mat.-Revista de ciência e tecnologia de materiais de construção, volume 2.
- Nunes, S. (2008). *Performance-based design of self-compacting concrete (SCC): a contribution to enhance SCC mixtures robustness*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Okamura, H.; Ozawa, K. (1995). *Mix design for self-compacting concrete*. Concrete Library of JSCE.
- Okamura, H.; Ozawa, K. (1996). *Self-compacting high performance concrete*. Structural Engineering International, nº4.
- Okamura, H. (1997). *Ferguson Lecture for 1996: Self-compacting high-performance concrete*. Concrete International, ACI, volume 19.
- Okamura, H.; Ouchi, M. (1999). *Self-compacting concrete. Development, present use and future*. First international RILEM symposium on self-compacting concrete, Suécia.
- Okamura, H. et al. (2000). *Self-compacting concrete*. Structural Concrete, Journal of fib, volume 1.
- Okamura, H. (2003). *Self-compacting concrete*. Journal of Advanced Concrete Technology, volume 1, nº5.
- Oliveira, M.; Almeida, E. (2007). *Betão auto-compactável (BAC)*, Universidade do Algarve, Escola Superior de Tecnologia, Faro.
- Parra, L.; Álava, H.. *Diseno de mezclas para hormigon autocompactante*, Escola Superior Politécnica del Litoral.
- Pereira de Oliveira, L. et al.. *Estudo de um caso de anomalias ocorridas num betão auto-compactável*.
- Ramezaniapour, A. et al. (2007). *Bond characterization between concrete substrate and repairing materials*. Journal of Technology & Education, volume 1.
- Reyes, F., Almeida Filho, F. et al. (2008). *Adherencia entre barras de acero y concretos autocompactantes y convencionales sometidos a cargamentos cíclicos y monotónicos*. Ciência & Engenharia, volume 17.

Rodríguez, M. (2005-2006). *Hormigón autocompactable*. Anales de Construcciones y Materiales Avanzados, volume 5.

Santos, P. M. D. (2005). *Influence of the surface roughness of the interface concrete/concrete in its longitudinal shear resistance*, Universidade de Coimbra.

Santos, P. et al. (2006). *Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface*. Construction and Building Materials.

Siad, H. et al. (2009). *Influence du type d'additions dans les betons autoplaçantes sur l'adherence beton-ancrage*, ENSET Oran, Algéria.

Skarendahl, A.; Petersson, O. (2000). *Self-compacting concrete*, state of the art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, RILEM Publications S.A.R.L., França.

Sonebi, M. et al. (2000). *Final report of task 4: properties of hardened concrete*, Brite Euram project BRPR-CT96-0366, Maio 2000.

Sonebi, M.; Bartos, P. J. M. (2002) *Bond behavior and pull-off test of self-compacting concrete*. Proceedings- Bond in concrete, Novembro de 2002, Budapeste.

Su, N. et al. (2001). *A simple mix design method for self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, nº31.

Torgal, F., Gomes, J., Jalali, S.. *Argamassas obtidas através da activação alcalina de lamas residuais de minas. Eficiência técnico-económica na reparação de elementos de betão*.

Torgal P. et al. (2006). *Bond strenght between concrete substrate and repair materials*, Turquia.

T. Sedran (1999). *Rheologie et rheometrie des bétons. Application aux bétons autonivelans*. Dissertação de Doutoramento, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Valcuende, M.; Parra, C. (2009). *Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes*. Construction and Building Materials.

Walraven, J. (2001). *State of the art on self-compacting concrete in the Netherlands, Proceedings of the second international symposium on self-compacting concrete*, Tóquio.

Walraven, J. (2003). *Structural aspects of self-compacting concrete*. 3<sup>rd</sup> International RILEM symposium on self-compacting concrete, Agosto 2003, Islândia.

Zhu, W. et al. (2004). *Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting concrete*. Materials and Structures.