



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# Propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido: Estado da arte

**Diogo Pereira Delgado**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil - Estruturas e Construção**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno

**Covilhã, Junho de 2011**



# Dedicatória

À minha família



# Agradecimentos

A realização desta dissertação é o resultado de vários meses de trabalho. Esta última etapa não teria sido possível se não fosse a grande contribuição de algumas pessoas. Quero, por isso, expressar-lhes o meu agradecimento:

Ao meu orientador, Professor Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno por ter aceite ser orientador da minha tese, toda a ajuda, exigência, conselhos e rigor, pois vasto é o seu conhecimento e domínio deste tema.

A todos os professores que contribuíram ao longo do meu processo de aprendizagem, pois tudo o que sou e todo conhecimento que adquiri, a eles lhes devo.

Aos meus amigos que estiveram comigo em todas as etapas da minha vida académica, pessoal, nos bons e nos maus momentos em que estiveram presentes, apoiando-me e dando toda a força necessária para continuar.

À minha família que sempre me apoiou em todo o sempre, especificamente aos meus pais, pois sem eles nada disto tinha sido possível. Permitiram-me e deram-me a possibilidade de estudar e a eles lhes devo tudo.

À minha namorada, Alexandra, por todo o apoio, ajuda, persistência no trabalho aqui desenvolvido, sempre com receio de que este não fosse entregue atempadamente. Esteve sempre presente e permaneceu para me “aturar”, motivar, apoiar, compreender e dar sentido a todo este trabalho, que encerra mais uma fase da minha vida. A ela, dedico especialmente esta tese.



# Resumo analítico

## Propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido:

### Estado da arte

O protótipo do betão auto-compactável surgiu no Japão na década de oitenta, por proposta do Professor Hajime Okamura, como forma de combater um défice de durabilidade em resultado de uma deficiente compactação do betão vibrado, decorrente do decréscimo na mão-de-obra especializada. As suas potencialidades já foram provadas pela sua grande aplicação por todo o mundo. No entanto, o conhecimento das suas propriedades no estado endurecido ainda não é completo. O conhecimento e previsão correctos das propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido permitem prevenir problemas futuros nas construções, bem como elevar ainda mais a sua potencialidade e aplicabilidade.

De forma a contribuir para um maior esclarecimento deste tema foi elaborada a presente dissertação, que contempla, numa primeira fase da revisão bibliográfica, uma comparação das propriedades no estado endurecido entre o betão auto-compactável, o betão corrente vibrado e o betão de alta resistência. Na segunda fase da revisão bibliográfica são ainda compilados e comparados entre si diferentes modelos de previsão das propriedades no estado endurecido do betão corrente vibrado e é avaliada a viabilidade de aplicação destes modelos ao betão auto-compactável, através da comparação dos valores obtidos com recurso a estes modelos e os valores experimentais obtidos em diferentes estudos recentes. As propriedades como a resistência à compressão, resistência a tracção, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, retracção e fluência são tratados nesta dissertação.

Comparados os valores de previsão dos códigos aplicados ao betão vibrado corrente com os valores experimentais obtidos no betão auto-compactável, concluiu-se que todos os códigos podem ser aplicados, no entanto, alguns são mais apropriados para a estimativa de determinadas propriedades que outros. Os modelos propostos pelo ACI são os que melhor se aproximam dos valores obtidos experimentalmente para a resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade e módulo de ruptura, enquanto os modelos do CEB-FIP 90 se adequam melhor à estimativa dos valores de retracção e de fluência.

### Palavras-chave:

Betão auto-compactável, propriedades no estado endurecido, resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, fluência, retracção, durabilidade.



# Abstract

## Hardened properties of self-compacting concrete: State-of-the-art

The prototype of self-compacting concrete has emerged in Japan in the eighties, proposed by Professor Hajime Okamura, as a way to combat lack of durability as a result of poor compaction of vibrated concrete due to the decrease of skilled labor. Its potentialities were proven by its wide application throughout the world. However the knowledge of its properties in the hardened state is not yet complete. Knowledge and correct prediction of the properties of self-compacting concrete in the hardened state allow prevent future problems in constructions as well as further increase its capability and applicability.

This dissertation has been prepared in order to contribute to a clarification of this issue, which includes, in a first phase of the literature review, a comparison of the hardened properties between the self-compacting concrete, the current vibrated concrete and the high-strength concrete. In the second phase of the literature review are also compiled and compared different prediction models of the hardened properties of the current vibrated concrete and the feasibility of applying these models to the self-compacting concrete is also evaluate by comparing the obtained values using these models and the gathered experimental values from different recent studies. The properties such as compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, modulus of rupture, shrinkage and creep are treated in this dissertation.

Compared the forecast values of the codes applied to vibrated concrete with current experimental values obtained for the self-compacting concrete it was concluded that all codes can be applied. Nevertheless, some of these are more suitable for prediction of some properties than others. ACI models are the best approach to the values experimentally obtained for compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity and modulus of rupture, whereas CEB-FIP 90 models are more congruous to predict values of shrinkage and creep.

### Keywords:

Self-compacting concrete, hardened properties, compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, modulus of rupture, creep, shrinkage, durability.



# Índice

	Pág.
<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	
1.1 - Enquadramento do tema .....	1
1.2 - Objectivo e justificação da dissertação .....	1
1.3 - Organização da dissertação .....	2
<b>Capítulo 2 - Desenvolvimento e aplicação do BAC</b>	
2.1 - Introdução .....	3
2.2 - Composição do BAC .....	3
2.3 - Métodos de obtenção .....	4
2.4 - Aplicações .....	10
2.5 - Conclusões .....	12
<b>Capítulo 3 - Propriedade do betão no estado endurecido</b>	
3.1 - Introdução .....	13
3.2 - Resistência à compressão .....	13
3.3 - Resistência à tracção .....	21
3.4 - Fadiga .....	24
3.5 - Módulo de elasticidade .....	28
3.6 - Fluência .....	32
3.7 - Retracção .....	36
3.8 - Durabilidade .....	41
3.9 - Conclusões .....	47
<b>Capítulo 4 - Modelos de previsão das propriedades do BAC no estado endurecido</b>	
4.1 - Introdução .....	49
4.2 - Estudo de Vilanova <i>et al.</i> .....	50
4.2.1 - Objectivos e descrição do estudo .....	50
4.2.2 - Modelos de referência .....	51
4.2.3 - Comparação dos modelos de referência .....	52

4.2.4 - Comparação entre os valores experimentais e os valores estimados através dos modelos de referência .....	57
4.2.5 - Síntese dos estudos de Vilanova <i>et al.</i> ....	62
4.3 - Estudo de Almeida <i>et al.</i> ....	63
4.3.1 - Objectivos e descrição do estudo .....	63
4.3.2 - Comparação dos modelos de referência .....	65
4.3.3 - Síntese dos estudos de Almeida <i>et al.</i> ....	67
4.4 - Estudo de Núñez <i>et al.</i> ....	68
4.4.1 - Objectivos e descrição do estudo .....	68
4.4.2 - Resultados obtidos .....	69
4.4.3 - Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de referência .....	73
4.4.4 - Síntese dos estudos de Núñez <i>et al.</i> ....	79
4.5 - Estudo de Leemann <i>et al.</i> ....	80
4.5.1 - Objectivos e descrição do estudo .....	80
4.5.2 - Análise da influência do tipo de cimento .....	82
4.5.3 - Síntese dos estudos de Leemann <i>et al.</i> ....	84
4.6 - Conclusões .....	84
<b>Capítulo 5 - Conclusões e propostas para trabalhos futuros</b>	
5.1 - Introdução .....	87
5.2 - Conclusões .....	87
5.3 - Propostas para trabalhos futuros .....	88
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>91</b>

# Índice de Figuras

	Pág.	
2.1	Diferenças entre a composição do BAC e do betão corrente vibrado	4
2.2	Método para alcançar um betão auto-compactável	4
2.3	Método geral proposto por Okamura et al	5
2.4	Representação esquemática do método proposto pela JSCE	6
2.5	Método de concepção da composição proposto pelo CBI	7
2.6	Fluxograma para o estudo da composição de betões auto-compactáveis	8
3.1	Variação da tensão de ruptura com o valor da relação A/C	14
3.2	Relação entre as tensões de ruptura de cubos com diferentes dimensões	14
3.3	Relação entre as tensões de ruptura de cilindros com diferentes dimensões (altura dupla do diâmetro)	15
3.4	Relação entre as tensões de ruptura de cubos com 15 cm de aresta e cilindros com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura	15
3.5	Variação da relação entre as tensões de ruptura aos 7 e aos 28 dias em função da razão A/C	16
3.6	Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão A/C tendo por base valores efectivos	19
3.7	Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão A/(materiais cimentícios) tendo por base valores efectivos	19
3.8	Relação R7/R28 para diferentes composições de BAC	20
3.9	Resistência à compressão em função da razão A/C	20
3.10	Influência da razão A/C na tensão de ruptura de tracção	21
3.11	Influência da natureza do agregado na tensão de ruptura de tracção	22
3.12	Resistências à tracção por compressão diametral experimentais e previstas no EC2	23
3.13	Tipos de cargas de fadiga	24
3.14	Curvas de Wöhler para o aço e para o betão	25
3.15	Influência da amplitude da tensão do ciclo de fadiga na resistência à fadiga	26

3.16	Diagrama de Goodman em valores absolutos das tensões aplicadas nos ensaios de fadiga	26
3.17	Diagrama de Goodman simples modificado	27
3.18	Varição relativa ao valor inicial dos diferentes módulos de elasticidade durante um ensaio de fadiga	27
3.19	Relação entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura de diferentes betões	28
3.20	Módulo de Elasticidade experimentais e previstos pelo EC2	31
3.21	Deformações do betão, instantâneas e em função do tempo	33
3.22	Influência da razão A/C na fluência do betão	33
3.23	Retracção da pasta de cimento e do betão nas primeiras 24 horas	37
3.24	Influência da dosagem de água na retracção do betão	38
3.25	Influência das dosagens de cimento na retracção do betão	39
3.26	Influência da humidade relativa na variação de dimensões do betão	39
3.27	Influência do meio de cura na variação da profundidade	43
3.28	Varição do coeficiente de permeabilidade do betão	44
3.29	Varição do coeficiente de permeabilidade da pasta de cimento com a dosagem de água	44
4.1	Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão das misturas da base de dados e dos diferentes modelos de cálculo	53
4.2	Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos vários modelos relativamente à melhor curva dos valores experimentais	53
4.3	Relação entre resistência à tracção indirecta e a resistência à compressão das misturas da base de dados e dos diferentes modelos de cálculo	54
4.4	Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tracção dos vários modelos relativamente à melhor curva dos valores experimentais	55
4.5	Relação entre o módulo de ruptura e a resistência à compressão das misturas da base de dados e dos diferentes modelos de cálculo	56
4.6	Relação entre a resistência à compressão e o módulo de ruptura dos vários modelos relativamente à melhor curva dos valores experimentais	56

4.7	Relação entre o módulo de elasticidade dos valores calculados e dos valores experimentais para os diferentes modelos	58
4.8	Relação entre a resistência à tracção dos valores calculados e dos valores experimentais para os diferentes modelos	60
4.9	Relação entre o módulo de ruptura dos valores calculados e dos valores experimentais para os diferentes modelos	61
4.10	Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão das 3 misturas de BAC e os códigos analisados	66
4.11	Relação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão das 3 misturas de BAC e os códigos analisados	67
4.12	Resistência à compressão	70
4.13	Módulo de Elasticidade	70
4.14	Resistência à tracção indirecta	71
4.15	Deformação por retracção	71
4.16	Deformação por fluência	72
4.17	Coeficiente de fluência	72
4.18	Diâmetro médio do poro e porosidade	73
4.19	Deformação por retracção do BAC 1	74
4.20	Deformação por retracção do BAC 2	74
4.21	Deformação por retracção do BAC 3	75
4.22	Deformação por fluência do BAC 1	75
4.23	Deformação por fluência do BAC 2	76
4.24	Deformação por fluência do BAC 3	76
4.25	Coeficiente de fluência do BAC 1	77
4.26	Coeficiente de fluência do BAC 2	77
4.27	Coeficiente de fluência do BAC 3	78
4.28	Retracção em função do tempo	82
4.29	Fluência em função do tempo	82
4.30	Coeficiente de Fluência em função do tempo	83
4.31	Fluência do BAC 1 em função do tempo depois da carga	83
4.32	Coeficiente de fluência do BAC 1 em função do tempo depois da carga	84



# Índice de Tabelas

	Pág.	
2.1	Recomendações do Comité Técnico 174-SCC da RILEM	9
2.2	Recomendações dos Guias Europeus	9
3.1	Influência das dosagens de cimento e água na retracção do betão ao fim de 24 horas	38
3.2	Resultados típicos do ensaio de absorção superficial $\text{cm}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	42
3.3	Proposta de classificação com base nos resultados do ensaio Figg	42
3.4	Características de capilaridade em betões	43
3.5	Coeficiente de permeabilidade de algumas rochas usadas no betão	45
4.1	Valores estimados de diferentes Códigos	52
4.2	Módulo da elasticidade, parâmetros estatísticos para avaliação de diferentes modelos de cálculo	58
4.3	Resistência à tracção, parâmetros estatísticos para avaliação de diferentes modelos de cálculo	60
4.4	Módulo de ruptura, parâmetros estatísticos para avaliação de diferentes modelos de cálculo	62
4.5	Composição das misturas do BAC e suas propriedades frescas calculadas	64
4.6	Resultados experimentais das 3 misturas de BAC ( $f_t$ e $f_c$ em MPa e $E$ em GPa)	65
4.7	Fórmulas de cálculo analisadas para a $f_t$ , $f_c$ e $E$	66
4.8	Dosagens para cada tipo de BAC estudado (por $\text{m}^3$ de betão)	68
4.9	Características do ensaio de fluência	69
4.10	Resultados obtidos dos ensaios do betão no estado fresco	69
4.11	Volume de macroporos e mesoporos	73
4.12	Composição de cada tipo de cimento	80
4.13	Composição e propriedades frescas de cada tipo de betão	81
4.14	Resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade dos betões produzidos	81



# Lista de Siglas

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAC	Betão Auto-compactável
BAR	Betão de alta resistência
BCV	Betão corrente vibrado
BS	British Standard
CBI	Swedish Cement and Concrete Research Institute
CEB	Comité Euro-Internacional du Béton
CSA	Canadian Standards Association
EC2	Eurocódigo 2
EHE	Española del Hormigón Estructural
EN	European Norm
FIP	Federação Internacional du Béton
ISAT	Initial Surface Absorption Test
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, France
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal
NBR	Norma Brasileira
NP	Norma Portuguesa
NZS	New Zealand Concrete
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions, Paris, France
SCC	Self-Compacting Concrete



# Lista de Simbologia

$\mu\text{m}$	Micrómetro
$A/(C+a)$	Razão água materiais cimentícios
$A/C$	Razão água cimento
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato de Sódio
$C$	Dosagem de água no betão
$\text{CaO}$	Óxido de cálcio
$CV$	Cinzas Volantes
$D_{\text{máx}}$	Diâmetro máximo
$E$	Módulo de elasticidade
$E_c$	Módulo de elasticidade estático
$f'_c$	Resistência média à compressão medido em cilindros de 15x30
$FC$	Fíler Calcário
$FC/C$	Razão fíler calcário/cimento
$f_{\text{cft}}$	Módulo de ruptura
$f_{\text{ck}}$	Tensão característica da resistência à compressão em cilindros
$f_{\text{cm}}$	Resistência à compressão
$f_{\text{cm},28}$	Resistência à compressão aos 28 dias
$f_{\text{ct,fl}}$	Módulo de ruptura aos 28 dias EC2
$f_{\text{ct,Sp}}$	Tracção indirecta
$f_{\text{ctm}}$	Resistência à tracção
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de Ferro
$f_f$	Resistência à flexão
$FG$	Fíler Granítico
$G_m$	Diâmetro de espalhamento relativo
$\text{K}_2\text{O}$	Óxido de potássio
$L_{\text{ol}}$	Perdido na combustão
$\text{MgO}$	Óxido de magnésio
$\text{Na}_2\text{O}$	Óxido de sódio
$\text{nm}$	Manómetros

$R_m$	Tempo de escoamento
$SiO_2$	Dióxido de Silício
$SO_3$	Óxido sulfúrico
$SP/C$	Razão superplastificante/cimento
$S_p/p$	Dosagem de superplastificante
$t_0$	Tempo inicial
$V_g$	Volume absoluto de agregado grosso
$V_s$	Volume absoluto de agregado fino
$V_v$	Dosagem de ar
$V_w/V_p$	Razão volumétrica água/finos
$\Delta t$	Interval de tempo
$\epsilon_{ca}$	Extensão de retracção autogénea
$\epsilon_{cd}$	Extensão de retracção em secagem
$\epsilon_{cs}$	Extensão de retracção total
$\epsilon_e$	Extensão elástica
$\epsilon_{er}$	Extensão elástica de recuperação
$\epsilon_f$	Extensão por fluência
$\epsilon_i$	Extensão instantânea
$\epsilon_p$	Extensão plástica
$\epsilon_s$	Retracção
$\epsilon_t$	Deformação total
$\rho_c$	Densidade do betão
$\sigma_c$	Ruptura de compressão
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima
$\sigma_r$	Tensão de ruptura
$\sigma_t$	Ruptura de tracção
$\varphi(t, t_0)$	Coefficiente de fluência

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 - Enquadramento do tema

Com o crescente desenvolvimento tecnológico e grande utilização do betão auto-compactável (BAC) por todo o mundo, tornou-se necessário, em resultado das suas especificidades e diferenças face ao betão corrente vibrado, investigar e conhecer com rigor as propriedades deste novo tipo de betão no estado endurecido, de modo a que essas propriedades possam ser contempladas nos códigos estruturais. Existem muitos artigos e publicações sobre o BAC no estado fresco e esse aprofundado estudo deve-se ao facto do betão auto-compactável ter de possuir determinadas características de trabalhabilidade para ser considerado como tal. Esse nível de conhecimento e domínio não existe no caso das propriedades do BAC no estado endurecido. Um melhor conhecimento das propriedades no estado endurecido permite evitar danos inesperados nas construções e reduzir os custos de manutenção das estruturas já executadas.

No betão corrente vibrado utilizam-se códigos e normas que apresentam modelos para estimar as características desse betão no estado endurecido. Nesta medida, algumas questões podem ser formuladas relativamente à possibilidade desses modelos serem usados no betão auto-compactável: Será correcto usar essas normas para estimar as propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido? Qual delas se aproximará mais da realidade do BAC? Para responder a algumas dessas questões foi elaborada a presente dissertação.

## 1.2 - Objectivo e justificação da dissertação

O principal objectivo desta dissertação foi o de comparar alguns códigos e normas usados para estimar valores das propriedades do betão corrente vibrado no estado endurecido e compará-los com valores experimentais obtidos para o betão auto-compactável.

Inicialmente estava prevista nesta dissertação a elaboração de ensaios experimentais, mas na impossibilidade de vir a desenvolver um bom e completo trabalho laboratorial à altura deste tema, optou-se por fazer uma pesquisa intensiva e uma revisão bibliográfica.

Este trabalho deixa em aberto um grande e complexo trabalho laboratorial que pode ser feito e comparado com esta dissertação, uma vez que a componente teórica fica aqui desenvolvida.

## 1.3 - Organização da dissertação

A estrutura desta dissertação divide-se em três partes: pré-textual, textual e referencial.

Da parte pré-textual fazem parte o âmbito do trabalho, a dedicatória, os agradecimentos, o resumo analítico, o *abstract*, o índice geral, o índice de figuras e tabelas, a lista de siglas e a simbologia utilizada. A parte textual é constituída por 5 capítulos onde é feita uma revisão bibliográfica (Capítulos 1, 2 e 3), comparados os códigos e normas estudados com valores experimentais (Capítulo 4), conclusões e as recomendações para trabalhos futuros (Capítulo 5). De forma mais pormenorizada:

No 1º Capítulo inclui-se a introdução onde se faz o enquadramento do tema e se definem os objectivos desta dissertação e seu enquadramento;

O 2º Capítulo trata do desenvolvimento e aplicações do BAC, os vários métodos de obtenção, exemplos, vantagens e desvantagens;

No 3º Capítulo é apresentado o estado da arte sobre as propriedades do BAC no estado endurecido. Propriedades como a resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade, fluência, retracção e durabilidade são tratados e comparados nos 3 tipos de betões (betão auto-compactável, betão de alta resistência e betão corrente vibrado).

No 4º Capítulo são comparados alguns trabalhos laboratoriais com normas e códigos de previsão das propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido.

No 5º Capítulo são apresentadas as conclusões mais relevantes sobre o tema da dissertação e são sugeridas propostas para trabalhos futuros e seus desenvolvimentos.

## Capítulo 2 - Desenvolvimento e aplicação do BAC

### 2.1 - Introdução

O advento do betão auto-compactável (BAC) teve início no Japão na década de 80 do século XX, mais precisamente em 1983. O principal motivo do surgimento deste novo tipo de betão deveu-se à falta de homogeneidade e consequente redução da durabilidade das estruturas de betão armado, que se começou a verificar no Japão em consequência da redução do número de trabalhadores especializados na construção. A necessidade de produzir um betão que, independentemente da qualidade da mão-de-obra, conseguisse uma boa compactação e elevada durabilidade das estruturas foi equacionada pelo professor Hajime Okamura em 1986. Nessa altura, Okamura apresentou um betão que se auto-compactava por acção da gravidade, sendo desprezável uma boa qualificação dos trabalhadores para a sua aplicação, conseguindo deste modo conferir durabilidade às estruturas [117].

O BAC é um material homogéneo com elevada trabalhabilidade, capaz de se mover, libertar o ar, fluir no interior das cofragens e preencher as armaduras só por acção do seu peso próprio, sem a ocorrência de bloqueio por parte dos agregados. Para que seja garantida essa auto-compactabilidade é necessário que o betão tenha boa capacidade de enchimento, boa resistência à segregação evitando a exsudação e facilidade de passagem. A capacidade de enchimento é a facilidade com que o betão tem em preencher toda a cofragem incluindo aquelas com formatos menos usuais. A resistência à segregação é a capacidade das partículas em suspensão manterem a sua homogeneidade durante a mistura, transporte e colocação. A facilidade de passagem é a capacidade que o betão tem em passar entre as armaduras e os espaços estreitos das cofragens.

### 2.2 - Composição do BAC

A composição do BAC distingue-se do betão corrente vibrado por ter:

- Menor volume de agregados,
- Maior volume de pasta,
- Baixa razão A/C,
- Elevado volume de materiais finos (material de dimensão inferior a 125 µm),
- Elevada dosagem de superplastificante,
- Possível utilização de agentes modificadores da viscosidade.

A Figura 2.1 mostra uma comparação entre as quantidades de material usado na produção de betão auto-compactável e o betão corrente vibrado.

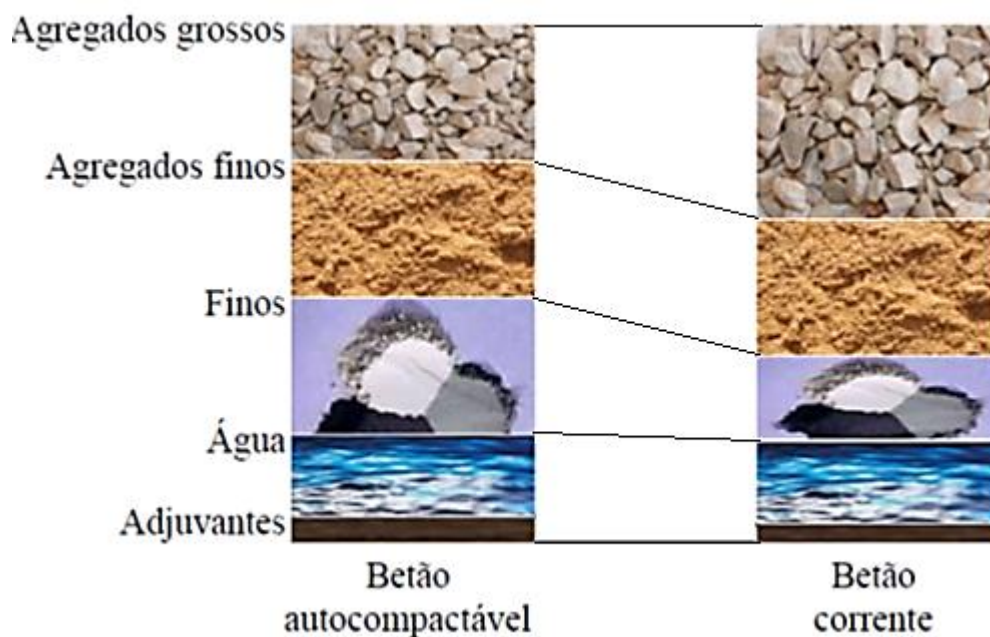


Figura 2.1 - Diferenças entre a composição do BAC e do betão corrente vibrado [155]

### 2.3 - Métodos de obtenção

Para se alcançarem as propriedades necessárias do BAC, Petersson *et al* [142] referem que se deve limitar o volume de agregados grossos, assegurando a capacidade de passagem. O aumento do volume de pasta, uma baixa razão A/C e a introdução de superplastificantes asseguram a fluidez e a resistência à segregação da mistura. A Figura 2.2 representa um esquema de obtenção da auto-compactabilidade.

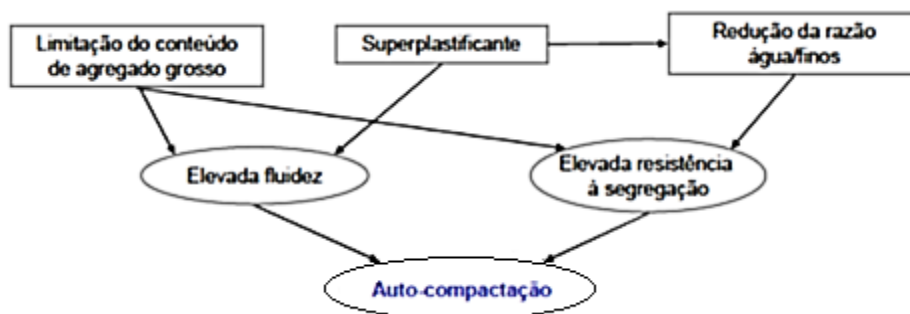


Figura 2.2 - Método para alcançar um betão auto-compactável [142]

O professor Okamura [117] foi o primeiro a desenvolver um método de produção de betão auto-compactável, a esse método foi-lhe atribuído o nome de “Método Geral”. Depois do método proposto por Okamura, seguiram-se mais métodos e propostas para a produção de betão auto-compactável. Alguns desses métodos são abordados seguidamente:

➤ **Método Okamura (Método Geral)**

Este método foi proposto em Setembro de 1993 por Okamura *et al* [117]. A Figura 2.3 representa um fluxograma do método usado por Okamura *et al* [117] para a obtenção do betão auto-compactável.

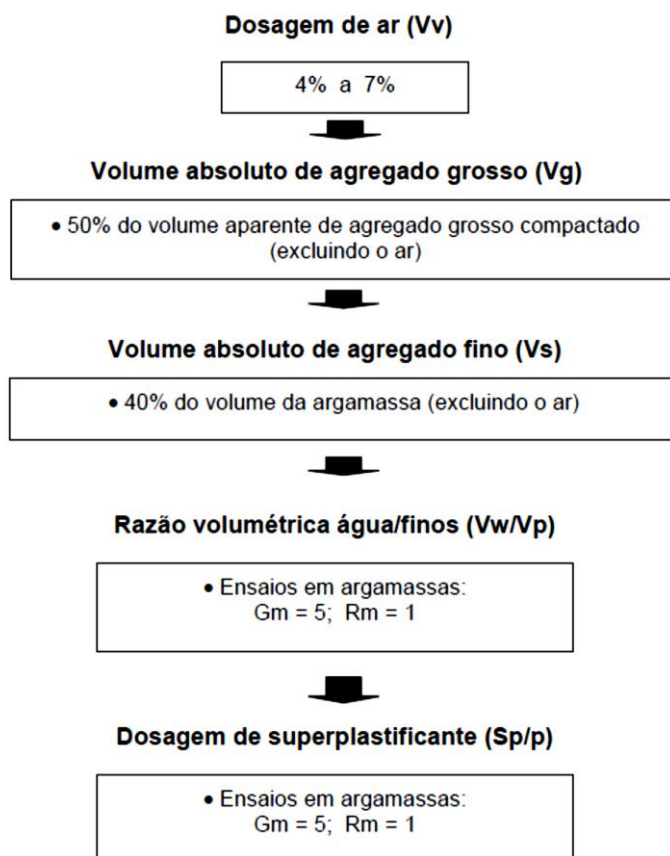


Figura 2.3 - Método geral proposto por Okamura et al [117]

Este método começa por fixar o teor de ar, sugerindo que este varie entre os 4 e 7%, em função do tipo de ambiente a que a estrutura fica exposta. O volume de agregado grosso é 50% do volume aparente seco compactado do agregado excluindo o ar previsto para a mistura. O volume de agregado fino (partículas de dimensão superior a 90  $\mu\text{m}$ ) é 40% do volume de argamassa. Depois de todos estes parâmetros fixados só falta definir a razão A/C e a dosagem de superplastificante. Após serem feitos ensaios de espalhamento e ensaios de fluidez, que fornecem respectivamente  $G_m$  (diâmetro de espalhamento relativo) e  $R_m$  (tempo de escoamento relativo), Okamura sugere como valores  $G_m=5$  e  $R_m=1$ .

➤ Método proposto pela JSCE

Este método foi proposto em Julho de 1998 pela Sociedade Japonesa de Engenharia Civil. A Figura 2.4 representa um fluxograma do método proposto pela JSCE para a obtenção do betão auto-compactável.

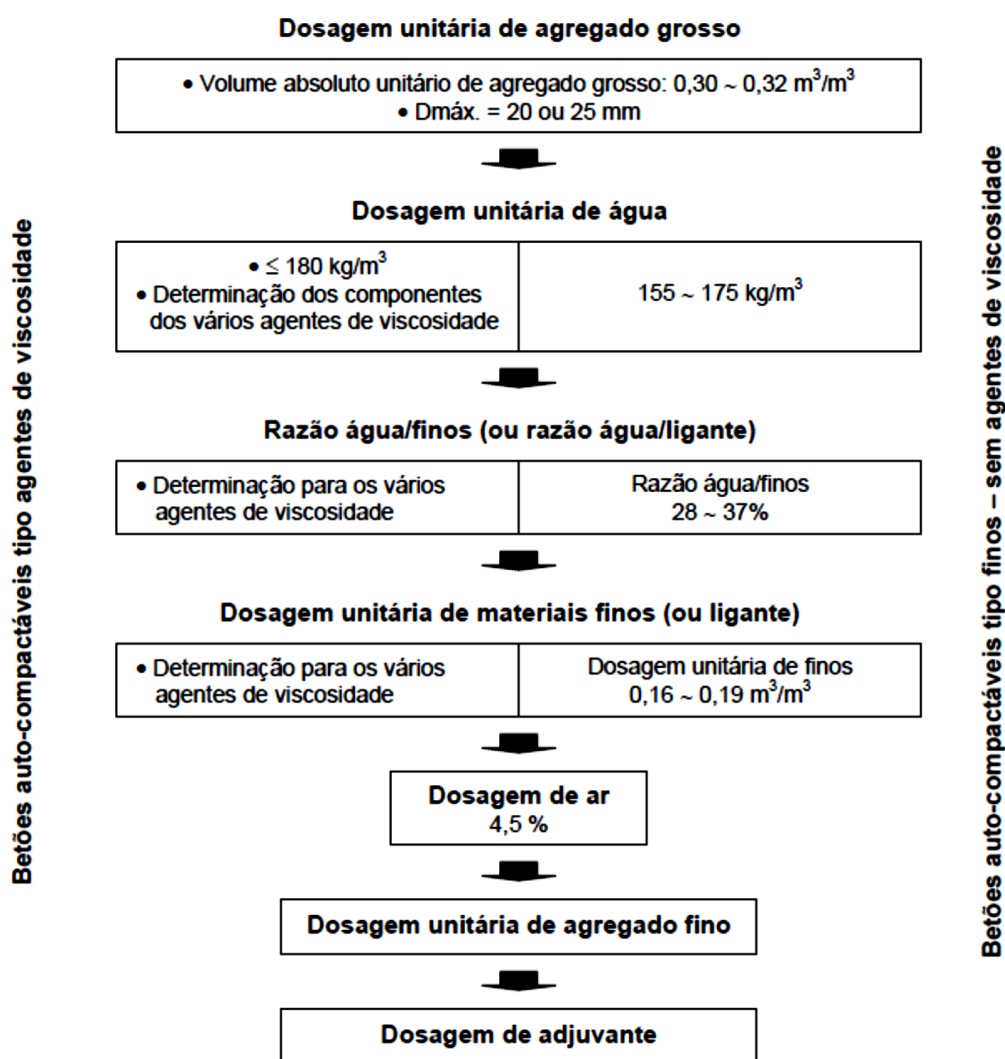


Figura 2.4 - Representação esquemática do método proposto pela JSCE [114]

Este método é o único que permite a utilização de agentes de viscosidade. Essa utilização faz alterar logo de início a dosagem de água, a razão água/(materiais finos) e a dosagem de ligante. Essa proporção da mistura pode ainda variar em função do tipo de agente de viscosidade utilizado.

➤ **Método proposto pelo CBI**

Este método foi desenvolvido em 1996 por Peterson (CBI), Billberg (CBI) e Van Bui [124]. A Figura 2.5 representa um fluxograma do método proposto pelo CBI para a obtenção do betão auto-compactável.

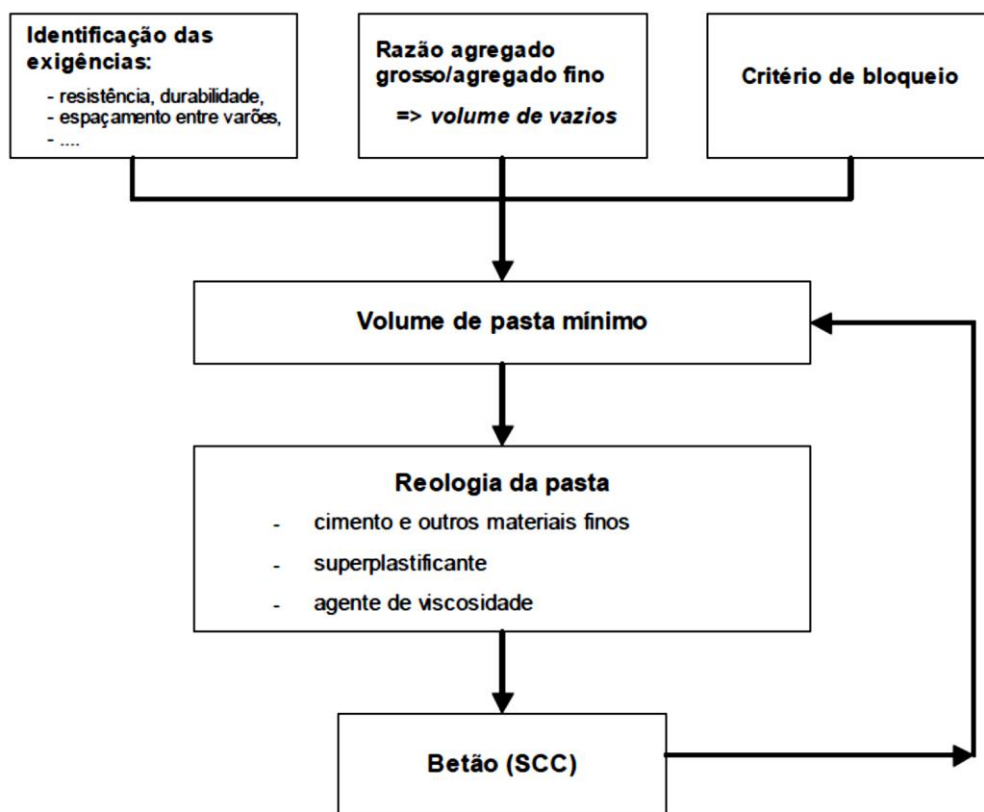


Figura 2.5 - Método de concepção da composição proposto pelo CBI [114]

Este método baseia-se no conceito de que o betão fresco é composto por duas fases distintas, a fase líquida e a fase sólida. A fase sólida é constituída pelos agregados grossos e finos, fazendo os restantes constituintes parte da fase líquida. Este método tem como objectivo encontrar uma óptima proporção entre o agregado grosso e fino, capaz de minimizar o volume de pasta.

➤ **Método Proposto por Nepomuceno**

Este método foi proposto em 2005 e permite controlar o valor da resistência à compressão através da introdução de novos parâmetros. A Figura 2.6 representa um fluxograma do método proposto por Nepomuceno [104] para a obtenção do betão auto-compactável.

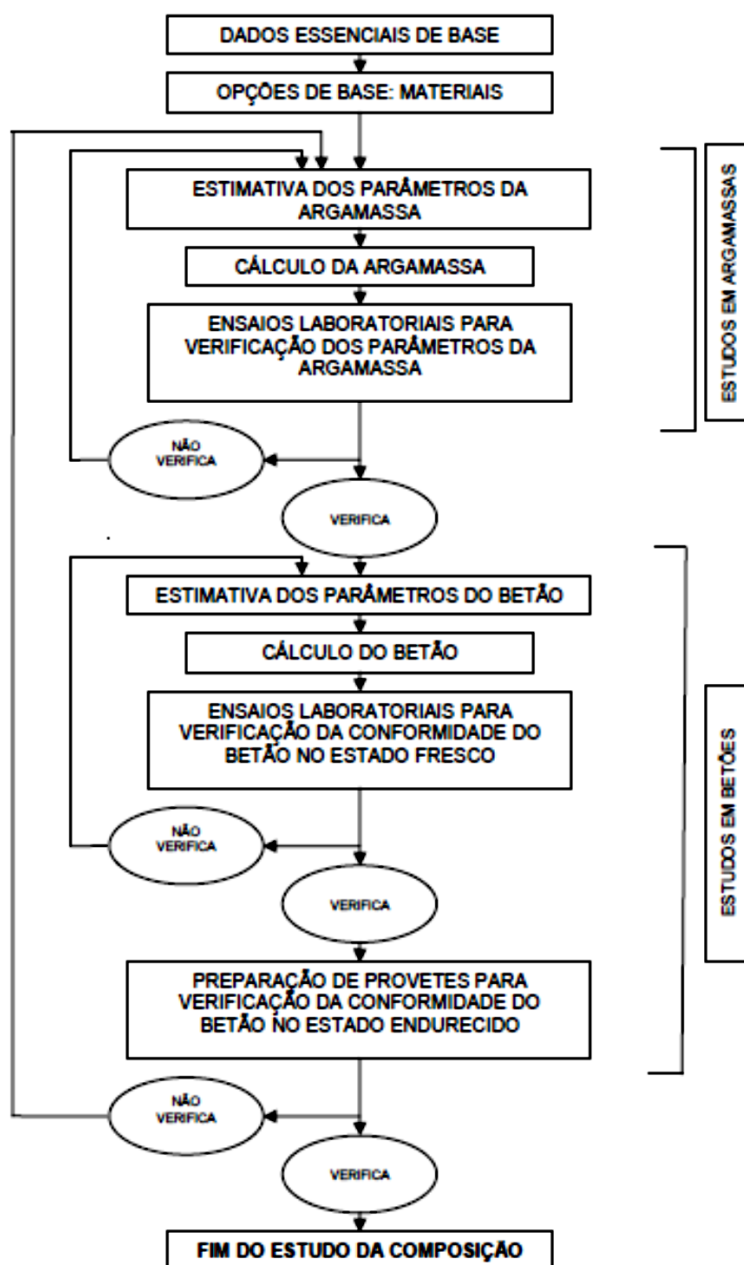


Figura 2.6 - Fluxograma para o estudo da composição de betões auto-compactáveis [104]

O método de Nepomuceno [104] tem por base o método de Okamura. No seu método, Nepomuceno [10] introduz novos parâmetros relativamente ao método base que se adequam melhor ao controlo da resistência à compressão. Esta metodologia começa por considerar como variáveis alguns parâmetros que até então se consideravam constantes.

➤ **Existem outros métodos propostos por vários autores**

- Método proposto por Rui Ferreira [56],
- Método proposto pelo LCPC [114].

➤ **Existem ainda algumas recomendações para a produção de BAC**

- Recomendação do Comité Técnico 174-SCC da RILEM

Domone [48] refere que apesar de existirem variadas proporções de mistura, os parâmetros se situam em determinado intervalo como se verifica na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Recomendações do Comité Técnico 174-SCC da RILEM [104]**

Parâmetro / Composição	Recomendações do Comité técnico 174-SCC da Rilem
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.

- Recomendação dos Guias Europeus [145] para o BAC

Estes guias dão a indicação de intervalos típicos para a composição do BAC em função do volume e massa, na Tabela 2.2 pode-se verificar os intervalos para os diversos tipos de materiais.

**Tabela 2.2 - Recomendações dos Guias Europeus [145]**

Componentes	Varição de Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Varição de Volume (l/m <sup>3</sup> )
Materiais finos	380 - 600	*
Pasta	*	300 - 380
Água	150 - 210	150 - 210
Agregado grosso	750 - 1000	270 - 360
Agregado fino	45% - 55% do peso total do agregado	
Razão água/finos	*	0.85 - 1.0

\*Não existem valores Recomendados.

## 2.4 - Aplicações

A utilização mundial do betão auto-compactável é mais notória no Japão, no entanto, este já é bastante utilizado em muitos outros países. Apesar de ainda ser necessário estudar algumas das características deste betão, a aplicação do BAC por todo o mundo faz prova das suas vantagens quer na sua aplicação quer na sua qualidade final. Seguidamente apresentam-se algumas utilizações do BAC pelo mundo.

### Japão:

- A primeira aplicação ocorreu em Junho de 1990 num edifício,
- Em 1992 foi utilizado BAC leve na viga principal de uma ponte atirantada,
- Utilizado na execução das ancoragens da ponte Akashi-Kaiko que foi posta em serviço em Abril de 1998 [76],
- Num tanque exterior pré-esforçado destinado ao armazenamento de metano liquefeito em que o dono era a Osaka Gas Company [77],
- Na Landmark Tower em Yokohama, no Japão [140].

### Suécia:

- Entre 1998 e 2004 foi utilizado num dos maiores projectos de infra-estruturas rodoviárias (Sodran Lancken) em Estocolmo, na Suécia,
- Em 1998 foram betonadas com BAC 3 pontes,
- Uma das maiores empresas de construção Suecas reporta ter começado a usar o BAC na construção de edifícios na primavera de 2001 [140].

### Canadá:

- Um dos maiores projectos de aplicação do BAC neste país foi a ampliação do Pearson International Airport em Toronto, onde devido a dificuldades de betonagem dos pilares por excessiva altura (31 metros), estes foram cheios de baixo para cima.

### Argentina:

- Nos finais da década de 90, o BAC foi aplicado em 3 projectos diferentes. O primeiro referia-se a uma instalação do tipo industrial destinada ao armazenamento de alimentos. O segundo à execução das paredes do cofre de um banco. E o último na construção de um edifício de habitação com 34 pisos.

#### **França:**

- Na construção de um auditório de 450 lugares com o nome de Centre d'Art de Meudon.

#### **Portugal:**

- Edifícios do Lagoas Parque,
- Edifício Expoland - Parque das Nações,
- Cine-teatro Municipal do Cartaxo,
- Empreendimento Gaia Nova - Vila Nova de Gaia,
- Reparação do Cais de ancoragem e pontes cais na Trafaria,
- Reforço de lajes num empreendimento habitacional no Montijo,
- Execução de um modelo para ensaio na mesa sísmica do LNEC,
- Reparação do cais de amarração da base naval do Alfeite,
- Reforço do vigamento de um edifício na Madeira.

#### **Dubai:**

- No Hotel Shangri-La.

#### **Outras aplicações genéricas:**

- Pré-fabricação,
- Betão pronto,
- Betão para pavimentos,
- Betonagem de revestimentos de interiores em túneis,
- Aplicação por vazamento em superfície sem pendentes relevantes,
- Barragens,
- Pontes,
- Edifícios.

## **2.5 - Conclusões**

Uma das justificações para o BAC se ter difundido tão rapidamente pelo mundo inteiro está associada às atractivas propriedades que este betão apresenta no seu estado fresco, devido ao facto de fluir sem recurso a qualquer método de compactação usando unicamente o seu peso e também devido ao facto de permitir executar estruturas de elevada qualidade. Porém, é de referir que o BAC é dos betões mais difíceis de conceber, pois é necessário encontrar um equilíbrio entre as suas diferentes propriedades.

**Vantagens:**

- Menor dependência da qualidade do betão proveniente da não qualificação dos operários,
- Menor utilização de mão-de-obra e conseqüente redução de custos,
- Maior qualidade na superfície de acabamento,
- Maior liberdade no planeamento da obra,
- Redução do barulho, pois não necessita de vibração,
- Redução do tempo de construção,
- Melhores condições de trabalho e maior produtividade,
- Compatibilidade com fibras metálicas e de polipropileno,
- Maior flexibilidade na disposição de armaduras,
- Concepção de estruturas mais elaboradas e elementos mais esbeltos,
- Concepção de estruturas mais homogêneas,
- Aumento da vida útil das cofragens.

**Desvantagens:**

No entanto também existem desvantagem:

- O controlo de qualidade de fabrico tem de ser mais exigente,
- Maior custo na produção,
- Maior susceptibilidade à retracção e à fluência,
- Maior calor de hidratação,
- Cofragens têm de ser mais estanques.

## Capítulo 3 - Propriedades do betão no estado endurecido

### 3.1 - Introdução

O conhecimento prévio das propriedades do BAC no estado endurecido é fundamental, pois permite fazer um correcto dimensionamento e ainda antever o seu comportamento durante a sua vida útil.

As propriedades mais importantes do BAC no estado endurecido a serem estudadas e analisadas neste capítulo são: a resistência às tensões (resistência à compressão, resistência à tracção, resistência à flexão), a fadiga, a deformação elástica (módulo de elasticidade), a deformação sob cargas (fluência), a retracção e a durabilidade. Nos pontos seguintes vão ser abordadas essas mesmas propriedades para o BAC, para o betão corrente vibrado da gama de resistência normal e para o betão vibrado da gama de alta resistência. Estes vão apenas servir para comparação relativa com o BAC, pois é esse o grande objectivo desta tese. Vão ainda ser apresentadas algumas conclusões para cada uma dessas propriedades.

### 3.2 - Resistência à compressão

A resistência à compressão é a propriedade mais importante de um betão no estado endurecido, pois é esta a propriedade que classifica o betão e o situa na sua classe correcta de resistência. Esta resistência é afectada por vários factores, tais como: máxima dimensão dos agregados, forma do agregado, textura do agregado, natureza e dosagem de ligante, granulometria, razão A/C, porosidade, grau de compactação e condições de cura [108, 97, 35, 37, 42, 62, 109, 131]. Os betões dentro do mesmo tipo são distinguidos maioritariamente pela sua classe. É ainda através da sua classe de resistência que se podem prever muitas das restantes propriedades do betão no estado endurecido. No entanto, estas previsões não devem ser aplicadas aos BAC, porque devido às variações das proporções e seus constituintes, o BAC torna-se muito mais sensível e assim sendo apresenta valores diferentes nas outras propriedades para betões da mesma classe [105].

#### a) Betão normal

A resistência do betão normal pode ser prevista através de gráficos tendo em atenção a razão A/C. O American Concrete Institute [10] sugere o gráfico que se apresenta na Figura 3.1 para prever a resistência à compressão medida em cubos de 20 cm de aresta aos 28 dias em função da razão A/C.

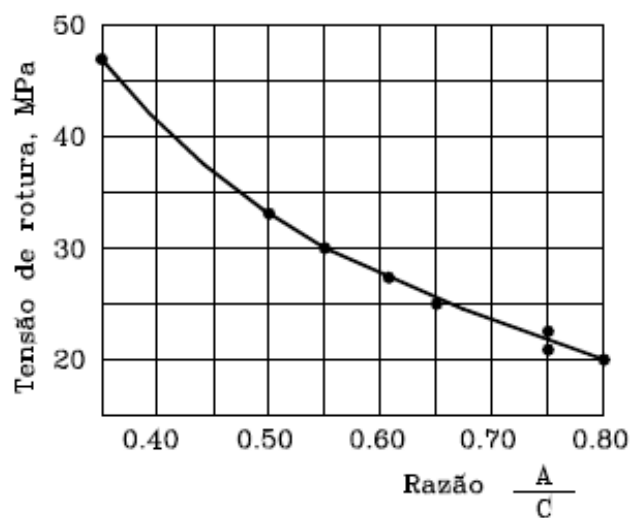


Figura 3.1 - Variação da tensão de ruptura com o valor da relação A/C [40]

Para se poder comparar a resistência à compressão medida em provetes de diferentes formas e dimensões apresenta-se dois gráficos, o primeiro da Figura 3.2 elaborado por Neville [107] e o segundo da Figura 3.3 retirado do U.S. Bureau of Reclamation [96] que serve para comparar esses valores.

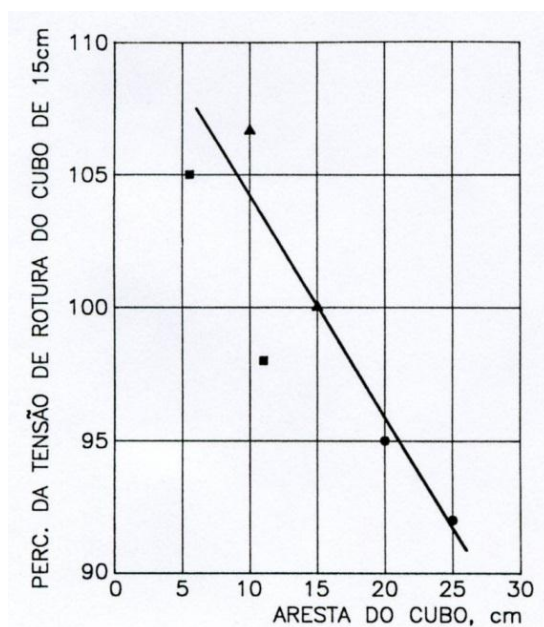
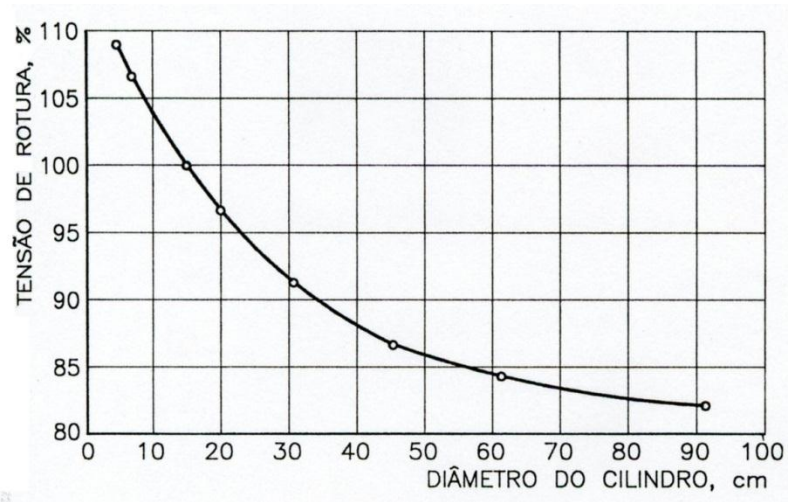
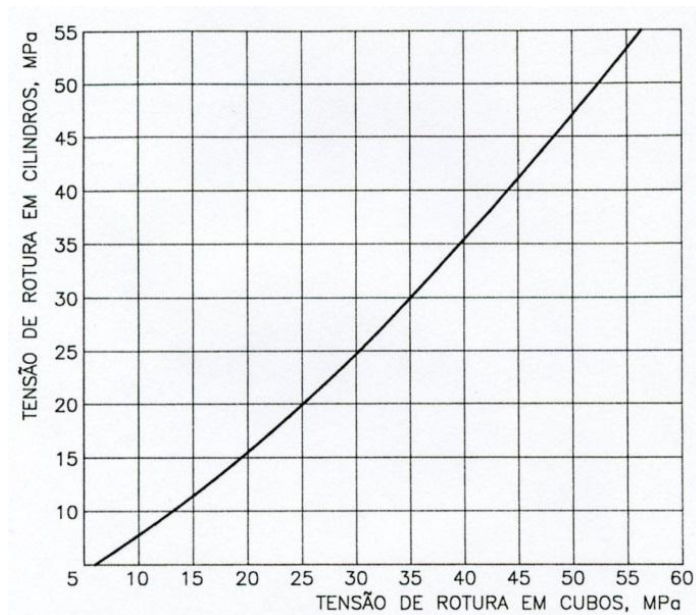


Figura 3.2 - Relação entre as tensões de ruptura de cubos com diferentes dimensões [40]



**Figura 3.3** - Relação entre as tensões de ruptura de cilindros com diferentes dimensões (altura dupla do diâmetro) [40]

O gráfico da Figura 3.5 proposto por Evans [55] apresenta a relação entre a resistência medida em cubos de 150 mm de aresta e a correspondente resistência medida em cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.



**Figura 3.4** - Relação entre as tensões de ruptura de cubos com 15 cm de aresta e cilindros com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura [40]

Na Figura 3.5 comparam-se os valores da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias em função da razão A/C. Quanto maior a razão A/C, maior a diferença entre a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias.

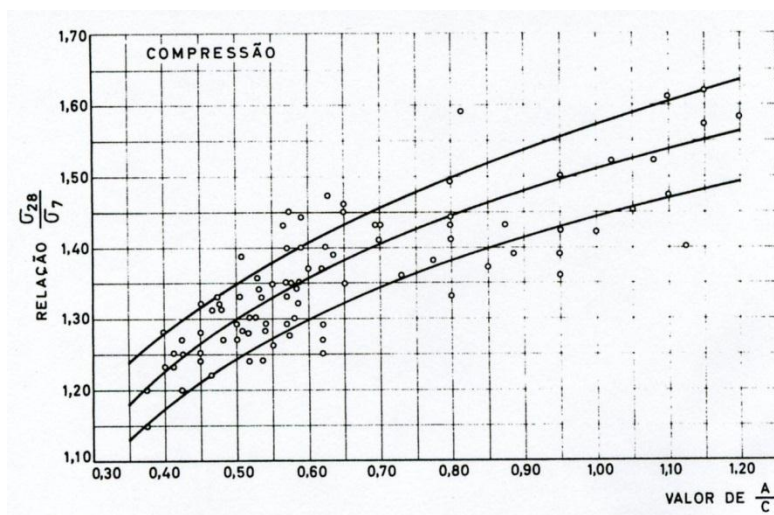


Figura 3.5 - Variação da relação entre as tensões de ruptura aos 7 e aos 28 dias em função da razão A/C [40]

## b) Betão de alta resistência

O betão de alta resistência, segundo o Comité 363 do *American Concrete Institute* [3] é um betão que tem no mínimo 41 MPa de resistência à compressão aos 28 dias e onde a sua resistência máxima possa ultrapassar os 100 MPa. Este betão tem uma composição muito semelhante à composição do betão corrente vibrado, no entanto, neste tipo de betões, parte do cimento é substituído por adições como sílica de fumo, cinzas volantes e pozolanas naturais. Essas adições, combinadas com adjuvantes redutores de água, permitem atingir resistências muito superiores às do betão corrente vibrado.

### Betões com sílica de fumo:

Segundo Sellevold *et al.* [138], a sílica de fumo utilizada como aditivo em substituição parcial do cimento, aumenta entre duas a quatro vezes mais a eficiência da ligação inerte-pasta, o que se reflecte numa melhor resistência à compressão.

Jia *et al.* [74], confirma que o fortalecimento da ligação inerte-pasta por parte da sílica de fumo em substituição de 5% da massa de cimento, origina um aumento superior a 10% da resistência à compressão aos 28 dias.

### Betões com cinzas volantes:

Vários autores concluíram que o uso de cinzas volantes em substituição parcial do cimento, diminui a resistência à compressão do betão [24, 25, 60, 80]. Outros autores, confirmam e apresentam resultados contrários a estes, referindo que as cinzas volantes ajudam no aumento da resistência à compressão dos betões.

Contudo, alguns autores aumentaram o grau de finura das cinzas volantes através de processos de moagem [1, 34, 121, 160]. A relação entre a razão A/ (materiais cimentícios) de um betão composto por cinzas volantes é muito mais sensível à dosagem de água do que os betões de referência sem cinzas [34].

Segundo Albinger [6], betões compostos por cinzas volantes só conseguem ultrapassar a resistência de 41 MPa com a ajuda de adjuvantes redutores de água.

Não especificando o porquê, Venuat [154], relata que as cinzas volantes contribuem para melhorar as resistências mecânicas a partir dos 7 dias de idade. Essas melhorias dependem da quantidade de substituição de cimento por cinzas volante.

Ashby *et al.* [15], referem que a substituição parcial de cimento por cinzas volantes, contribuem para um aumento positivo da resistência à compressão entre os 28 e 90 dias, assim como outros autores que concordam [18, 45, 75, 160]. Contudo, diferentes autores ainda apontam para que essa contribuição continue para além dos 90 dias [25, 78].

#### **Betões com pozolanas naturais:**

Coutinho [34, 38] defende que o efeito de uma pozolana na resistência à compressão depende de vários factores, tais como: da finura da pozolana, nível de actividade da pozolana, entre outros. Podem ser obtidas diferentes resistências à compressão que podem ir de -30% aos 7 dias até +15% aos 5 anos de idade [34, 39].

#### **Betões com adjuvantes redutores de água:**

Alguns autores afirmam que reduções de água de 23 a 35%, elevam a resistência à compressão do betão de 50 a 75% nas primeiras 24 horas e cerca de 45% aos 28 dias [27, 146].

Almeida [9] concluiu o seguinte na sua tese que relativamente à resistência à compressão:

- Betões com sílica de fumo (sem adjuvante) são mais lentos que o betão de referência até à primeira semana, a partir dos 7 dias a resistência já supera a dos betões de referência, mantendo-se muito constante até aos 365 dias. O mesmo sucede com as cinzas volantes.
- Betões com pozolana natural nunca igualaram as resistências do betão de referência.
- O uso de um superplastificante foi o produto que mais influenciou o aumento da resistência à compressão do betão, tanto nas misturas com aditivos como nas que não tinham.
- Os betões que conseguiram uma maior resistência à compressão foram aqueles em que se usou sílica de fumo e adjuvante, tanto nos primeiros 28 dias como ao fim de um ano.

### c) Betão auto-compactável

Um BAC para a mesma razão água/cimento, tem maiores resistências à compressão relativamente ao betão corrente vibrado [141].

A variação da resistência à compressão em altura do BAC entre o topo e a base de pilares em relação ao betão corrente vibrado é menor [141]. Em paredes, os valores são muito semelhantes entre a base e o topo da parede [141]. A dureza superficial do BAC é superior comparativamente com outros betões. Tudo isso se deve ao facto do BAC não precisar de ser vibrado e deste modo não haver falhas na vibração, sendo portanto mais uniforme.

Nepomuceno [104] na sua tese e para o seu método apresenta alguns gráficos com os quais se pode estimar a resistência à compressão segundo vários parâmetros. Para interpretação dos gráficos seguintes é necessário saber o significado de algumas siglas tais como:

- C1 é o cimento do tipo CEM I 42,5R,
- C2 é o cimento do tipo CEM II/B-L32,5N,
- As adições Tipo I são adições quase inertes,
- As adições Tipo II são adições pozolânicas ou hidráulicas latentes,
- CV são cinzas volantes,
- FC é o fíler calcário,
- FG é o fíler granítico.

No gráfico da Figura 3.6 pode-se estimar o valor da resistência para os dois tipos de cimento mais usados em função da razão água/cimento, e como era de esperar, o cimento do tipo I atinge maiores valores de resistência para a mesma razão A/C.

Seguidamente é apresentado o gráfico da Figura 3.7 que Nepomuceno criou com base nos seus resultados e que relaciona a resistência à compressão aos 28 dias com a razão A/(materiais cimentícios).

Com base no gráfico da Figura 3.7 pode-se prever os valores da resistência à compressão para uma dada razão A/(materiais cimentícios), como Nepomuceno defende na sua tese e no seu método em que a composição do BAC é feita com total controlo das adições utilizadas na pasta de cimento.

No gráfico de barras da Figura 3.8 pode-se verificar e prever a relação entre a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias para diferentes composições de BAC.

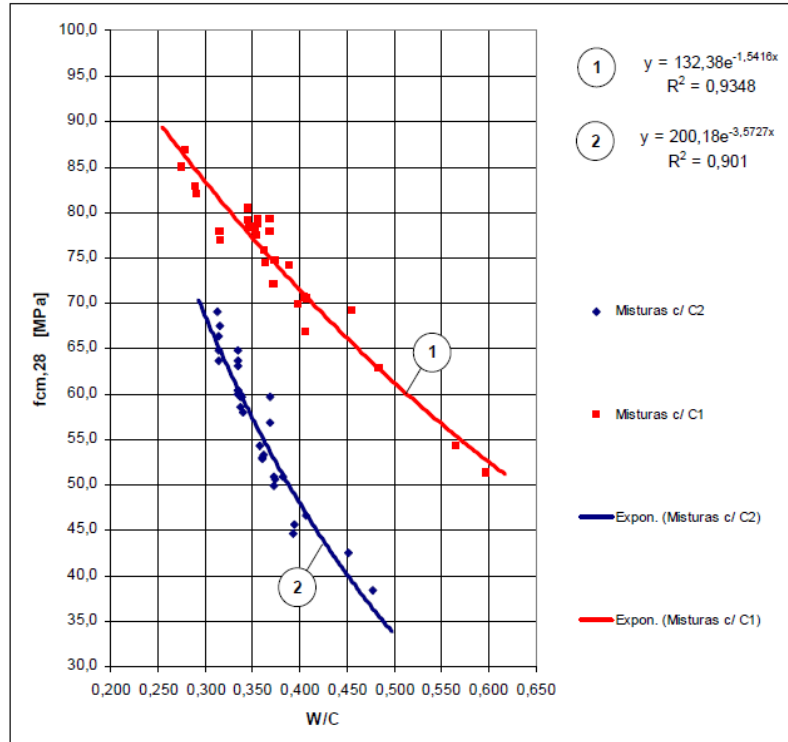


Figura 3.6 - Relação entre  $f_{cm,28}$  e a razão A/C tendo por base valores efectivos [104]

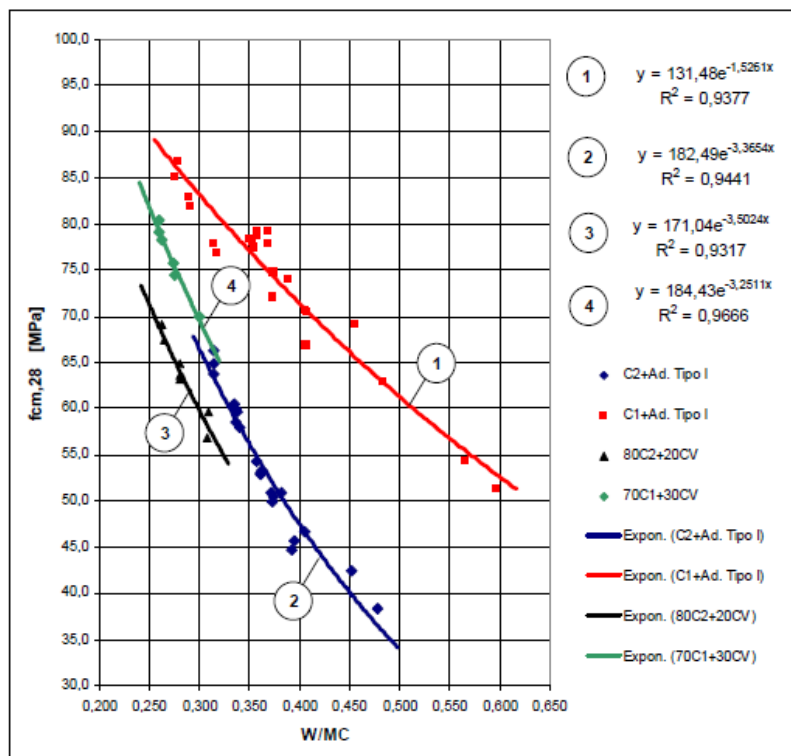


Figura 3.7 - Relação entre  $f_{cm,28}$  e a razão A/(materiais cimentícios) tendo por base valores efectivos [104]

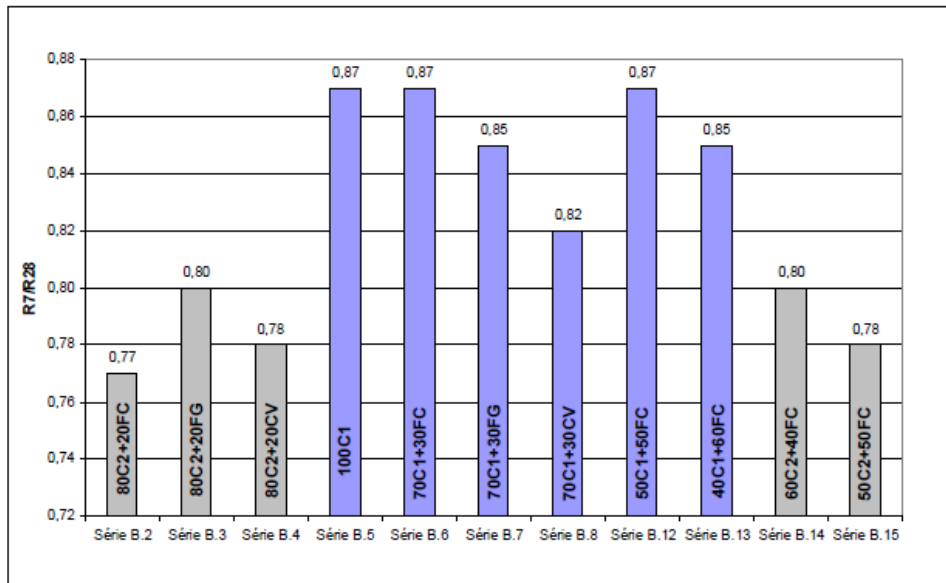


Figura 3.8 - Relação R7/R28 para diferentes composições de BAC [104]

Manuel Vieira refere que a resistência à compressão depende essencialmente da razão A/C, sendo quase independente do tipo de adição usado. Na Figura 3.9 apresenta-se um gráfico elaborado por Vieira que prevê a resistência à compressão segundo a relação A/C [155].

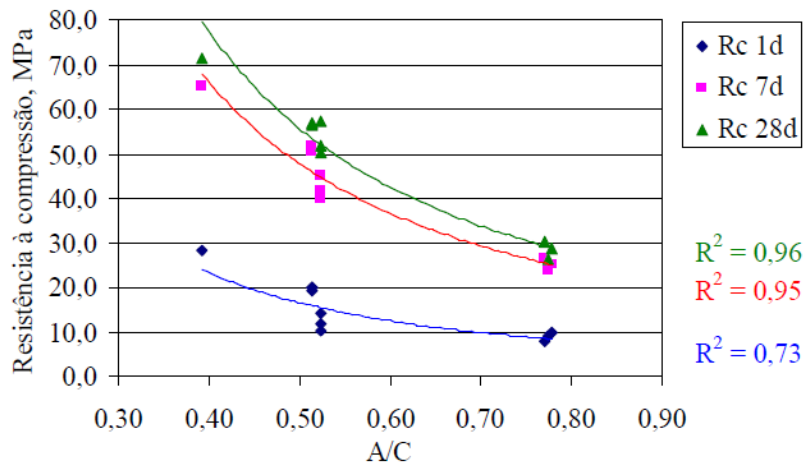


Figura 3.9 - Resistência à compressão em função da razão A/C [155]

Refere ainda Vieira que a utilização de fíler calcário ou de fíler granítico faz com que nas primeiras 24 horas a classe de resistência seja superior em cerca de 10 MPa, mas que aos 28 dias essa diferença pode ser apenas de 6 MPa. Essa diminuição deve-se ao carácter pozolânico das cinzas que se traduz na formação de novos C-S-H, devido à reacção das cinzas com os hidróxidos de cálcio [155].

## d) Síntese

A resistência à compressão é superior nos betões de alta resistência, pois esta é a característica que lhe dá o nome.

O betão auto-compactável pode atingir valores de resistência à compressão semelhantes ao de um betão corrente vibrado e pode ir até valores próximos do betão de alta resistência.

A resistência à compressão é fundamentalmente influenciada pela razão A/C, sendo que outros factores também influenciam mas em menor ordem. A utilização de adjuvantes reductores de água é o mais directo incrementador de resistência à compressão.

## 3.3 - Resistência à tracção

A resistência à tracção de um betão é a propriedade com maior importância no desenvolvimento da fissuração, seguido da sua deformação e durabilidade. Existem outras propriedades mecânicas, tais como: a aderência, a resistência à flexão, a resistência à torção e a resistência ao corte que estão relacionadas com a resistência à tracção [73]. A resistência à tracção aumenta com o aumento da resistência à compressão mas esse aumento não é directamente proporcional.

### a) Betão normal

Os resultados publicados por Gonnerman *et al.* [63] apresentam vários factores que influenciam a resistência à tracção do betão.

A Figura 3.10 mostra como varia a tensão de ruptura à tracção do betão com a idade em função da razão A/C. Pode-se concluir que para a mesma idade o valor de ruptura à tracção diminui com o aumento da razão A/C. A tensão de ruptura à tracção aumenta com a idade do betão.

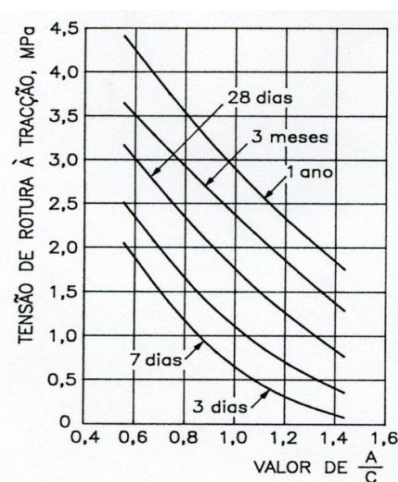


Figura 3.10 - Influência da razão A/C na tensão de ruptura de tracção [40]

Na Figura 3.11 pode-se verificar e comparar a influência do agregado usado no betão no valor da tensão de ruptura à tracção. Sendo que o agregado de calcário é o que mais favorece o mesmo betão à tensão de ruptura à tracção comparados com outras naturezas de agregados. Por outro lado, o grés é a pior natureza de agregado.

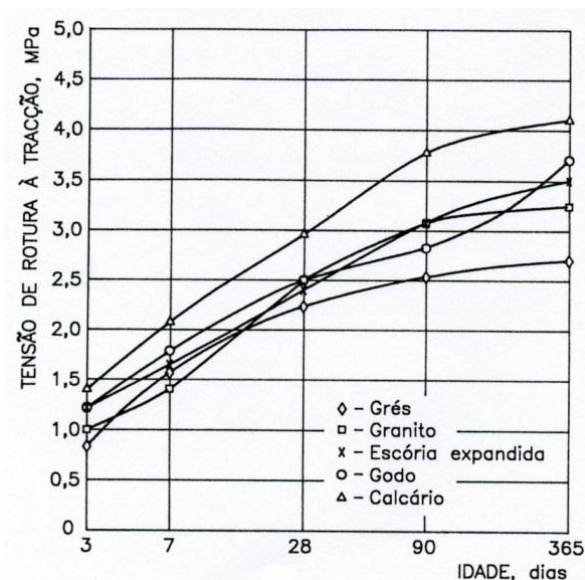


Figura 3.11 - Influência da natureza do agregado na tensão de ruptura de tracção [40]

A relação entre as tensões de ruptura de tracção ( $\sigma_t$ ) e as tensões de ruptura da compressão ( $\sigma_c$ ) segundo Chambaud [86] é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_t = 100 \times \sigma_c / 700 + \sigma_c \quad (3.1)$$

## b) Betão de alta resistência

Dewar [44] refere que para betões de alta resistência superiores a 84 MPa, a sua resistência à tracção não ultrapassa os 5% do seu valor da resistência à compressão. O Eurocódigo 2 (EC 2) [28] apresenta uma expressão para o cálculo da resistência à tracção ( $f_{ctm}$ ) através do valor conhecido da resistência à compressão em cilindros ( $f_{cm}$ ).

Para classes de resistência iguais ou inferiores a C50/60:

$$f_{ctm} = 0,30 \times f_{cm}^{3/4} \quad (3.2)$$

Para classes de resistência superiores a C50/60:

$$f_{ctm} = 2,12 \times \ln(1 + f_{cm}/10) \quad (3.3)$$

### c) Betão auto-compactável

Alguns autores referem que a relação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão apresenta valores semelhantes entre o BAC e o betão corrente vibrado [141], já outros autores apontam para ligeiras diferenças [47]. Deste modo, o BAC deve ser ensaiado e analisado quanto à resistência à tracção em laboratório para o caso e composição que se pretende utilizar.

A resistência à tracção pode ser calculada através dos valores obtidos no ensaio de compressão diametral segundo a fórmula prevista no EC2 [28].

$$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} \quad (3.4)$$

Onde:

$f_{ctm}$  - resultado da resistência à tracção.

$f_{ck}$  - valor da tensão característica da resistência à compressão em cilindros.

Os valores da resistência à tracção por compressão diametral do gráfico da Figura 3.12 foram multiplicados por 0,9 conforme indicação do EC2 [28].

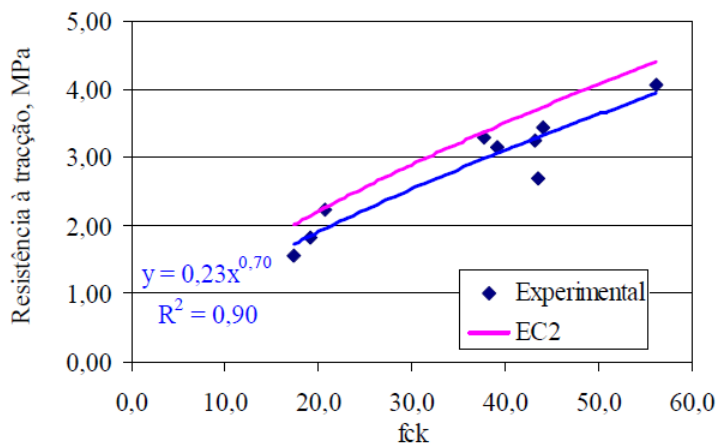


Figura 3.12 - Resistências à tracção por compressão diametral experimentais e previstas no EC2 [155]

Verifica-se assim que os valores de resistência à tracção são da ordem de grandeza dos betões normais vibrados para iguais níveis de resistência à compressão. Contudo, a fórmula mais apropriada para a obtenção desta característica com base na compressão diametral parece ser a apresentada no gráfico, pois é ligeiramente inferior à descrita no EC2 para betões normais vibrados [155].

## d) Síntese

O valor da resistência à tracção para o BAC é semelhante ao do betão corrente vibrado para igual valor de resistência à compressão. Já no caso do betão de alta resistência, em que a resistência à compressão seja superior a 84 MPa, o valor da resistência à tracção não passa dos 5% do valor da resistência à compressão.

## 3.4 - Fadiga

As cargas a que as estruturas estão sujeitas, consoante o intervalo de tempo em que actuam, podem ser classificadas como estáticas ou dinâmicas. As cargas estáticas aumentam ou diminuem muito lentamente e mantêm-se constantes no tempo, já as dinâmicas variam no tempo de forma arbitrária e podem ser de choque ou de fadiga.

As cargas de fadiga são aquelas que, mais ou menos rapidamente no tempo, actuam em muitos ciclos de repetição. A fadiga produz uma alteração das propriedades mecânicas do betão devido aos ciclos repetidos de cargas variáveis. A intensidade dessas cargas não é suficientemente elevada para provocar ruptura apenas numa aplicação mas podem provocá-la em muitos ciclos.

Existem três tipos de ciclos de fadiga importantes, como se pode ver na Figura 3.13: carregamento repetido, carregamento alternado e carregamento ondulado. Qualquer combinação entre estes três também pode provocar fadiga.

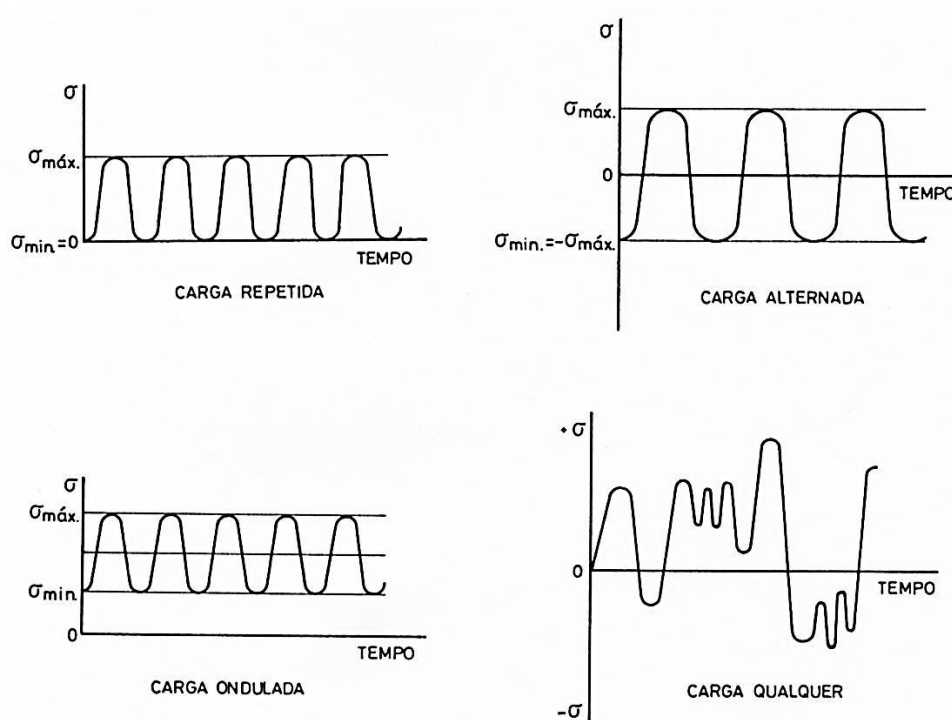


Figura 3.13 - Tipos de cargas de fadiga [40]

Na vida útil de uma obra de várias dezenas de anos, a passagem de cargas rolantes num determinado ponto de um pavimento ou laje ou a acção das ondas numa obra marítima, provocam um momento flector que repetido milhões de vezes pode gerar fadiga. Daí ser importante saber a tensão admissível e o número de repetições para essa carga que a estrutura suporta sem se deteriorar. Até hoje o maior número de ciclos aplicado no betão é de 20 milhões. Para valores superiores desconhece-se o seu comportamento.

### a) Betão normal

Os primeiros estudos realizados sobre a resistência à fadiga foram feitos por Van Ornum, citado em [88, 100], que estabeleceu a base de resistência do betão a este tipo de solicitação. Ele determinou um limite de fadiga de 0,55 da tensão de ruptura estática para 7000 ciclos e observou que o diagrama de extensão-deformação se tornava linear ao fim de poucas repetições de carga. Mais tarde, 50 anos depois, Linger e Gillespie [88] concluíram que essa linearidade ocorria quando se atingia 0,15 do número total de ciclos até à ruptura e que próximo da ruptura essa linha tinha a forma de um S.

A curva de Wöhler do betão marca nas ordenadas a relação entre a tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) num ciclo de fadiga e a tensão de ruptura ( $\sigma_r$ ) que o provete teria se fosse rompido num ensaio estático (Figura 3.13) e em abcissas o número de ciclos que rompe o provete sujeito ao ensaio de fadiga (Figura 3.14).

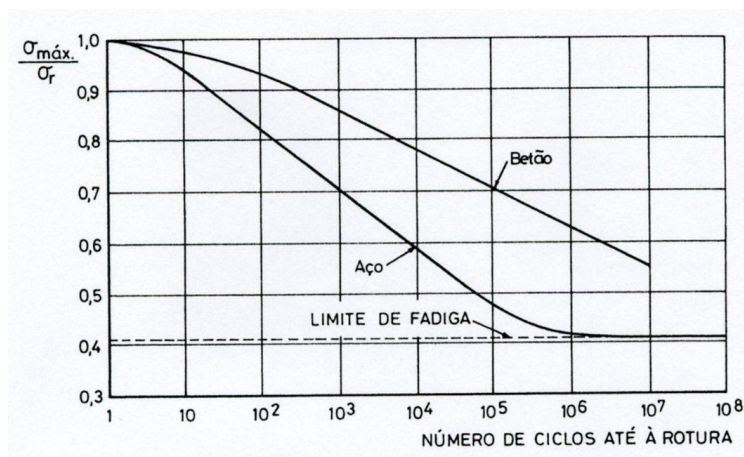


Figura 3.14 - Curvas de Wöhler para o aço e para o betão [40]

Na Figura 3.15 está representado sob a forma do diagrama de Wöhler a influência da amplitude da tensão do ciclo de fadiga no número de ciclos que o betão suporta sem se deteriorar. Observa-se que quando a amplitude é de 0,50 da tensão máxima, que a ruptura ocorre em 50% dos provetes ao fim de 10<sup>7</sup> ciclos e sob uma carga de 0,73 da tensão de ruptura. Quando a amplitude é nula, a tensão máxima é igual à tensão mínima e o ensaio de fadiga torna-se num ensaio de fluência.

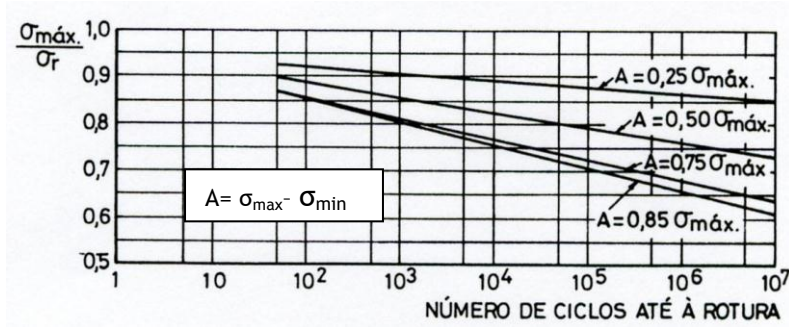


Figura 3.15 - Influência da amplitude da tensão do ciclo de fadiga na resistência à fadiga [40]

O diagrama de Goodman da Figura 3.16 do betão marca em abcissas o valor da tensão mínima do ciclo que provoca a ruptura ao fim de um determinado número de ciclos e em ordenadas o valor da tensão máxima que provoca a ruptura ao fim do mesmo número de ciclos.

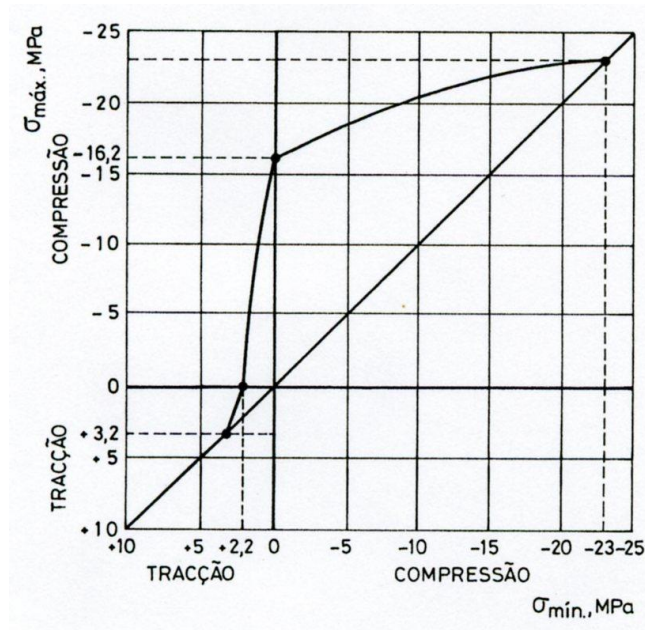


Figura 3.16 - Diagrama de Goodman em valores absolutos das tensões aplicadas nos ensaios de fadiga [40]

No caso do betão, é normal apresentar o diagrama de Goodman modificado apenas no primeiro quadrante porque o comportamento do betão em fadiga é semelhante em compressão, flexão e tracção se for tomado o valor da ruptura estática nesses ensaios. O ponto representado na Figura 3.17 representa a duração de vida em número de ciclos sujeito a um ciclo de carga de tensões máximas e tensões mínimas.

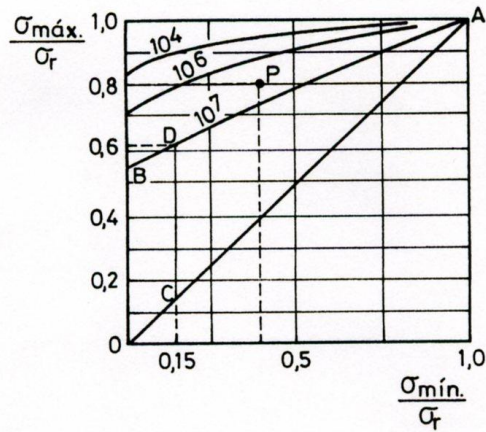


Figura 3.17 - Diagrama de Goodman simples modificado [40]

O módulo de elasticidade vai diminuindo como se pode verificar na Figura 3.18 e essa variação do módulo de elasticidade pode ser usada para determinar o número de ciclos restantes até ocorrer a ruptura.

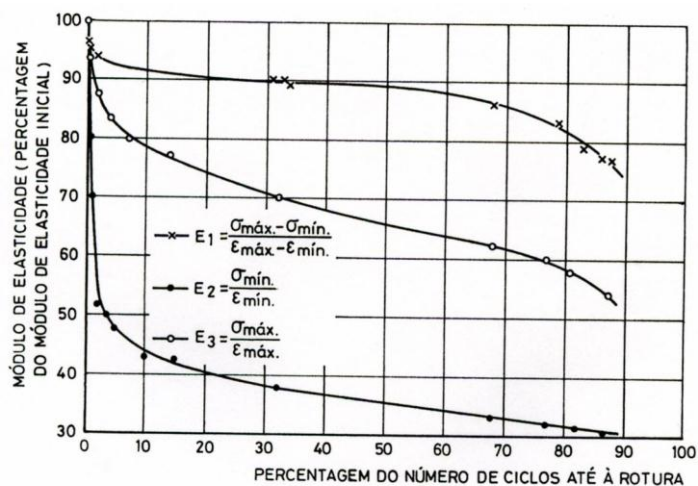


Figura 3.18 - Variação relativa ao valor inicial dos diferentes módulos de elasticidade durante um ensaio de fadiga [40]

## b) Betão de alta resistência

Relativamente à fadiga no betão de alta resistência não foram encontrados quaisquer estudos sobre o assunto.

## c) Betão auto-compactável

À semelhança do que aconteceu no betão de alta resistência, para o betão auto-compactável não foi encontrada qualquer referência bibliográfica acerca da fadiga.

## d) Síntese

Não existem resultados nem bibliografia sobre a fadiga do betão de alta resistência nem do betão auto-compactável.

## 3.5 - Módulo de elasticidade

O betão é um material compósito constituído por duas fases: os agregados e a matriz formada pela pasta de cimento endurecida. As características elásticas e as proporções de cada uma destas fases afectam directamente o módulo de elasticidade dos betões [47]. Seguidamente é tratado esse assunto para o betão vibrado corrente, betão de alta resistência e BAC.

### a) Betão normal

Alguns autores [109] relacionaram o módulo de elasticidade com a tensão de ruptura à compressão e chegaram a seguinte equação:

$$E = 3,8 \times f_{ck} \quad (3.5)$$

Onde:

E - módulo de elasticidade em [GPa].

$f_{ck}$  - valor característico da resistência à compressão aos 28 dias em [MPa].

Após centenas de estudos efectuados por Ros [129], este construiu o diagrama da Figura 3.19 para relacionar a resistência à compressão com o módulo de elasticidade.

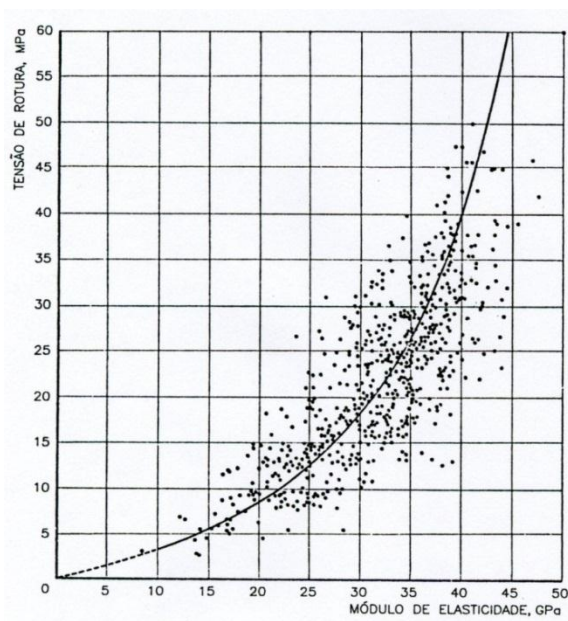


Figura 3.19 - Relação entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura de diferentes betões [40]

## b) Betão de alta resistência

Parrot [122] e Swamy [147] concluíram que o módulo de elasticidade para betões de alta resistência não tem um comportamento igual ao do betão corrente vibrado, e que tem um limite máximo a rondar os 50 GPa.

As fórmulas de cálculo do módulo de elasticidade de alguns códigos como o ACI Comité 318, British Code of Practice e REBAP [12, 112, 113] foram corrigidas por alguns autores [2, 29,135] para valores de resistência à compressão superiores a 41 MPa. Essas fórmulas são as seguintes:

$$E_c = 3320 * f'_c{}^{0,5} + 6900 \text{ MPa} \quad [3] \quad (3.6)$$

$$E_c = 9,1 * f'_c{}^{1/3} \text{ GPa} \quad [21] \quad (3.7)$$

$$E_c = 9500 * f'_c{}^{0,3} \text{ MPa} \quad [67] \quad (3.8)$$

$$E_c = 10000 * f'_c{}^{1/3} \text{ MPa} \quad [31] \quad (3.9)$$

Onde:

$E_c$  - módulo de elasticidade estático.

$f'_c$  - resistência média à compressão medida em cilindros de 15 x 30 cm MPa.

### Betões com sílica de fumo:

A Sílica de fumo não parece influenciar significativamente o módulo de elasticidade [135] e os betões que a contêm, apresentam semelhante ductilidade comparativamente com os que não possuem sílica. Essa ductilidade diminui com boas condições de cura [89].

### Betões com cinzas volantes:

Segundo Mehta [98], betões com cinzas volantes normalmente apresentam módulos de elasticidade superiores aos do betão de referência e isto deve-se ao facto de haver uma menor micro-fissuração na zona de transição entre a pasta e o inerte. Outros autores [72] justificam este acontecimento devido ao efeito pozolânico.

Malhotra *et al.* [91], afirmam que o módulo de elasticidade dos betões com cinzas volantes segue o mesmo comportamento da resistência à compressão, sendo inferiores aos betões de referência nas primeiras idades e superiores nas idades mais avançadas.

### **Betões com pozolanas naturais:**

Betões com pozolanas naturais apresentam geralmente módulos de elasticidade inferiores aos betões de referência sem pozolana [34].

### **Betões com adjuvantes redutores de água:**

Albinger *et al.* [5] referem que a redução da razão A/C conseguida pelos superplastificantes permite triplicar a resistência à compressão e duplicar o módulo de elasticidade. Para o mesmo valor de resistência à compressão, o uso de superplastificantes em nada influencia o módulo de elasticidade [127].

Almeida [9] conclui na sua tese que os betões ensaiados sem adjuvantes apresentaram um módulo de elasticidade situado entre os 39 a 44,5 MPa. Já para betões com adjuvantes esse valor aumentava para os 47,5 a 51 MPa. Concluiu que a maior parte dos betões aos 365 dias apresentavam valores do módulo de elasticidade muito semelhantes aos verificados aos 28 dias. Contudo, nos que continham pozolanas naturais e cinzas volantes, independentemente de terem ou não adjuvante, o módulo de elasticidade aos 365 dias desses betões era superior em cerca de 10% do valor obtido aos 28 dias. O produto que revelou mais efeito no aumento do módulo de elasticidade em comparação com o betão de referência foi o superplastificante. Quanto a aditivos minerais é de realçar as sílicas de fumo nas menores idades com ajuda de adjuvante. No entanto, a longo prazo, os aditivos que se verificaram mais eficazes foram as cinzas volantes e a pozolana natural, também na presença de adjuvante.

A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos betões aos 28 dias apresentou um coeficiente de 0,85 que é considerado bom. Almeida [9] obteve assim uma expressão que difere em muito das estudadas por outros autores.

$$E_c = 5,33 * f'c^{0,5} \text{ GPa} \quad (3.10)$$

Almeida [9] refere ainda que os betões de elevada resistência à compressão quando são submetidos a um determinado carregamento são mais deformáveis que os betões correntes. Os betões de alta resistência apresentam ainda valores de resistência à compressão mais próximos dos valores do módulo de elasticidade que os betões correntes. Tudo isto se deve ao facto de haver menos defeitos na estrutura interna do betão.

### **c) Betão auto-compactável**

Agregados com maiores resistências tendem a fazer aumentar o módulo de elasticidade do betão, no entanto, o módulo de elasticidade tende a diminuir com o aumento da porosidade e da quantidade de pasta usado no betão.

Nos BAC é esperado ter valores inferiores de módulo de elasticidade, uma vez que este é composto por elevada percentagem de material fino e adjuvantes. Sendo, portanto, esperado como valor de referência cerca de 20% inferior o módulo de elasticidade do BAC comparativamente com um betão corrente vibrado com a mesma classe de resistência e produzido com os mesmos agregados [68].

Segundo Vieira [155], os módulos de elasticidade do BAC seguem a mesma ordem de grandeza dos betões correntes vibrados. Usando a fórmula da NP 1992-1-1:2004 e do EC2 [28] para estimar os valores do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), obteve valores experimentais semelhantes aos teóricos para betões correntes vibrados previstos pelo EC2 [28] como se pode verificar na Figura 3.20. A Equação 3.11 foi retirada do EC2 para prever o valor do módulo de elasticidade.

$$E_{cm}=0,22(f_{cm}/10)^{0,3} \quad (3.11)$$

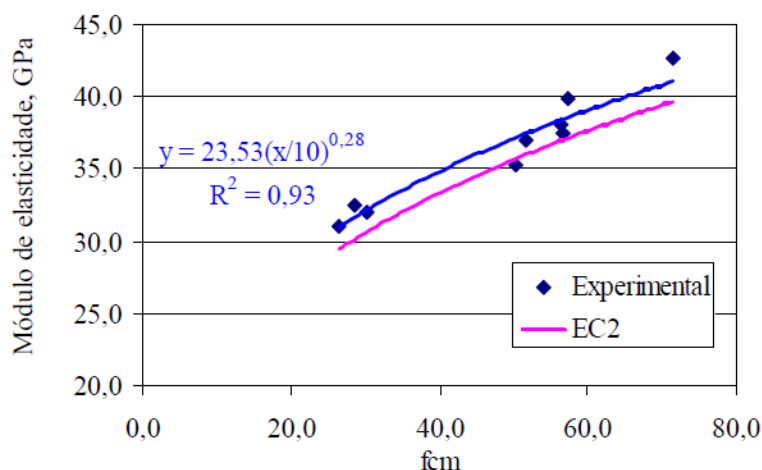


Figura 3.20 - Módulos de elasticidade experimentais e previstos pelo EC2 [155]

Estes resultados contradizem o que foi dito anteriormente, pelo que, mesmo que o volume de agregados grossos do BAC seja inferior ao do betão corrente vibrado, a sua influência negativa no módulo de elasticidade é compensada pela existência de uma matriz mais compacta e por uma interface agregado pasta de melhor qualidade [155].

#### d) Síntese

As conclusões da bibliografia consultada relativamente ao módulo de elasticidade são contraditórias. Essa contrariedade relativa ao maior volume de agregados grossos que deveria resultar num betão com menor módulo de elasticidade é compensada no BAC com uma matriz de pasta mais compacta e de melhor qualidade.

Relativamente aos betões de alta resistência, estes não seguem o mesmo comportamento do betão corrente vibrado em que o valor do módulo da elasticidade aumenta com o aumento da resistência. Os betões de alta resistência não atingem valores superiores ao 50 GPa.

O tipo de aditivo usado influencia o módulo de elasticidade do betão e o que mais beneficia o módulo de elasticidade ao longo do tempo sem presença de adjuvante são as cinzas volantes.

### 3.6 - Fluência

Em engenharia estrutural designa-se fluência como a relaxação do betão. Este é um fenómeno que ocorre para dissipação da energia interna. Fluência é o aumento de extensões no tempo de um elemento de betão endurecido quando submetido a uma tensão constante [46].

A fluência está associada sempre a outra propriedade designada de relaxação. São duas propriedades que decorrem do mesmo fenómeno.

Relaxação é a variação com o tempo da tensão dum sólido sujeito a deformação constante. A relaxação do betão é um fenómeno desejável, pois permite aliviar tensões provocadas pelas variações de volume causadas pelas variações térmicas e pela contracção de secagem.

Fluência é apenas a extensão lenta sob tensão não incluindo as contracções nem extensões instantâneas, a não ser as que foram referidas.

#### a) Betão normal

O betão sofre deformação elástica, plástica e também deformação por fluência. Um betão com idade  $t_0$  quando já se encontra em contracção de secagem  $\delta_0$  devido a uma certa tensão de compressão actuante com valor constante num dado intervalo de tempo  $\Delta t$ , observa-se uma extensão instantânea  $\varepsilon_i$  e outra que aumenta com o passar do tempo que é designada de extensão por fluência  $\varepsilon_f$ , não incluindo a contracção de secagem.

A extensão instantânea  $\varepsilon_i$  é igual à soma das extensões elásticas  $\varepsilon_e$  e plásticas  $\varepsilon_p$ . A extensão elásticas  $\varepsilon_e$  anula-se mal a força que a provocou seja retirada, já a plástica  $\varepsilon_p$  permanece quando a tensão se anula e apenas tem importância no primeiro ciclo de carga.

Quando se procede à descarga no instante  $t_1$ , pode verificar-se na Figura 3.21 uma diminuição instantânea da deformação (extensão elástica de recuperação)  $\varepsilon_{er}$  e uma lenta recuperação com o tempo designada de extensão de fluência de recuperação  $\varepsilon_{fr}$ . A extensão instantânea ocorrida na descarga é inferior à instantânea ocorrida na carga, pois devido ao endurecimento e ao próprio fenómeno de fluência, o módulo de elasticidade aumentou.

Por exemplo, se no instante  $t_2$  se mergulhar em água uma peça sujeita a fluência e uma peça semelhante e conservada nas mesmas condições aquando da medição de contracção de secagem, conclui-se que ambas se expandem. Essa expansão será tanto maior quanto maior a tensão a que o betão esteve submetido.

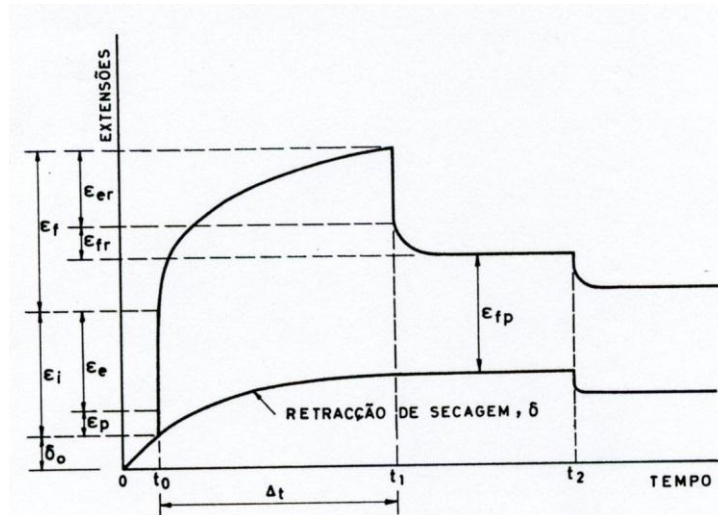


Figura 3.21 - Deformações do betão, instantâneas e em função do tempo [40]

Segundo Lorman [90], que se refere a ensaios feitos por Thomas, se forem comparados betões com a mesma trabalhabilidade mas com dosagens de cimento e água variáveis, o valor da fluência é proporcional ao quadrado do valor de  $A/C$  com máxima dimensão do agregado de 19,1 mm e dosagem de cimento de  $300 \text{ kg/m}^3$  em prismas com  $20 \times 20 \times 61 \text{ cm}$  como se verifica na Figura 3.22.

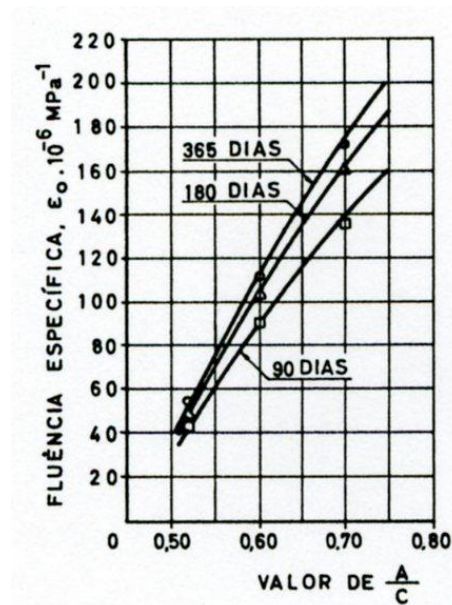


Figura 3.22 - Influência da razão  $A/C$  na fluência do betão [40]

## b) Betão de alta resistência

Todos os factores que afectam a resistência à compressão dos betões afectam igualmente a fluência. Os factores principais são: a dosagem e a natureza do ligante; a relação A/C; a natureza, dosagem e a máxima dimensão dos agregados; o volume de pasta; a aderência do agregado-pasta; as condições do ensaio que variam conforme as dimensões, humidade relativa do ar a que os provetes são submetidos; a idade do betão e a sua intensidade no momento de carga [31, 99].

Os betões que apresentam maiores contracções são os que apresentam maiores fluências, apesar de ambos se deverem a mecanismos diferentes. A fluência é directamente proporcional à variação da razão A/C [31, 99].

Os agregados presentes nos betões são restritores da deformação potencial da pasta, pois maiores volumes de pasta assim como maiores dimensões dos agregados resultam na produção de betões com menores fluências [31, 99].

A fluência dos betões pode ser considerada um aspecto vantajoso ou desvantajoso. Se for prevista com antecedência permite uma correcta distribuição das tensões nas estruturas. No entanto, se essas deformações e flechas originadas pela fluência ultrapassarem os limites, poderão ser necessárias reparações [109].

Ngab *et al.* [112], num estudo efectuado para verificar o comportamento dos betões submetidos a carregamentos constantes após os 60 dias e para resistências à compressão situadas entre os 30 e os 70 MPa, registou fluências específicas situadas respectivamente entre os 80 e  $20 \times 10^{-6}$  MPa<sup>-1</sup>, resultados que Almeida [9] também obteve. Concluíram então que a fluência específica dos betões de alta resistência é aproximadamente de 20 a 25 % da do betão corrente vibrado. No entanto, há autores que referem que esta percentagem pode ir até os 50% [66, 67, 148].

### **Betões com sílica de fumo:**

Ao investigarem o comportamento da fluência, Acker *et al.* [22] substituíram 25% do cimento por sílica de fumo e concluíram que a deformação total desse betão é significativamente menor do que a do betão de referência e a fluência é ligeiramente mais alta 12% do que o betão de referência. Isto poderá significar que a sílica de fumo não é eficiente na redução da fluência. No entanto, outros autores apresentaram valores menores da fluência para estes betões comparativamente com os betões de referência [133, 134, 158]. Esta contradição é possível se a sílica de fumo tiver maior capacidade de fixação de água que o cimento [134].

#### **Betões com cinzas de volantes:**

Os dados acerca da fluência em betões com cinzas volantes são contraditórios, pois uns afirmam que a fluência é maior, menor e igual ao dos betões de referência [101, 120, 159].

#### **Betões com pozolanas naturais:**

Ao substituir 30% de cimento por pozolanas naturais, Coutinho [39] concluiu que a fluência específica deste betão comparativamente com o betão de referência era inferior em 15% aos 60 dias de carga. No entanto com pozolanas artificiais obteve para a mesma idade um aumento da fluência específica de 12%. Para este último caso alterou a natureza do cimento e obteve uma diminuição da fluência até 31% para a mesma idade. Pode então concluir-se que a influência das pozolanas na fluência dos betões depende tanto da sua natureza como da natureza do cimento.

Por outro lado, Costa *et al.* [94] consideram que a fluência é inversamente proporcional à velocidade de endurecimento e, como tal, tendo os betões produzidos com pozolanas um lento endurecimento estes apresentam uma maior fluência do que os betões de referência.

#### **Betões com adjuvantes redutores de água:**

Novamente existem resultados contraditórios, pois tanto se obtiveram altos, baixos e iguais valores de fluência [21, 110]. Almeida [9] é da opinião que a fluência é a característica mecânica do betão que mais depende da natureza dos ligantes utilizados. A utilização do adjuvante superplastificante reduziu sempre a fluência dos betões assim com a utilização dos aditivos, sendo a cinza volante a que menos beneficia a fluência dos betões, já pelo contrário, a maior redução da fluência ocorreu com o uso de sílica de fumo e superplastificante. A fluência revelou-se directamente proporcional às relações  $A/(C+a)$  e aos seus volumes de pasta e inversamente proporcional ao módulo de elasticidade e resistência à compressão.

### **c) Betão auto-compactável**

Chopin *et al.* [30] concluíram que o betão auto-compactável com maior resistência à compressão tem menor retracção. No entanto, comparativamente, o betão corrente vibrado tem menor fluência que o BAC.

### **d) Síntese**

Quanto maior a resistência, menor a fluência do betão. Comparando a fluência do betão auto-compactável com a do betão corrente vibrado, este último tem menor fluência.

### 3.7 - Retracção

A retracção é um fenómeno complexo que depende de vários factores que englobam o meio ambiente que envolve a estrutura, como a temperatura, a humidade e o vento. A escolha dos materiais que constituem o betão influencia em maior ou menor grau a retracção. Um bom processo de cura do betão torna mais difícil a ocorrência de retracção e dificulta mais o aparecimento de fissuras [68].

A retracção pode ser de vários tipos:

- Retracção plástica,
- Retracção química ou de Le Chatelier,
- Retracção por secagem,
- Retracção Autogénea,
- Retracção por carbonatação,
- Retracção térmica.

Os factores que influenciam a retracção são:

- O tipo e natureza do agregado,
- A dimensão da peça,
- As dosagens de cimento e água,
- A humidade relativa do ar,
- A conservação prévia dentro de água e os ciclos alternados de embebição e secagem,
- A percentagem de armadura,
- Os adjuvantes e adições.

Existem adjuvantes redutores de retracção que são compatíveis com os adjuvantes redutores de água e adjuvantes aceleradores de endurecimento. Algumas das características dos adjuvantes redutores de retracção são:

- Os adjuvantes redutores de retracção não substituem um bom processo de cura,
- Agregados finos do betão necessitam de dosagens mais elevadas de adjuvante redutor de retracção,
- Não têm influência no espalhamento nem na perda de ar,
- Têm poucas propriedades de reduzir água,
- As reduções de retracção derivadas da utilização de adjuvantes redutores de retracção são normalmente duradoiras,
- Reduzem em alguns casos as resistências à compressão em cerca de 4% aos 28 dias.

Os benefícios da utilização de adjuvantes redutores de retracção são:

- A redução significativa da retracção até aos 50%,
- Estruturas de betão com maior durabilidade,
- Redução dos custos de construção e de manutenção,
- Redução da permeabilidade,
- Torna as estruturas de betão esteticamente mais agradáveis.

### a) Betão normal

A retracção é uma diminuição das dimensões de uma peça de betão provocada normalmente pela secagem. Essa diminuição deve ser prevista, pois a relaxação do betão é pequena e pode provocar tensões de tracção e consequentemente a fissuração.

#### A retracção nas primeiras 24 horas:

Uma rápida retracção dá-se geralmente entre a 1 e a 3 horas depois da pasta de cimento estar exposta ao ar. Após 4 a 6 horas, depois da presa, a retracção evolui de forma mais lenta, como se pode observar na Figura 3.23 resultante de investigações feitas por L'Hermite [85].

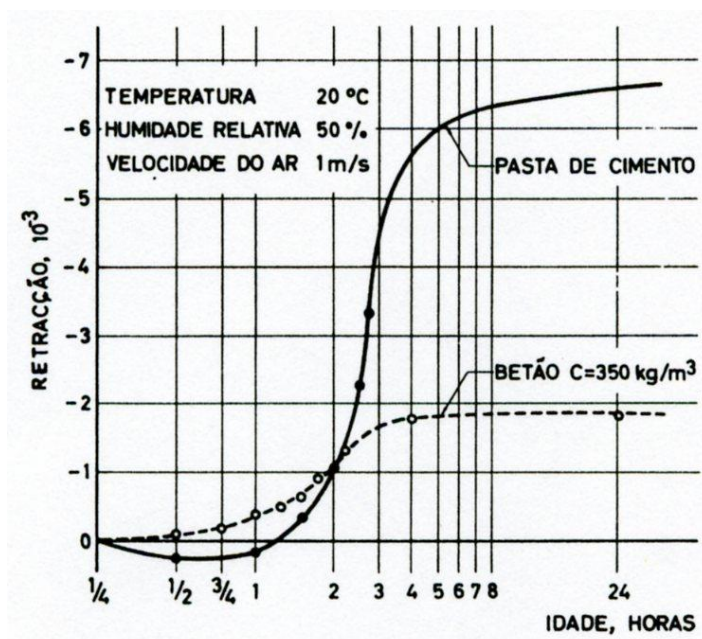


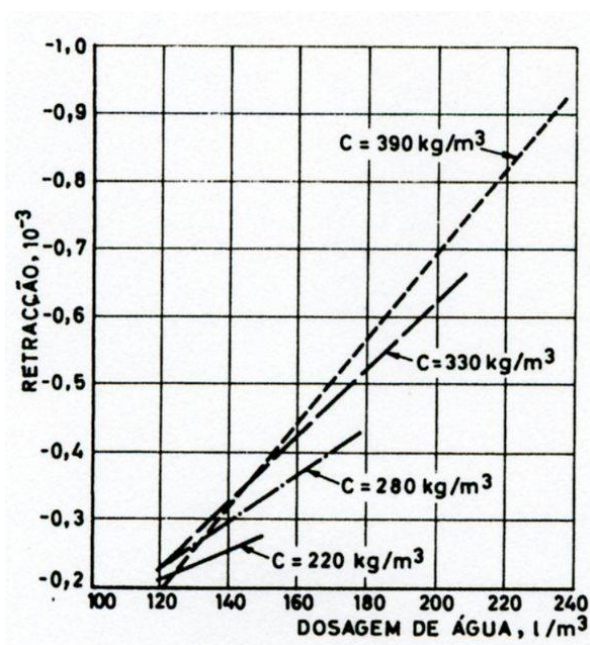
Figura 3.23 - Retracção da pasta de cimento e do betão nas primeiras 24 horas [40]

Para melhores comparações com outras dosagens de cimento pode-se consultar a Tabela 3.1 feita por L'Hermite [85].

**Tabela 3.1** - Influência das dosagens de cimento e água na retracção do betão ao fim de 24 horas [85]

Dosagem de cimento $\text{kg/m}^3$	Retracção ao fim de 24 h $10^{-3}$	Dosagem de água no betão com $C = 350 \text{ kg/m}^3$	Retracção ao fim de 24 h $10^{-3}$
200	-0,8	158	-1
350	-1,6	175	-1,55
500	-2,3	192	-1,6
		210	-1,35

Seguidamente são apresentados dois gráficos elaborados por Fulton [57], que mostram os valores da retracção final em função das dosagens de água (Figura 3.24) e das dosagens de cimento (Figura 3.25). A retracção relativa da pasta, da argamassa e do betão é da ordem de 5 para 2 e para 1.



**Figura 3.24** - Influência da dosagem de água na retracção do betão [40]

A influência da humidade relativa do ar no valor da retracção é também um factor importante a ter em conta. Na Figura 3.26 apresentam-se os resultados obtidos por L'Hermite *et al.* [87] ao avaliar a influência da humidade relativa na variação das dimensões de prismas de betão com  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$ , expostos desde a descofragem na atmosfera respectiva. A dosagem de cimento foi de  $350 \text{ kg/m}^3$ , a razão A/C foi de 0,48 e a máxima dimensão do agregado de 20 mm.

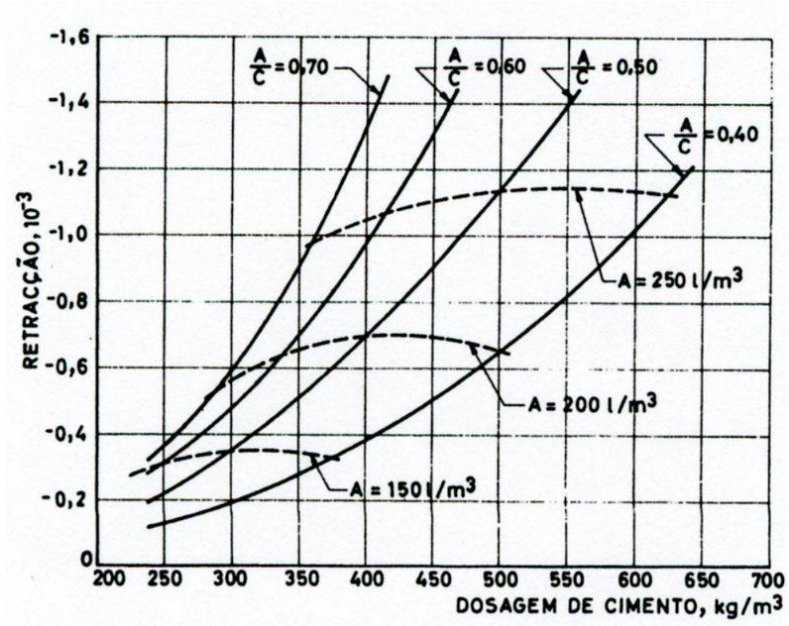


Figura 3.25 - Influência das dosagens de cimento na retracção do betão [40]

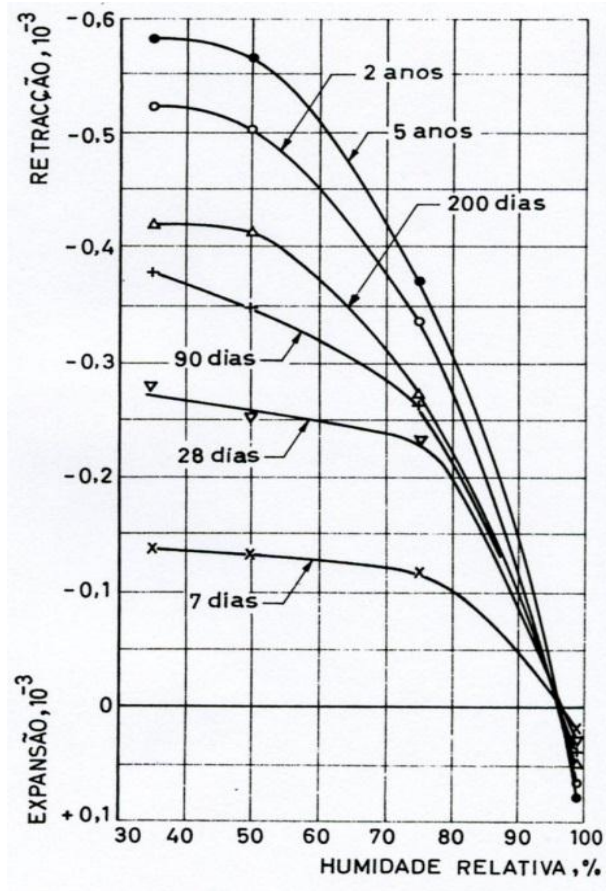


Figura 3.26 - Influência da humidade relativa na variação de dimensões do betão [40]

## b) Betão de alta resistência

Num estudo que permitiu comparar a fissuração de retracção plástica ocorrida nos betões correntes vibrados e nos betões de alta resistência, Samman *et al.* [132], concluiu que devido à menor razão água/ligante dos betões de alta resistência, a perda de água e a taxa de evaporação neste betão era inferior à do betão corrente vibrado, contudo, a perda de água é significativa, concluindo que para temperaturas mais elevadas e vento, as áreas de fissuração plástica eram superiores nos betões de alta resistência tornando-os mais vulneráveis a esta retracção.

A retracção inicial dos betões de alta resistência é superior à ocorrida nos betões normais vibrados até aos 56 a 90 dias. Depois deste tempo a retracção é muito semelhante para os dois tipos de betões. Contudo, a retracção final nos betões de alta resistência tende a ser mais baixa [64].

Em geral, as extensões de retracção de secagem são inversamente proporcionais à razão água/ligante segundo Shiomi *et al.* [139]. Um elevado teor de pasta ligante existente nos betões de alta resistência faz com que a retracção autogénea seja superior à dos betões correntes vibrados, podendo mesmo em alguns casos chegar a ser o dobro [81].

O EC 2 [28] define a extensão de retracção total ( $\epsilon_{cs}$ ) como a soma da extensão de retracção de secagem ( $\epsilon_{cd}$ ) com a extensão de retracção autogénea ( $\epsilon_{ca}$ ) da seguinte forma:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad (3.12)$$

## c) Betão auto-compactável

Skarendahl [141] refere que o BAC sofre uma maior retracção no processo de secagem do que o betão corrente vibrado. O mesmo autor refere ainda que o uso de fíler calcário com um módulo de finura adequado pode reduzir a retracção do BAC [141].

A retracção e a fissuração, como consequência, são reduzidas com a introdução de maior volume de agregado grosso, nunca podendo deixar de existir um volume mínimo de pasta. Uma densa microestrutura da pasta de cimento afecta de forma positiva a retracção, sendo possível alcançar essa maior densidade com a adição de cinzas volantes ou escórias de alto-forno [68, 65].

Almeida [7], num estudo feito para avaliar os efeitos de um adjuvante redutor de retracção, referiu ser possível conceber um BAC com parâmetros fora dos limites dos recomendados pelo Comité Técnico 174-SCC da RILEM e também com o valor total de finos inferiores ao das recomendações dos Guias Europeus.

O mesmo autor, Almeida [7], num estudo da retracção efectuado em betões de 25 MPa de resistência à compressão sem adjuvante redutor de retracção obteve valores de  $0,47 \times 10^{-3}$ , enquanto no mesmo betão, mas com o uso de adjuvante redutor de retracção, (RHEOCURE SFR-2 produzido pela Bettor MBT Portugal SA) obteve o valor de  $0,33 \times 10^{-3}$ . A medição refere-se a valores médios aos 14 dias e, neste caso, o valor da percentagem de redução da retracção com adjuvante redutor foi de 30%. Para as mesmas condições mas usando um betão com 44 MPa de resistência à compressão sem adjuvante obteve  $0,44 \times 10^{-3}$  e, com o uso do mesmo adjuvante anterior, obteve o valor de  $0,34 \times 10^{-3}$ . Também neste caso os valores foram medidos aos 14 dias, tendo-se verificado um valor da percentagem de redução da retracção de 23%. Num betão corrente vibrado o valor da retracção média aos 14 dias é de  $0,192 \times 10^{-3}$ , verificando-se que a retracção para um BAC de mesmo valor de resistência à compressão é sensivelmente 40% superior. Este autor concluiu ainda que efeito de adjuvantes redutores de retracção foi menos eficaz no betão de maior resistência à compressão [7].

Ribeiro *et al.* [84], nos estudos realizados sobre este mesmo tema e utilizando o mesmo adjuvante, verificou que a redução da retracção pode ter valores estimados da ordem de 30% aos 6-9 meses. Também permitiu concluir que a eficiência destes adjuvantes depende da sua dosagem absoluta, da razão A/C e da dosagem de ligante [128].

#### **d) Síntese**

Os betões de alta resistência têm uma maior retracção inicial comparativamente com os betões correntes vibrados, no entanto, essa retracção depois do início é semelhante e a retracção final até chega a ser inferior no betão de alta resistência.

O betão auto-compactável tem por natureza maior valor de retracção do que o betão corrente vibrado. Contudo, esse valor de retracção pode ser reduzido com o auxílio de adjuvantes redutores de retracção.

### **3.8 - Durabilidade**

Durabilidade de um betão significa a capacidade que ele possui em preservar as suas propriedades ao longo da sua vida útil em serviço, isto é, a capacidade que um betão tem em resistir ao meio ambiente, ao ataque de substâncias químicas, à abrasão ou outros processos de deterioração mantendo a sua forma original e a sua qualidade [2].

A durabilidade de um betão depende muito da facilidade com que os líquidos e gases se conseguem mover ou atravessar o betão e este factor designa-se normalmente de uma forma geral por permeabilidade. Ela está ainda dependente da mistura usada na confecção dos betões, pois vai alterar a densidade do betão.

A permeabilidade é um dos factores principais que influenciam a durabilidade e esta dá-se em meio poroso, podendo ocorrer não só por escoamento, mas também por absorção capilar e difusão. Os poros que influenciam a permeabilidade são aqueles em que o seu diâmetro se situa entre os 120 e 160 nm no mínimo e que são contínuos [105].

Existem vários factores que influenciam a durabilidade de um betão. Alguns desses factores são: a permeabilidade, a porosidade, a absorção por capilaridade e a resistência à penetração de cloretos.

Seguidamente irá ser tratado este tema para os betões correntes vibrados, betão de alta resistência e BAC.

### a) Betão normal

A durabilidade, juntamente com a resistência às tensões, é um dos aspectos mais importante num betão. Para medição da porosidade temos dois ensaios, o ISAT e Figg.

O ensaio ISAT (Initial Surface Absorption Test) é descrito pela norma Britânica BS 1881 Part 5, 1970 [95]. Os valores apresentados na Tabela 3.2 permitem comparar a absorção do betão por capilaridade.

**Tabela 3.2** - Resultados típicos do ensaio de absorção superficial  $\text{cm}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  [95]

Absorção do betão	Tempo após o início do ensaio			
	10 min	30 min	1 hora	2 horas
Elevada	> 0,50	> 0,35	> 0,20	> 0,15
Média	0,25 - 0,50	0,17 - 0,35	0,10 - 0,20	0,07 - 0,15
Pequena	< 0,25	> 0,17	> 0,10	> 0,07

O ensaio Figg é descrito na especificação do LNEC E 414 [79] e apresenta as seguintes propostas de classificações como se verifica na Tabela 3.3:

**Tabela 3.3** - Proposta de classificação com base nos resultados do ensaio Figg [79]

Qualidade do betão	Tempo medido em segundos	
	Ar	Água
Má	< 30	< 20
Medíocre	30 - 100	20 - 50
Média	100 - 300	50 - 100
Boa	300 - 1000	100 - 500
Excelente	> 1000	> 500

Senbetta *et al.* [137] extraíram carotes duma estrutura, cortaram discos com 10 mm de espessura e mediram a absorção desses discos. A partir desses dados, elaboraram o gráfico da Figura 3.27 com a variação da absorção em profundidade numa estrutura sem cura e noutra com betão semelhante, mas curado com protecção de uma folha de plástico. A absorção depende das condições de cura. Quanto melhor a cura, melhor o valor da absorção.

Ensaio efectuado no LNEC [52] em prismas com 8x8x33 cm para medir a capilaridade em betões correntes vibrados com dosagens de cimento de 200, 300 e 400 kg/m<sup>3</sup> e duas dosagens de água, máxima dimensão do agregado de 25 mm, com humidade relativa de 50% durante as primeiras 48 horas, ensaiados aos 27 dias, conduziram aos resultados que se apresentam na Tabela 3.4. Quanto menor razão A/C, menor a ascensão e menor absorção capilar tem o betão.

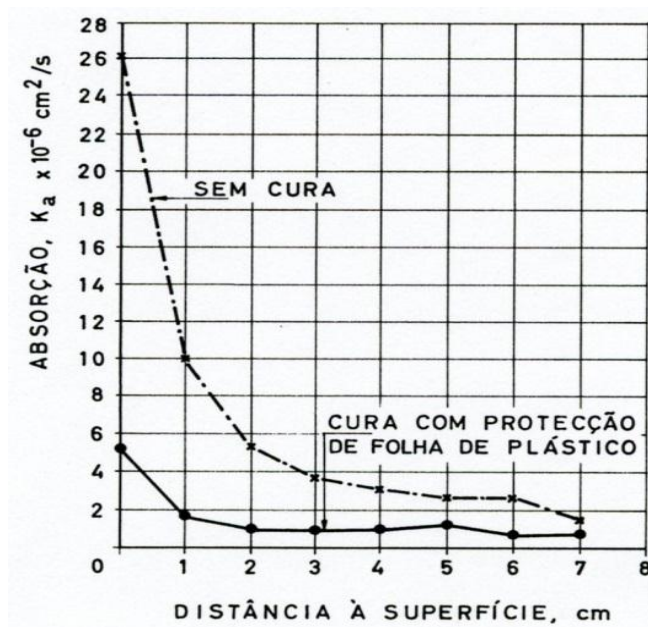


Figura 3.27 - Influência do meio de cura na variação da profundidade [40]

Tabela 3.4 - Características de capilaridade em betões [79]

Dosagem de cimento kg/m <sup>3</sup>	Dosagem de água l/m <sup>3</sup>	Trabalhabilidade graus Vêbê abaixamento em cm	Absorção capilar g/cm <sup>2</sup>	Ascensão capilar máxima obtida
200	166	9º Vêbê	3,06	> 33 cm ao fim de 10 dias
300	166	9º Vêbê	1,18	2,5 cm ao fim de 13 dias
400	166	9º Vêbê	0,74	0,8 cm ao fim d 4 dias
200	212	4 cm	4,46	> 33 cm ao fim de 2 dias
300	200	4 cm	1,57	13 cm ao fim de 5 dias
400	192	4 cm	0,52	10 cm ao fim d 13 dias

A trabalhabilidade de um betão influencia muito a sua permeabilidade. Se a trabalhabilidade for muito baixa, existe uma maior dificuldade de compactação, logo maior permeabilidade. Por isso, é fundamental aumentar a trabalhabilidade mesmo que seja necessário o recurso à água. Por outro lado, a água em excesso aumenta a porosidade e faz crescer a permeabilidade. Seguidamente é apresentado o gráfico da Figura 3.28 que mostra a influência da razão A/C e da máxima dimensão do agregado no coeficiente de permeabilidade de um betão corrente.

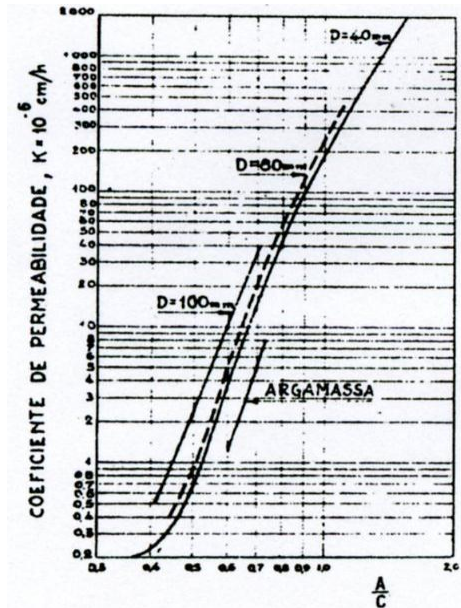


Figura 3.28 - Variação do coeficiente de permeabilidade do betão [40]

Já Powers [110], realizou estudos em betões correntes usando métodos diferentes e obteve valores diferentes para quantidades de água variáveis, como se ilustra na Figura 3.29.

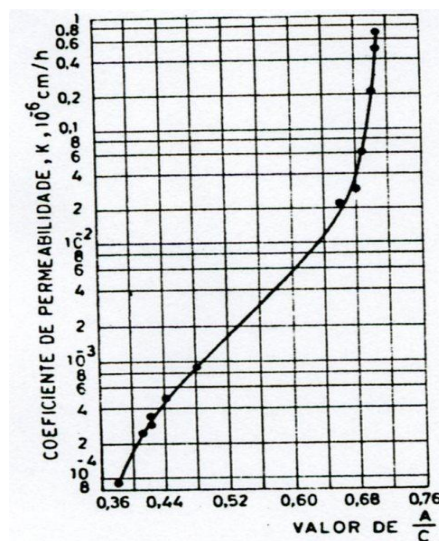


Figura 3.29 - Variação do coeficiente de permeabilidade da pasta de cimento com a dosagem de água [40]

Powers *et al.* [125], ainda descreve coeficientes de permeabilidade para vários agregados como se pode verificar na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5** - Coeficiente de permeabilidade de algumas rochas usadas no betão [125]

Rocha	Massa volúmica g/ cm <sup>3</sup>	Coeficiente de permeabilidade cm/h
Mármore de grão fino	2,7	$2,5 \times 10^{-10}$
Diorito cristalino	2,94	$0,3 \times 10^{-9}$
Calcário cristalino	2,71	$0,5 \times 10^{-9}$
Calcário cristalino: mármore de grão muito fino	2,75	$2,2 \times 10^{-8}$
Quartzite	2,6	$3 \times 10^{-8}$
Calcário, uniforme, puro	2,72	$6 \times 10^{-8}$
Granito cinzento	2,69	$2,1 \times 10^{-7}$
Grés poroso	2,58	$4,8 \times 10^{-7}$
Granito cinzento	2,6	$6,1 \times 10^{-7}$

## b) Betão de alta resistência

A maioria dos autores não têm dúvidas de que a permeabilidade é o parâmetro mais importante para a obtenção de um betão com boa durabilidade [43, 96, 103, 123, 153]. Já outros defendem que factores como a porosidade, a absorção capilar e a estrutura dos poros também devem ser avaliados [153].

A maior preocupação actualmente segundo Negro *et al.* [103] é a corrosão das armaduras e seguidamente a fissuração do recobrimento. A facilidade de penetração do oxigénio, água, dióxido de carbono e cloretos dão início a essa corrosão, daí ser importante também uma correcta espessura de recobrimento.

### Permeabilidade à água:

A permeabilidade depende de vários factores, tais como: a natureza e as dimensões dos agregados; da dosagem, natureza e granulometria do cimento; da relação A/C; da presença de aditivos e adjuvantes na composição do betão; das condições de cura; da idade; da compactação, etc. [38].

Alguns autores afirmam que a substituição parcial do cimento por pozolanas reduz a permeabilidade [108, 36, 92]. Markestad [92] ao trabalhar com sílica de fumo concluiu que esta é um bom aditivo para se conseguir betões extremamente impermeáveis.

No trabalho desenvolvido por Almeida [9], este obteve resultados semelhantes e concluiu ainda que o uso de superplastificantes é responsável por 13 a 50 % da redução da penetração de água a profundidade média. Referiu ainda que a resistência à compressão e a razão A/C não são parâmetros suficientes para definir a permeabilidade mas que, geralmente, maiores resistências à compressão e menores razões de A/C fazem diminuir a permeabilidade.

#### **Absorção por capilaridade:**

A absorção por capilaridade é condicionada por vários factores: pela dosagem e finura do betão; pela razão A/C; pela compacidade; pela idade e condições de cura [38, 149].

Num estudo realizado por Gonçalves [61] com 5 a 10% sílica de fumo como substituição parcial do cimento, este obteve reduções máximas na absorção por capilaridade. Já um estudo com utilização de cinzas volantes realizado por Venuat [154] aponta para um aumento da absorção capilar em cerca de 10 a 20%.

Almeida [9] concluiu que as sílicas de fumo foram as que mais reduziram a absorção capilar, mesmo sendo significativamente, enquanto o uso de pozolanas naturais e cinzas volantes prejudicaram essa absorção negativamente. Contudo, o uso simultâneo de aditivos minerais e de superplastificantes reduziu a absorção capilar entre 1/3 a 1/2 comparativamente ao betão de referência. Afirmou ainda que, contrariamente à literatura escrita, a absorção por capilaridade acaba por ser útil à estimativa da permeabilidade.

### **c) Betão auto-compactável**

#### **Absorção por capilaridade:**

Segundo Sonebi [143], a absorção por capilaridade é mais elevada no betão corrente vibrado do que nos BAC para razões água/cimento e resistências à compressão idênticas. As razões deste acontecimento devem-se à baixa razão água/ligante e ao fíler calcário utilizado que produziu um efeito de enchimento e também devido à utilização de escórias de alto-forno que fez aumentar os produtos de hidratação do cimento. Ainda factores como a dispersão de partículas dos finos e do cimento e uma melhor retenção de água na composição do BAC contribuíram para uma menor absorção superficial [143].

O acabamento superficial também influencia a durabilidade. A dificuldade de controlar a formação de bolhas de ar à superfície do betão prende-se com o facto de o betão ter de possuir simultaneamente elevada viscosidade para impedir a segregação e baixa viscosidade para precaver a formação de poros de ar à superfície [19].

Os estudos feitos por Skarendahl revelam que a zona de transição inter-facial é densa devido à não vibração do BAC, conferindo assim ao BAC maiores resistências e menor difusão de iões de cloro, que juntamente com uma grande utilização de partículas finas vem-se a reflectir numa maior durabilidade que advém da redução de penetração de cloretos, reduzida carbonatação, entre outros. [141].

#### **d) Síntese**

O betão auto-compactável foi criado a pensar sobretudo no aumento da durabilidade das estruturas. O facto de ser um betão com uma pasta mais compacta, mais homogénea que não necessita de vibração faz com que absorção por capilaridade e a sua porosidade sejam inferiores comparativamente com o betão corrente vibrado e com o betão de alta resistência.

### **3.9 - Conclusões**

De uma forma global relativamente às propriedades endurecidas pode-se concluir que o betão auto-compactável é o melhor betão e o que o seu uso é em tudo benéfico comparado com o betão de alta resistência e betão corrente vibrado, no entanto, não é o mais fácil nem o mais barato de produzir.

Devido à grande variedade e possibilidades de produção, não se pode dizer qual o melhor aditivo a usar, pois para umas propriedades um é melhor, mas depois para outro é pior. Neste tema ainda há muito a pesquisar.

Os códigos existentes usados para o betão corrente vibrado podem ser usados para calcular as propriedades do betão auto-compactável, no entanto não é exacto.



## Capítulo 4 - Modelos de previsão das propriedades do BAC no estado endurecido

### 4.1 - Introdução

Comparando o betão corrente vibrado com o betão auto-compactável, este último apresenta geralmente maior teor de materiais finos, maior teor de agentes redutores de água, menor teor de agregado, menor dimensão de agregado grosso e maior volume de pasta [119].

Essas características da composição do BAC afectam as suas propriedades no estado fresco mas também as propriedades o estado endurecido. É geralmente considerado que as propriedades mecânicas do BAC e dos betões correntes vibrados são semelhantes. Porém, as opiniões sobre esse tema são diversas, pelo que são necessárias muito mais pesquisas. Vários estudos comparando as propriedades do BAC com o betão corrente vibrado no estado endurecido não são unânimes, como se discutiu no Capítulo 3 desta dissertação.

Attiogbe *et al.* [17] concluíram que o betão corrente vibrado e o BAC têm módulos de elasticidade equivalentes. Por outro lado, Holschemacher e Klug [69] indicam que o módulo de elasticidade do BAC é inferior ao do betão corrente vibrado.

Quanto à resistência à tracção, o código da Nova Zelândia NZS 3106:2006 [111] relata que o BAC e o betão corrente vibrado têm resistências à tracção equivalentes. No entanto, Martí *et al.* [93] indicam que a resistência à tracção do BAC é maior.

Para o módulo de ruptura, Leemann e Hoftmann [83] determinaram que esse módulo era semelhante tanto para o BAC como para o betão corrente vibrado. Já Turcry *et al.* [151] refere que o módulo de ruptura para o BAC é maior.

As diferenças das propriedades mecânicas do BAC e do betão corrente vibrado podem ser atribuídas a três características principais: modificações na composição da mistura, melhoria da microestrutura do betão e à não necessidade de vibração quando betonado.

As modificações na composição do BAC referem-se ao alto teor de pasta contendo materiais finos, baixa razão A/C e baixa razão A/(materiais finos), baixo teor de agregado, menores dimensões de agregados, uso de adjuvantes redutores de água e ajudantes modificadores de viscosidade. A melhoria da microestrutura pode ser atribuída às características da pasta e à baixa porosidade da zona de transição entre o agregado e a pasta.

A baixa razão A/(materiais finos), juntamente com o adjuvante redutor de água necessário para obter uma adequada fluidez, favorece uma mais compacta e homogénea zona de transição, o que resulta em melhores características mecânicas. E como no BAC não há necessidade de vibração, problemas que poderiam ocorrer como a segregação e formação de vazios são evitados.

Considerando que as propriedades mecânicas do BAC podem variar em relação às do betão corrente vibrado e como os modelos de cálculo para essas propriedades não foram adaptados ao BAC, é necessário avaliar a sua viabilidade de cálculo para o BAC.

Neste capítulo foram analisados 4 estudos realizados por vários autores. Esses estudos dividem-se em duas partes. Na primeira parte são comparadas e analisadas algumas das propriedades do BAC no estado endurecido como a resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de rotura, módulo de elasticidade. Nesta parte estão incluídos o primeiro e segundo estudo. Na segunda parte são abordadas e comparadas a fluência, o coeficiente de fluência, a retracção e a porosidade. Dela fazem parte o terceiro e quarto estudo.

O primeiro estudo (secção 4.2) levado a cabo por Vilanova *et al.* [157] avalia e compara os valores de uma base de dados com modelos de estimativa para o módulo de elasticidade, a resistência à tracção e o módulo de ruptura.

No segundo estudo (secção 4.3) realizado por Almeida *et al.* [8] são comparados os valores obtidos experimentalmente com os valores de previsão de alguns códigos e propostas de alguns autores. Essa comparação é feita para a resistência à compressão, resistência à tracção e módulo de elasticidade.

O terceiro estudo (secção 4.4) foi feito por Núñez *et al.* [115] e avalia os valores experimentais e compara-os com alguns modelos existentes para a fluência e para a retracção.

O quarto estudo (secção 4.5) elaborado por Leemann *et al.* [84] compara a fluência, o coeficiente de fluência e a retracção entre 3 tipos de betão corrente vibrado e 3 tipos de betão auto-compactável com o mesmo tipo de cimentos.

## **4.2 - Estudo de Vilanova *et al.***

### **4.2.1 - Objectivos e descrição do estudo**

Para esse estudo foi necessário construir uma extensa base de dados para que os resultados da análise não se baseassem em resultados experimentais mas sim numa amostra representativa de grande dimensão. Este estudo pretendeu avaliar a aplicabilidade dos códigos existentes usando a base de dados construída.

A base de dados usada por Vilanova [156] inclui as dosagens e as propriedades mecânicas de 138 diferentes referências. A maioria das referências foram publicadas em artigos, revistas científicas, simpósios, teses de doutoramento e publicações de centros de investigação. A base de dados inclui um total de 627 misturas para a resistência à compressão, 193 para o módulo de elasticidade, 165 para resistência à tracção indirecta e 59 para o módulo de ruptura. Foi compilada a maior base de dados possível até à data sobre o BAC. Foram incluídos na base de dados só as misturas de que se conhecia a sua composição e pelo menos uma das suas propriedades analisadas. A dosagem de cimento das misturas varia entre 133 e 665 kg/m<sup>3</sup> e com valor médio de 374. A razão A/C varia entre 0,26 e 1,34 com valor médio de 0,51. As adições variam de 0 a 490 kg/m<sup>3</sup> com valor médio de 158. No ensaio de espalhamento (slump-flow), os diâmetros variavam entre 381 e 864 mm com valor médio de 699 mm. Vilanova [156] na sua tese inclui uma detalhada informação sobre as misturas utilizadas e as suas características.

#### 4.2.2 - Modelos de referência

Seguidamente são apresentados alguns dos modelos que permitem estimar as propriedades mecânicas do BAC: ACI [12, 13], Eurocódigo 2 [54], o código da Nova Zelândia NZS 3106:2006 [111] e o código do Canadá CSA A23.3-04 [41]. Estes modelos representam os códigos de referência mundial (ACI e EC2) e outros dois códigos de países anglo-saxónicos. Na Tabela 4.1 estão representados as equações de estimativa dos vários códigos para as propriedades relativas a este estudo.

É importante referir que para se estimar as mesmas propriedades em todos os códigos foi necessário fazer o ajuste em alguns modelos. O EC2 e o CSA A23.3-04 estimam valores para a resistência à tracção directa. Para converter para uma resistência à tracção considerou-se que a tracção directa é 90% da tracção indirecta. No caso do EC2 foi também necessário converter a resistência característica  $f_{ck}$  para a resistência à compressão média  $f_{cm}$  usando a seguinte expressão [54]:

$$F_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

No EC2 o módulo de ruptura é definido em termos da resistência à tracção média e à altura média dos elementos. A resistência à tracção média foi convertida em resistência à compressão média pela seguinte equação:

$$F_{ctm} = 0,3(f_{cm} - 8 \text{ MPa})^{2/3} \quad (4.2)$$

A altura considerada foi de 150 mm e substituída na equação original.

Tabela 4.1 - Valores estimados de diferentes Códigos [157]

Propriedade Mecânica	Código	Modelo de Estimativa	Unidades
Módulo de Elasticidade	ACI 318-08	$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c}$	$f'_c$ (MPa) $E_c$ : MPa)
	EC2	$E_c = 22(f_{cm}/10)^{0,3}$	$f_{cm}$ (MPa) $E_c$ : GPa)
	NZS 3101:2006	$E_c = 3320 \cdot \sqrt{f'_c} + 6900$	$f'_c$ (MPa) $E_c$ : MPa)
	CSA A23.3-04	$E_c = 4500 \cdot \sqrt{f'_c}$	$f'_c$ (MPa) $E_c$ : MPa)
Resistência à tracção indirecta	ACI 363R-08	$f_{ct,sp} = 0,59(f_{cm})^{1/2}$	$f_{cm}$ (MPa) $f_{ct,sp}$ : MPa)
	EC2	$f_{ct,sp} = 1,3(f_{cm} - 8 \text{ MPa})^{2/3}$	$f_{cm}$ (MPa) $f_{ct,sp}$ : MPa)
	NZS 3101:2006	$f_{ct,sp} = 0,54(f'_c)$	$f'_c$ (MPa) $f_{ct,sp}$ : MPa)
	CSA A23.3-04	$f_{ct,sp} = 0,67(f'_c)$	$f'_c$ (MPa) $f_{ct,sp}$ : MPa)
Módulo de ruptura	ACI 363R-08	$f_{cft} = 0,94(f_{cm})^{1/2}$	$f_{cm}$ (MPa) $f_{cft}$ : MPa)
	EC2	$f_{ct,fl} = 0,435(f_{cm} - 8 \text{ MPa})^{2/3}$	$f_{cm}$ (MPa) $f_{ct,fl}$ : MPa)
	NZS 3101:2006	$f_{cft} = 0,8 \cdot \sqrt{f_{cm}}$	$f_{cm}$ (MPa) $f_{cft}$ : MPa)
	CSA A23.3-04	$f_{cft} = 0,6 \cdot \sqrt{f_{cm}}$	$f_{cm}$ (MPa) $f_{cft}$ : MPa)

$E_c$ : módulo de elasticidade do betão aos 28 dias.  $f'_c$ : resistência à compressão do betão aos 28 dias.  
 $f_{cm}$ : valor médio da resistência à compressão do betão aos 28 dias.  $f_{ct,sp}$ : tracção indirecta do betão aos 28 dias.  $f_{cft}$ : módulo de ruptura do betão aos 28 dias.  $f_{ct,fl}$ : módulo de ruptura do betão aos 28 dias (EC2).

### 4.2.3 - Comparação dos modelos de referência

Na Figura 4.1, o módulo de elasticidade para todas as misturas incluídas na base de dados correspondem à melhor curva de ajuste representada em termos de resistência à compressão. Essa figura também inclui a relação entre os vários códigos de estimativa. Pode-se observar que a curva correspondente ao ACI 318-08 se ajusta melhor à curva de ajuste com valores experimentais mas apenas para valores de resistência à compressão inferiores a 50 MPa. Para valores superiores a 50 MPa esse modelo sobrestima o valor do módulo de elasticidade do BAC.

O EC2 sobrestima o valor do módulo de elasticidade para valores inferiores a 90 MPa e essa diferença diminui conforme diminui a resistência à compressão. No caso da NZS 3101:2006, o módulo da elasticidade é subestimado, sendo no entanto essa estimativa mais precisa para valores de resistência à compressão mais baixos do que para valores mais altos. O CSA A23.3 adapta-se bem à curva de melhor ajuste experimental, mas subestima ligeiramente o valor do módulo da elasticidade para valores de resistência à compressão inferiores a 60 MPa.

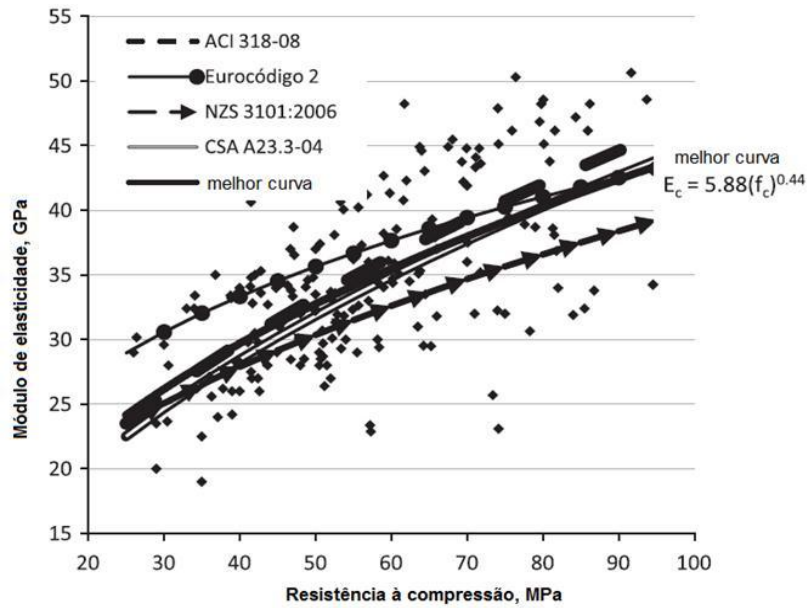


Figura 4.1 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão das misturas da base de dados e dos diferentes modelos de cálculo, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

A Figura 4.2 ilustra uma relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade da curva de melhor ajuste dos valores experimentais com cada um dos códigos comparados. O valor mais “apetecível” seria uma linha horizontal no valor 1. O EC2 sobrestima o módulo de elasticidade e essa sobrestimativa é superior para valores de resistência à compressão mais baixos com um valor máximo de 20%. Essa sobrestimativa diminui com o aumento da resistência à compressão. O NZS 3101:2006, em geral, subestima o módulo de elasticidade, sendo que essa subestimativa aumenta com o aumento da resistência à compressão até valores de cerca de 10% menos. O CSA A23.3 e o ACI 318-08 estimam bons valores do módulo de elasticidade para o BAC, sendo o ACI 318-08 mais preciso para valores mais baixos de resistência à compressão e o CSA A23.3 mais preciso para valores mais altos de resistência à compressão.

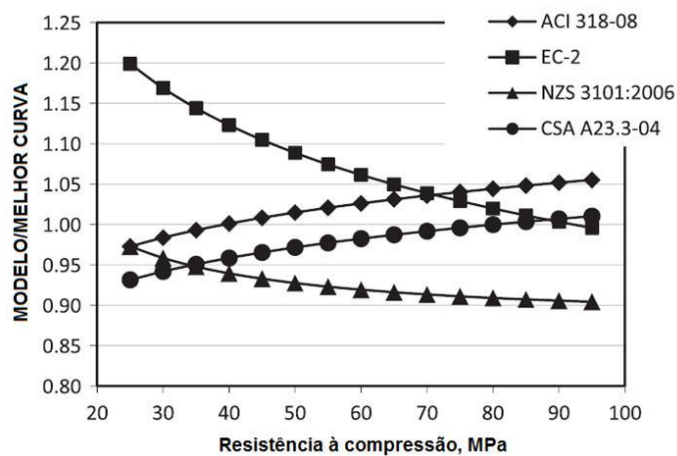
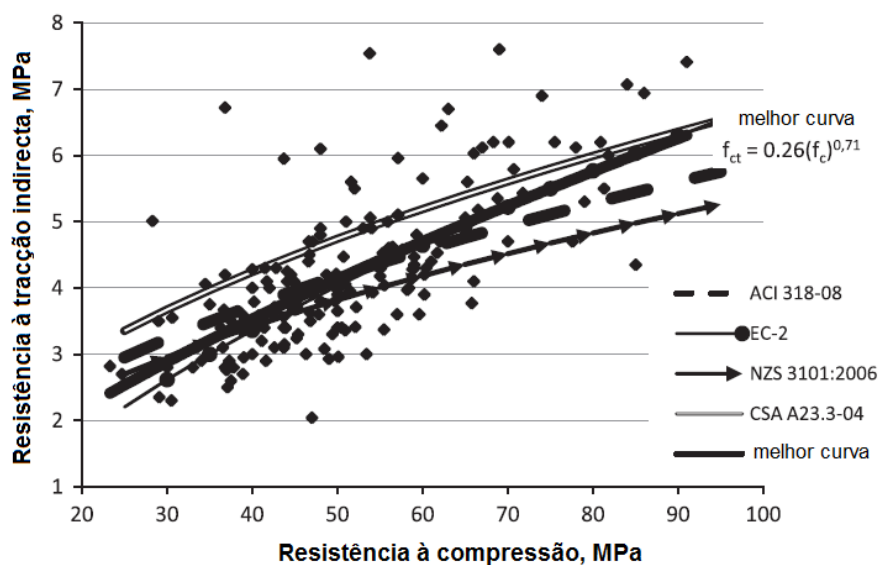


Figura 4.2 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos vários modelos relativamente à melhor curva dos valores experimentais, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

Na Figura 4.3 a resistência à tracção para todas as misturas incluídas na base de dados correspondem à melhor curva de ajuste representada em termos de resistência à compressão. Essa figura também inclui a relação entre os vários códigos de estimativa.

Pode-se observar que a curva correspondente ao ACI 318-08 sobrestima a resistência à tracção para valores de resistência à compressão inferiores a 50 MPa, mas, para resistências à compressão superiores, essa curva subestima a resistência à tracção. A diferença entre a melhor curva de ajuste dos valores experimentais com os valores calculados aumenta com o aumento da resistência à compressão. No caso do EC2, para resistências à compressão abaixo dos 60 MPa, os valores estimados estão abaixo da curva dos valores experimentais, e para valores de resistência à compressão superiores a 70 MPa os valores calculados coincidem com os valores experimentais. Para o NZS 3101-2006 os valores de cálculo coincidem com os valores da resistência à tracção do BAC para valores de resistência à compressão inferiores a 50 MPa. A partir desse valor da resistência à compressão, o valor da resistência à tracção é subestimado cada vez mais. Quanto ao CSA A23.4-04 pode observar-se que esse código sobrestima sempre o valor da resistência à tracção.

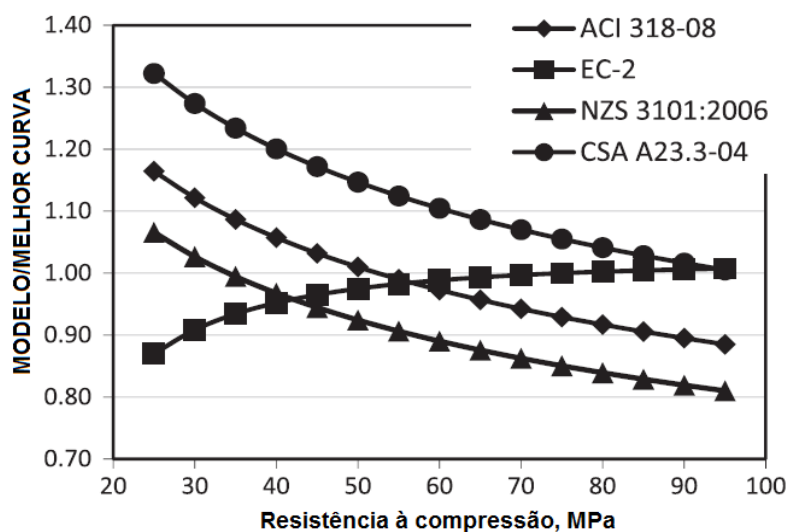


**Figura 4.3** - Relação entre resistência à tracção indirecta e a resistência à compressão das misturas da base de dados e dos diferentes modelos de cálculo, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

A Figura 4.4 mostra uma relação entre a resistência à compressão e a resistência à tracção da curva de melhor ajuste dos valores experimentais com cada um dos códigos comparados. Como se pode verificar, o EC2 tem a melhor aproximação à curva dos valores experimentais. Para valores de resistência à compressão superiores a 40 MPa, entre o valor calculado para a resistência à tracção e os valores experimentais existe apenas uma diferença compreendida de 0 - 5%, já para valores inferiores a 40 MPa essa diferença pode aumentar até cerca de 13%.

No caso do ACI 363R-08 o valor da resistência à tracção pode estar sobrestimada até os 17% para valores de resistência à compressão inferiores, enquanto para resistências à compressão superiores o valor da resistência à tracção é subestimado até 12%. O CSA A23.4-04 sobrestima a resistência à tracção até 32% para baixas resistências à compressão, essa sobrestimação diminui à medida que a resistência à compressão aumenta.

O NZS 3101-2006 subestima o valor da resistência à tracção até 20% com o aumento da resistência à compressão, a partir do valor de 35 MPa. Para resistência de compressão inferior a 35 MPa a resistência à tracção é sobrestimada cerca de 8%.



**Figura 4.4** - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tracção dos vários modelos relativamente à melhor curva dos valores experimentais, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

Na Figura 4.5 o módulo de ruptura para todas as misturas incluídas na base de dados correspondem à melhor curva de ajuste representada em termos de resistência à compressão. Essa figura também inclui a relação entre os vários códigos de estimativa. Como se observa, o ACI 363R-08 sobrestima o módulo de ruptura para valores de resistência à compressão inferiores a 70 MPa, enquanto para valores superiores o módulo de ruptura é ligeiramente subestimado. O EC2 geralmente subestima o módulo de ruptura para todas as classes de resistência. O NZS 3101-2006 ajusta-se bem aos valores experimentais do módulo de ruptura para valores de resistência à compressão inferiores a 40 MPa, enquanto para resistências superiores o valor do módulo de ruptura é subestimado, sendo que essa diferença aumenta com o aumento da resistência. O CSA A23.3-04 subestima substancialmente o módulo de ruptura.

A Figura 4.6 mostra uma relação entre a resistência à compressão e o módulo de ruptura da curva de melhor ajuste dos valores experimentais com cada um dos códigos comparados.

No caso do ACI 363R-08 há uma sobrestimação do módulo de ruptura máxima de 23% para betões de baixa resistência e uma subestimação máxima de 5% para betões com maior resistência. No caso de EC2 as diferenças variam de uma subestimação do módulo de ruptura de 25% para betões de baixas resistências até 10% para betões com maior resistência. O NZS 3101-2006 sobrestima em cerca de 3% o módulo de ruptura para betões de menor resistência e subestima até 20% esse valor para betões de maiores resistências. O CSA A23.3-04 subestima o módulo de ruptura em 22% para betões de menor resistência e esse valor aumenta até 39% com o aumento da classe de resistência.

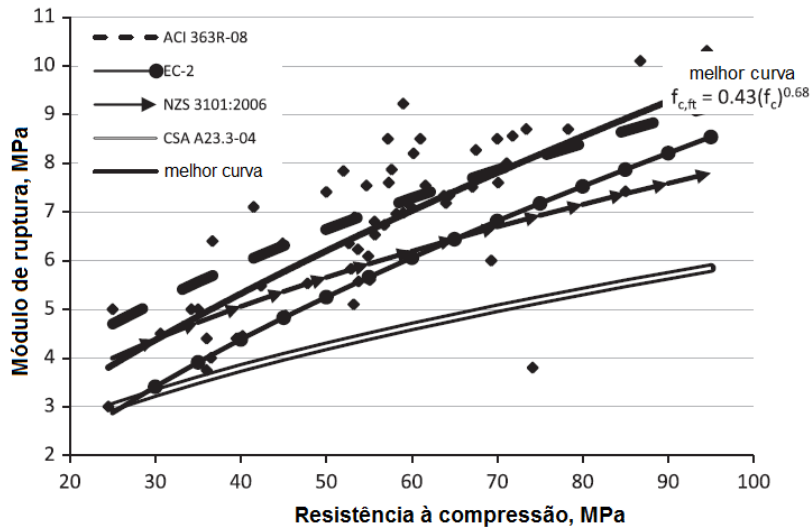


Figura 4.5 - Relação entre o módulo de ruptura e a resistência à compressão das misturas da base de dados e dos diferentes modelos de cálculo, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

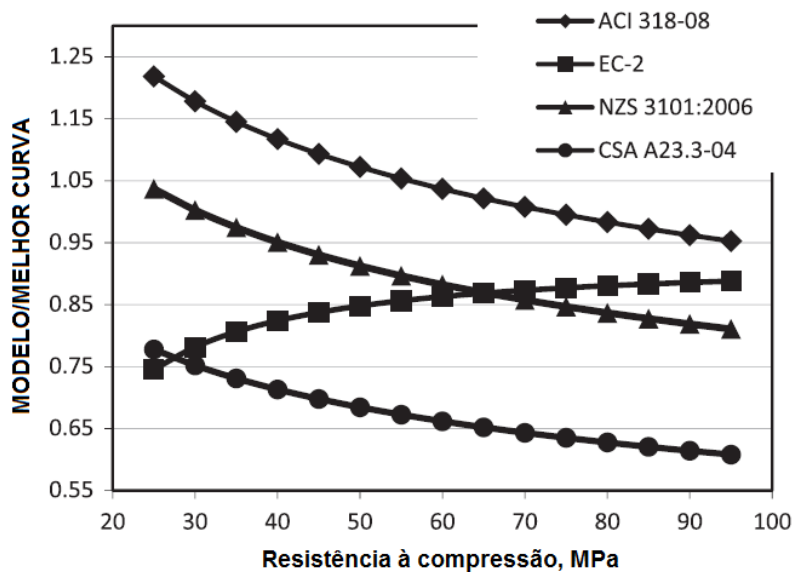


Figura 4.6 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de ruptura dos vários modelos relativamente à melhor curva dos valores experimentais, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

#### 4.2.4 - Comparação entre os valores experimentais e os valores estimados através dos modelos de referência

A seguir apresenta-se a comparação entre os valores obtidos experimentalmente, contidos na base de dados, e os valores calculados nos diversos códigos analisados. Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 estão representados os gráficos de cada propriedade separados por código, onde o alvo de desvio limite é de  $\pm 30\%$  entre os valores medidos e os calculados. Neste tipo de análise, o melhor modelo que estima as propriedades mecânicas é o que tem mais pontos em torno da linha de referência ( $x = y$ ) e com uma margem de desvio de 30%.

Esta análise incluiu ainda a linha de melhor ajuste calculada por regressão linear. Nesta análise são consideradas duas condições: com e sem termo independente. A segunda condição, sem o termo independente, calcula o ajuste da melhor linha que passa no eixo do gráfico e isto dá a tendência geral do modelo em comparação com a linha de referência. A primeira condição, com o termo independente, permite avaliar a capacidade do modelo para discriminar a variabilidade dos resultados.

A Figura 4.7 inclui uma relação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores calculados para os diferentes modelos estimados para o módulo de elasticidade. Avaliando a distribuição dos pontos, observa-se que para todos os modelos a maioria dos pontos estão situados dentro das margens dos 30 % de desvio. No caso do EC2 e ACI existem alguns pontos acima do limite dos 30 %, o que significa que os valores calculados são maiores do que os experimentais. No caso do NZS 3101:2006 e CSA A23.2-04, existem alguns pontos abaixo e acima dos limites impostos.

Comparando a linha que melhor se ajusta sem termo independente, pode-se observar que no caso do EC2 e ACI 318-08 o declive da linha é aproximadamente 1. Para o CSA A23.2-04 o declive dessa mesma recta é de 0,95 e para o NZS 3101:2006 é de 0,89.

Quanto à linha que melhor se ajusta com termo independente, pode-se observar que para todos os modelos a inclinação da linha é inferior e é mais horizontal. Isto reflecte a tendência de todos os modelos terem valores dentro de uma faixa estreita, em comparação com os valores experimentais que se espalharam por uma ampla gama de valores. Todos os modelos têm uma capacidade limitada para estimar valores não centrados em volta da média. Este fenómeno também pode ser verificado na Tabela 4.2.

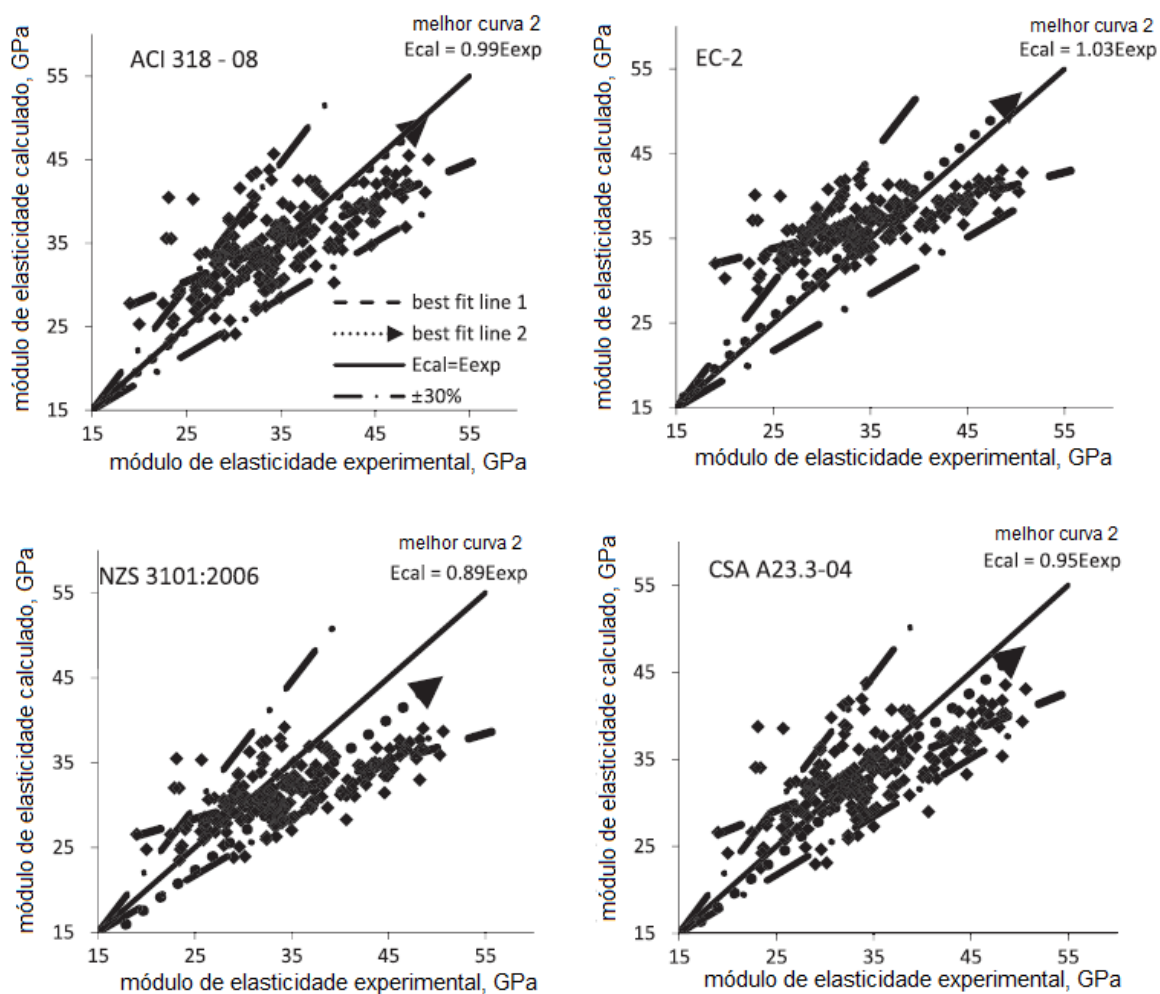


Figura 4.7 - Relação entre o módulo de elasticidade dos valores calculados e dos valores experimentais para os diferentes modelos, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

Tabela 4.2 - Módulo da elasticidade, parâmetros estatísticos para avaliação de diferentes modelos de cálculo [157]

	Módulo de Elasticidade (GPa)				
	Experimental	Calculado			
		ACI 318-08	EC2	NZS 3101:2006	CSA A23.3-04
Mínimo	19,00	23,50	28,96	23,50	22,50
Máximo	50,64	45,70	43,16	39,18	43,75
Média	34,57	34,94	36,66	31,58	33,46
Desvio Padrão	6,73	4,93	3,12	3,48	4,72

O módulo de elasticidade médio do ACI 318-08 é muito próximo da média experimental, com valores de 34,94 GPa e 34,57 GPa respectivamente. O EC2 Sobrestima a média experimental com médio de cálculo de 36,66 GPa. O CSA A23.2-04 e o NZS 3101:2006 subestimam o valor médio experimental com valores de 33,46 GPa e 31,58 GPa. Para todos os modelos o desvio padrão calculado é menor do que o do desvio padrão experimental que tem um valor de 6,73.

Pode-se considerar pelo procedimento de estudo que o modelo de cálculo mais preciso para cálculo do módulo de elasticidade do BAC é o ACI 318-08 e o menos preciso é o NZS 3101:2006.

A Figura 4.8 inclui uma relação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores calculados para os diferentes modelos estimados para a resistência à tracção.

Avaliando a distribuição dos pontos, pode-se observar para todos os modelos que a maioria dos pontos está localizada dentro do limite indicado de  $\pm 30\%$ . No caso do ACI 363R-08, EC2 e NZS 3101:2006 existem alguns pontos abaixo da margem dos  $\pm 30\%$ , que significa que esses valores calculados são inferiores aos experimentais. No caso do CSA A23.2-04, há um grupo de pontos acima da margem dos  $\pm 30\%$ .

Comparando a linha que melhor se ajusta sem termo independente, a linha 2, pode-se observar que as linhas do CSA A23.2-04, ACI 363R-08 e EC2 têm inclinações próximas de 1, com valores de 1,06, 0,94 e 0,92 respectivamente. O NZS 3101:2006 tem uma inclinação menor de 0,83 o que indica uma subestimação do cálculo para a resistência à tracção.

Quanto à linha que melhor se ajusta com termo independente, a linha 1, pode-se observar que em todos os modelos a linha é menos inclinada, tornando-se mais horizontal.

Os resultados calculados estão dentro de uma faixa estreita de valores em comparação com os registos experimentais que se espalharam por uma ampla gama de valores.

Comparando os parâmetros da Tabela 4.3, pode-se observar que a resistência média à tracção do ACI 363R-08 e do EC2 são muito próximos da média experimental com valores de 4,18 MPa, 4,05 MPa e 4,18 MPa respectivamente, O CSA A23.2-04 sobrestima a resistência média à tracção com um valor de 4,72 MPa, enquanto o NZS 3101:2006 subestima essa resistência média à tracção para valores de 3,83 MPa. Para todos os modelos, o desvio padrão calculado é inferior ao experimental que tem um valor de 1,16 MPa.

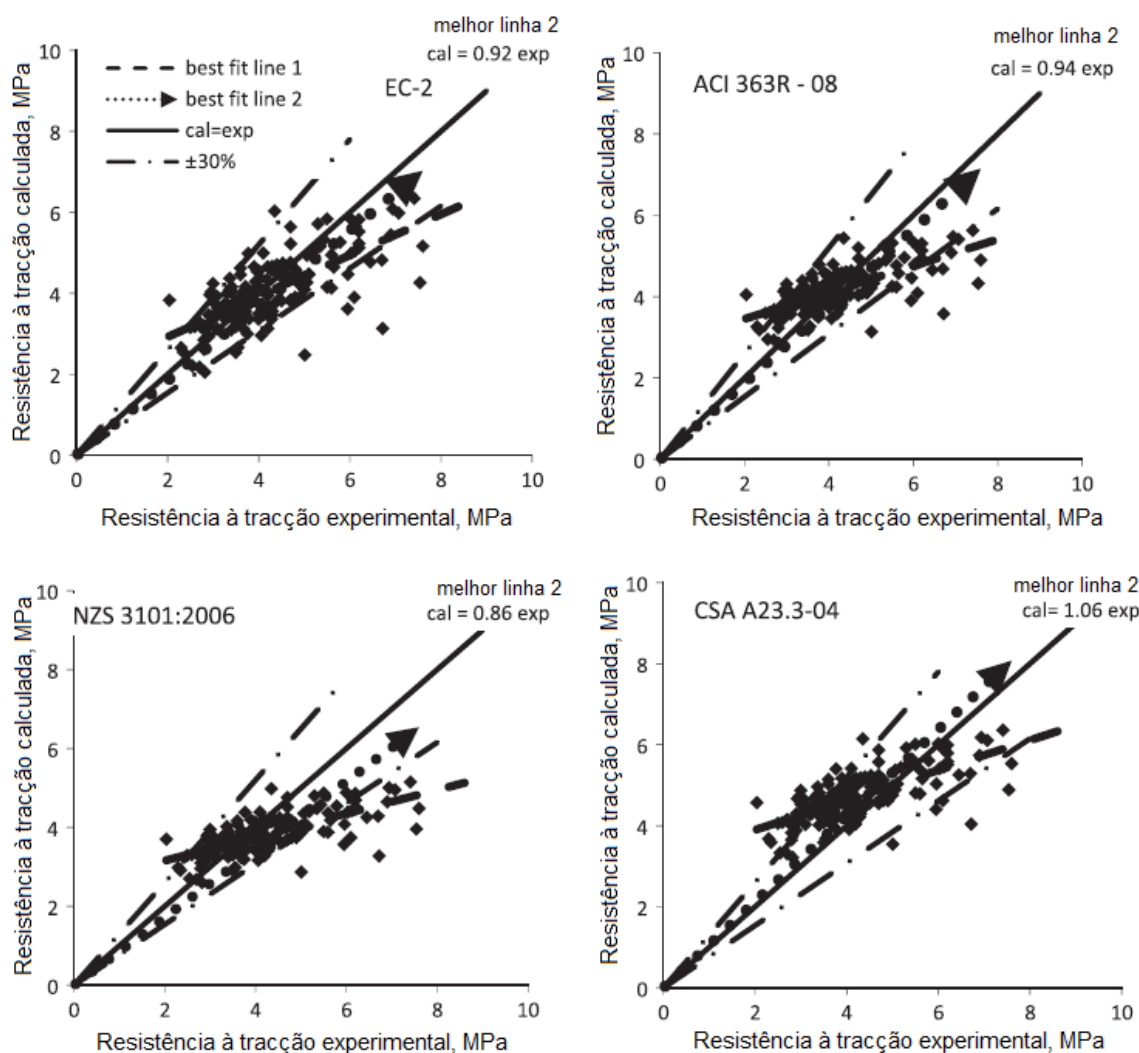


Figura 4.8 - Relação entre a resistência à tracção dos valores calculados e dos valores experimentais para os diferentes modelos, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

Tabela 4.3 - Resistência à tracção, parâmetros estatísticos para avaliação de diferentes modelos de cálculo [157]

	Resistência à tracção (MPa psi)				
	Experimental	Calculado			
		ACI 363R-08	EC2	NZS 3101:2006	CSA A23.3-04
Mínimo	2,04	2,85	2,05	2,61	3,22
Máximo	7,60	5,63	6,34	5,15	6,36
Média	4,24	4,18	4,05	3,83	4,72
Desvio Padrão	1,16	0,54	0,84	0,50	0,61

Pode-se assim considerar pelo procedimento de estudo que os modelos mais precisos para estimativa da resistência à tracção do BAC são o do EC2 e do ACI 363R-08, sendo menos rigorosos os do NZS 3101:2006 e do CSA A23.2-04.

A Figura 4.9 inclui uma relação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores calculados para os diferentes modelos estimados para o módulo de ruptura. Neste estudo foram utilizados apenas 59 resultados experimentais contra os 193 usados para o módulo de elasticidade e os 165 para a resistência à tracção.

Avaliando a distribuição dos pontos, o caso do ACI 363R-08 tem a maioria dos pontos situados dentro da margem dos  $\pm 30\%$ , com a excepção de alguns pontos situados acima desse limite. Já o EC2 e o NZS 3101:2006 têm a maioria dos pontos situados na parte de baixo desse intervalo de margem dos  $\pm 30\%$  e alguns dos pontos abaixo dessa margem. No CSA A23.2-04, os pontos situam-se quase todos abaixo da margem dos  $\pm 30\%$ .

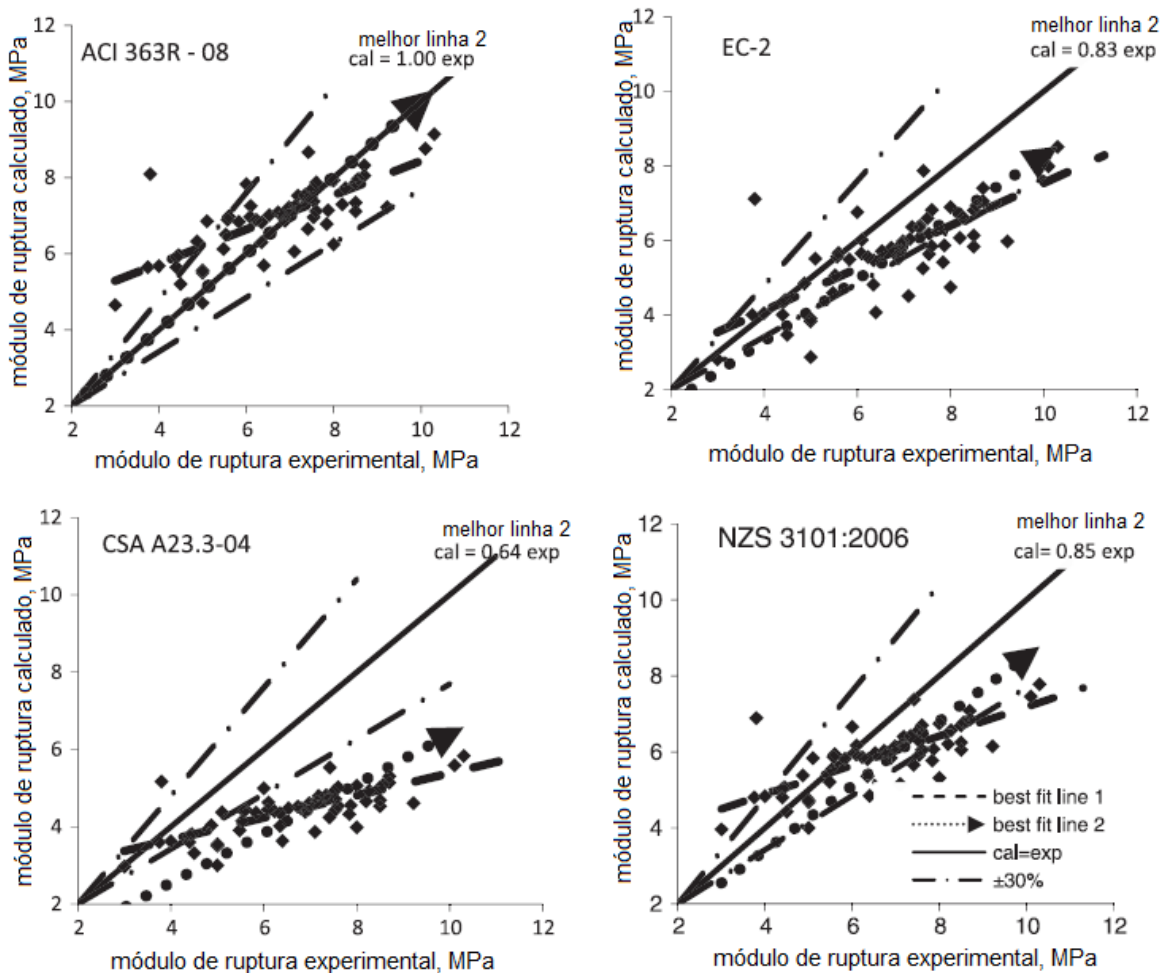


Figura 4.9 - Relação entre o módulo de ruptura dos valores calculados e dos valores experimentais para os diferentes modelos, adaptado de Vilanova *et al.* [157]

Comparando a linha que melhor se ajusta sem termo independente, a linha 2, pode-se observar que a linha do ACI 363R-08 tem uma inclinação de 1. O EC2 e o NZS 3101:2006 subestimam o módulo de ruptura e apresentam inclinações da sua melhor linha de 0,83 e 0,85 respectivamente. O CSA A23.2-04 subestima muito os valores do módulo de ruptura e apresenta uma inclinação da sua melhor linha de 0,64.

Quanto à linha que melhor se ajusta com termo independente, a linha 1, pode-se observar que as linhas de regressão do ACI 363R-08, NZS 3101:2006 e CSA A23.2-04 têm menor inclinação, sendo mais horizontal. No caso do EC2 essa linha é mais inclinada, indicando que o valor de cálculo é mais semelhante aos valores experimentais.

Comparando os parâmetros da Tabela 4.4, pode-se observar que o módulo de ruptura médio do ACI 363R-08 é o mais próximo dos valores médios experimentais com valores de 6,97 MPa e 6,74 MPa respectivamente.

O NZS 3101:2006 e o EC2 subestimam o módulo de ruptura médio com valor de 5,93 MPa e 5,69 MPa. O CSA subestima significativamente o módulo de ruptura médio com um valor de 4,45 MPa. Para todos os modelos, os desvios padrão dos valores calculados são menores do que para os valores experimentais que tem um valor de 1,68 MPa.

**Tabela 4.4 - Módulo de ruptura, parâmetros estatísticos para avaliação de diferentes modelos de cálculo [157]**

	Módulo de ruptura (MPa)				
	Experimental	Calculado			
		ACI 363R-08	EC2	NZS 3101:2006	CSA A23.3-04
Mínimo	3,00	4,65	2,82	3,96	2,97
Máximo	10,30	9,14	8,51	7,78	5,83
Média	6,74	6,97	5,69	5,93	4,45
Desvio Padrão	1,68	0,99	1,26	0,84	0,63

Pode-se assim considerar pelo procedimento de estudo que o modelo mais preciso para a estimativa do módulo de ruptura do BAC é o do ACI 363R-08 enquanto o modelo menos preciso é o do CSA A23.2-04.

#### 4.2.5 - Síntese dos estudos de Vilanova *et al.*

O estudo realizado por Vilanova *et al.* [157] permitiu concluir o seguinte:

- Em termos gerais de aplicabilidade, todos os modelos avaliados são adequados para estimar o módulo de elasticidade, resistência à tracção e módulo de ruptura do BAC;
- Em geral, o modelo do ACI pode ser considerado o mais preciso para estimar as propriedades mecânicas avaliadas neste estudo. No caso da resistência à tracção o EC2 tem uma precisão comparável;
- Relativamente ao módulo de elasticidade, o ACI 318-08 sobrestima o valor medido experimentalmente assim como o EC2. O NZS 3101:2006 e o CSA A23.3-04 subestimam esse valor, sendo que o primeiro em maior grau;
- Em relação à resistência à tracção o ACI 363R-08 é o modelo mais preciso. Este modelo e o EC2 subestimam ligeiramente o valor experimental. O NZS 3101:2006 subestima esse valor em maior grau, enquanto o CSA A23.3-04 sobrestima os valores medidos;
- No módulo de ruptura o modelo do ACI 363R-08 volta a ser o mais preciso. O EC2 e o NZS 3101:2006 subestimam ligeiramente os valores medidos, enquanto o CSA A23.2-04 subestima significativamente o módulo de ruptura;
- Quanto à dispersão dos resultados é importante assinalar que todos os valores calculados apresentam menor dispersão do que os valores obtidos experimentalmente. Isto indica que os modelos não detectaram a existência de nenhuma inconstância nos resultados dessas propriedades mecânicas;
- É ainda de salientar que usam a resistência à compressão para caracterizar o betão e mesmo que os modelos sejam ajustados adequadamente aos valores médios, eles não consideram outras variáveis que para o BAC podem ser importantes;
- Para todos os modelos, a estimativa da resistência à tracção é consideravelmente mais precisa do que o módulo de ruptura. Esta é uma indicação de que há uma imprecisão na conversão para um elemento viga. O único código que considera a altura do elemento é o EC2, mas este não é mais preciso do que os outros modelos.

### 4.3 - Estudo de Almeida *et al.*

#### 4.3.1 - Objectivos e descrição do estudo

Este estudo teve como objectivo avaliar estatisticamente a variação da resistência à compressão ( $f_c$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ) e resistência à tracção ( $f_t$ ). Os valores experimentais foram obtidos de três misturas de BAC diferentes e vão ser comparados com vários códigos e algumas recomendações de autores.

As três misturas experimentais foram alcançadas segundo o método proposto por Gettu *et al.* [59] onde o superplastificante e o fíler calcário são otimizados por meio do *cone de Marsh* (EN 445) [51] e mini testes de *slump*. Na Tabela 4.5 observa-se a composição de cada uma das misturas bem como as suas propriedades no estado fresco.

Foram ensaiados cilindros de 150x300 mm dos 3 tipos de BAC e ensaiados à resistência à compressão segundo a EN 12390-3 [49], resistência à tracção pela EN 12390-6 [50] e o módulo de elasticidade pela ASTM 469 [16]. Todos os cilindros permaneceram numa câmara de humidade até à data de ensaio aos 28 dias.

Os resultados experimentais foram obtidos a partir dos ensaios segundos as respectivas normas. No caso da resistência à compressão e resistência à tracção foram ensaiados de 10 a 12 provetes de cada mistura, enquanto no caso do módulo de elasticidade foram ensaiados pelo menos 20 provetes de cada mistura.

**Tabela 4.5** - Composição das misturas do BAC e suas propriedades no estado fresco [8]

<b>Constituintes (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>BAC 1</b>	<b>BAC 2</b>	<b>BAC 3</b>
Cimento	363	329	334
Fíler calcário	109	99	100
Água	181	165	167
Superplastificante	6,2	5,6	5,7
Areia 0-2 mm	711	607	603
Areia 0-5 mm	398	340	337
Brita 5-12 mm	526	451	447
Brita 12-18 mm	-	330	329
A/C	0,45	0,45	0,45
SP/C (%)	1,7	1,7	1,7
FC/C	0,3	0,3	0,3
Volume de pasta (%)	38	34,5	35
Volume de Areia (%)	42,2	36	35
Volume de Brita (%)	19,8	29,5	29,3
Teste de Slump, D <sub>f</sub> (mm)	740	570	740
Teste de Slump, T <sub>50</sub> (s)	1	1,5	1
L-Box, T <sub>60</sub> (s)	1	3	1
L-Box, C <sub>Bl</sub>	1	0,7	1
V-Funil, T <sub>v</sub> (s)	2,5	5,5	5
J-ring, T <sub>50</sub> (s)	1	2	1
J-ring, D <sub>ff</sub> (mm)	743	555	735

A/C - Razão água-cimento; SP/C - Razão superplastificante-Cimento;  
FC/C - Razão Fíler Calcário-Cimento.

Na Tabela 4.6 estão representados os valores obtidos experimentalmente em cada uma das misturas.

**Tabela 4.6** - Resultados experimentais das 3 misturas de BAC (  $f_t$  e  $f_c$  em MPa e  $E$  em GPa) [8]

Cilindro	BAC 1			BAC 2			BAC 3		
	$E$	$f_c$	$f_t$	$E$	$f_c$	$f_t$	$E$	$f_c$	$f_t$
1	36,15	47,70		39,09	50,50		37,86	44,47	
2	38,25	48,59		39,67	48,23		37,75	43,34	
3	36,38	46,56		40,59	42,74		37,95	38,08	
4	37,04	42,38		38,57	50,70		38,78	43,53	
5	36,08	45,54		38,32	50,62		38,24	42,82	
6	35,60	47,39		38,61	50,62		36,50	43,46	
7	36,97	47,19		38,39	49,21		38,45	45,99	
8	37,39	45,75		39,29	49,48		38,04	39,72	
9	36,46	49,10		38,86	49,59		38,82	41,19	
10	37,22	47,98		37,98	40,98		38,10	43,47	
11	35,68	41,90		38,03	49,85		36,73		3,75
12	36,88		4,40	39,15	49,60		38,54		2,74
13	36,56		2,64	38,76		3,42	37,61		2,44
14	36,96		3,95	31,48 <sup>a</sup>		3,40	39,22		3,05
15	36,17		4,06	39,74		3,27	36,77		2,47
16	35,21		2,81	31,37 <sup>a</sup>		4,45	35,35		3,10
17	37,31		3,38	40,09		4,25	39,70		3,59
18	35,56		3,67	39,33		3,57	39,55		3,94
19	36,40		4,45	39,51		4,19	38,67		3,12
20	36,16		3,96	38,92		3,17	37,15		3,36
21	36,53		4,00	38,25		3,61			
22	35,30		3,65	38,98		3,80			
23				38,61		4,09			
24				38,89		3,51			
Média	36,52	46,37	3,72	38,85	48,41	3,69	37,99	42,61	3,16
Desvio Padrão	0,74	2,36	0,58	0,51	3,21	0,38	1,09	2,325	0,51

<sup>a</sup> - Valor não usado;  $E$  - módulo de elasticidade;  $f_c$  - resistência à compressão;

$f_t$  - resistência à tracção.

### 4.3.2 - Comparação dos modelos de referência

Na Tabela 4.7 são apresentadas as fórmulas usadas para cada um dos ensaios de cada código e autores analisados.

Tabela 4.7 - Fórmulas de cálculo analisadas para a  $f_t$ ,  $f_c$  e  $E$  [8]

	Módulo de Elasticidade	Resistência à tracção
EHE [4.21]	$E_c = 10000 \cdot \sqrt[3]{f_c}$	$f_t = 0,21 \cdot \sqrt[3]{f_c^2}$
NBR 6118 [4.22]	$E_c = 5600 \cdot \sqrt{f_c}$	$f_t = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_c^2}$
CEB [4.20]	$E_c = 21,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{f_c}{10}}$	$f_t = 1,56 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{f_c - 8}{10}\right)^2}$
ACI 318 [4.23]	$E_c = 43 \cdot \rho_c^{1,5} \cdot \sqrt{f_c} \cdot 10^{-6a}$	$f_t = 0,56 \cdot \sqrt{f_c}$
Hueste et al [4.19]	$E_c = 5230 \cdot \sqrt{f_c}$	$f_t = 0,55 \cdot \sqrt{f_c}$
Norwegian code [4.24]	$E_c = 9,5 \cdot f_c^{0,3} \cdot \left(\frac{\rho_c}{2400}\right)^{1,5}$	-
Gardner and Zao [4.25]	$E_c = 9 \cdot \sqrt[3]{f_c}$ , for $f_c > 27 \text{ MPa}$	-
Oluku [4.26]	-	$f_t = 1,39 \cdot f_c^{0,69}$
Ahmand and Shah [4.27]	-	$f_t = 4,34 \cdot f_c^{0,55}$
Burg and Ost [4.28]	-	$f_t = 7,3 \cdot \sqrt{f_c}$

<sup>a</sup> -  $\rho_c$  é a densidade do betão

A Figura 4.10 mostra que a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade obtidos experimentalmente aparece um pouco mais acima do que a maioria dos códigos de previsão para o betão corrente vibrado. No caso particular do código espanhol EHE, este devia ser o que melhor estimativa deveria dar, uma vez que as misturas foram produzidas com materiais da zona da Catalunha. Em geral, os códigos aproximam melhor os valores experimentais para valores de resistência à compressão situados entre 45 a 50 MPa mas subestimam claramente o módulo de elasticidade do BAC para resistências à compressão inferiores a 40-45 MPa.

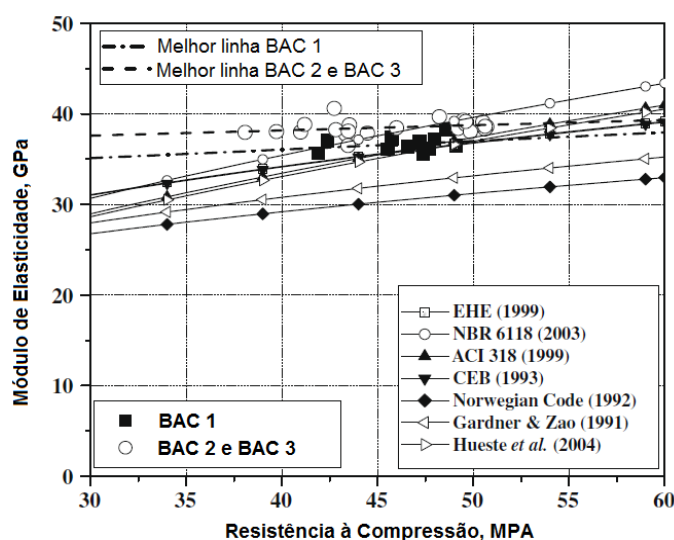


Figura 4.10 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão das 3 misturas de BAC e os códigos analisados, adaptado de Almeida *et al.* [8]

Por outro lado, na Figura 4.11 a relação experimental entre resistência à compressão e a resistência à tracção por compressão diametral está abaixo da maioria dos códigos analisados. Relativamente ao código espanhol EHE, este subestima a resistência à tracção do BAC. A melhor estimativa para esta relação parece ser a de Hueste *et al.* [70] para resistências à compressão superiores a 45 MPa e o CEB [33] para resistências inferiores a 45 MPa.

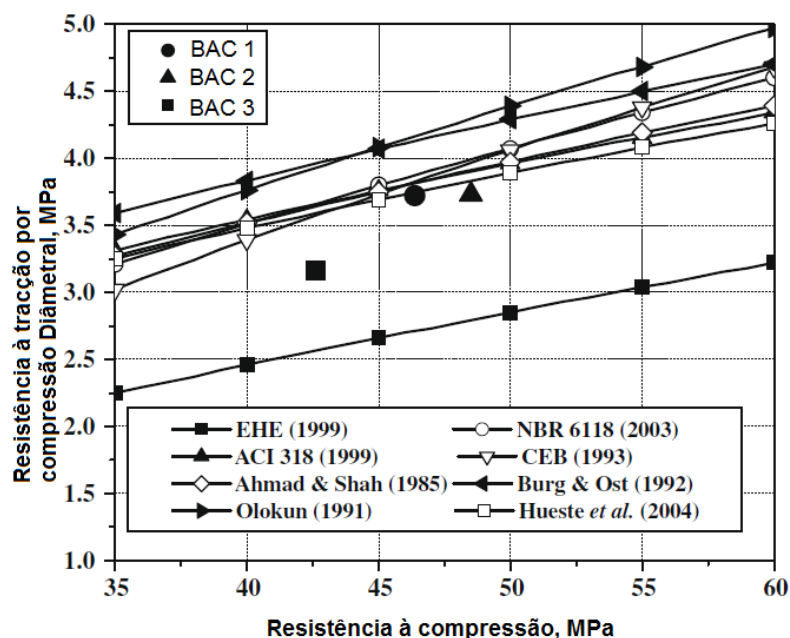


Figura 4.11 - Relação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão das 3 misturas de BAC e os códigos analisados, adaptado de Almeida *et al.* [8]

### 4.3.3 - Síntese dos estudos de Almeida *et al.*

Os resultados obtidos estão de acordo com os previstos pelos códigos para o betão corrente vibrado, com o módulo de elasticidade a ser sensível ao volume de pasta e agregados grossos. Para uma certa resistência à compressão, os BAC produzidos com maiores dimensões de agregados e maiores volumes de agregado apresentam maiores valores de módulo de elasticidade. Um aumento de 10 MPa da resistência à compressão resultou num aumento de 1 GPa no valor do módulo de elasticidade em ambas as misturas ensaiadas na tese de Almeida *et al.* [8].

A relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade obtido experimentalmente aparece ligeiramente acima do valor estimado pelas fórmulas. As formulações aproximam-se do valor experimental entre os 45 e 50 MPa do valor da resistência à compressão, mas para valores inferiores, esse valor é subestimado pelos códigos.

A relação experimental entre a resistência à compressão e a resistência à tracção por compressão diametral está abaixo da maioria dos códigos, contudo está acima do espanhol.

Dos resultados deste estudo conclui-se que o código espanhol subestima estes valores de resistência à tracção.

## 4.4 - Estudo de Núñez *et al.*

### 4.4.1 - Objectivos e descrição do estudo

O objectivo deste estudo consistiu em avaliar e comparar a retracção e a fluência do BAC. Inicialmente foi tratado um estudo [115] onde foram comparados 3 tipos de BAC com composições diferentes com os modelos de previsão utilizados no betão corrente vibrado para prever a retracção e a fluência. Os três BAC produzidos de maneiras diferentes apresentaram uma resistência moderada a rondar os 30 MPa aos 28 dias. Posteriormente foi comparado o BAC com o betão corrente vibrado através de valores experimentais.

Os cimentos utilizados na composição dos três tipos de BAC no ensaio do trabalho [115] foram:

- CEM I 42,5R - sem aditivos,
- CEM II/A-S 42,5 N - cimento com adição de escórias e fíler calcário,
- BL II/A-L 42,5 R - cimento branco.

O agregado usado nos três tipos de BAC foi o mesmo. Foi usado superplastificante SIKA Viscocrete 3425 do tipo carboxilato modificado em base aquosa. Não foram utilizados aditivos modificadores de viscosidade.

Na Tabela 4.8 observam-se as composições de cada um dos tipos de BAC produzidos e analisados.

Tabela 4.8 - Dosagens para cada tipo de BAC estudado (por m<sup>3</sup> de betão) [115]

BAC	1	2	3
Tipo de Cimento	CEM I 42,5 R	CEM II/A-S 42,5 N	BL II/A-L 42,5 R
Adição	Fíler Calcário	Fíler Calcário	Fíler Calcário
Cimento	350	350	375
Adição (kg)	200	200	156
Água (kg)	193	193	206
Areia (kg)	960	960	960
Brita (kg)	695	695	695
Aditivo (kg)	7,4 (2,1%)	2,8 (0,8%)	4,3 (1,15%)
Razão A/C	0,55	0,55	0,55

Foram feitos ensaios aos 7, 28 e 91 dias de idade em cada um dos BAC's. Nesses estudos foram avaliadas as seguintes propriedades:

- Resistência à compressão segundo a UNE-EN 12390-3:2003,
- Módulo de elasticidade à compressão segundo a UNE 83316:1996,
- Resistência à tracção indirecta segundo a UNE-EN 12390-6:2001.

Os ensaios de fluência e retracção foram realizados segundo a norma ASTM C512 mas com uma pequena modificação. O ensaio de fluência foi realizado sobre um provete cilíndrico de 15 Ø x 40 cm e o ensaio de retracção em provetes de 15 Ø x 30 cm, com uma carga entre 35 a 40 % do valor da resistência à compressão aos 28 dias. Ambos ensaios foram realizados a uma temperatura de 21 ±1°C e humidade 50±5%. Na Tabela 4.9 estão os valores obtidos e a duração do ensaio de fluência bem como a carga aplicada.

**Tabela 4.9 - Características do ensaio de fluência [115]**

BAC	1	2	3
Duração do ensaio (dias)	333	200	200
Carga (% da resistência à compressão aos 28 dias)	35	40	40
Tensão aplicada (bares)	135	175	160
Idade do betão no início do ensaio (dias)	70	104	76

O ensaio de porometria por introdução de mercúrio foi realizado com um porosímetro Micromeritics, modelo Autopore IV 9500 que tem uma precisão máxima de 228 MPa e com um raio de poros de 0,006 a 75 µm. Este ensaio foi realizado aos 91 dias de acordo com a norma ASTM D4404-84:2004. O tamanho de amostra utilizada foi de 3,5±0,3 g. Antes do ensaio, as amostras foram secas a uma temperatura de 40° C até ficarem com um peso constante.

#### 4.4.2 - Resultados obtidos

Na Tabela 4.10 pode-se verificar os resultados obtidos nos ensaios do betão no estado fresco e a sua comparação com os valores admissíveis da EHE-08 [71].

**Tabela 4.10 - Resultados obtidos dos ensaios do betão no estado fresco [115]**

BAC		1	2	3	Raio de admissão (EHE-08)
Extensão de fluxo	T <sub>50</sub> (s)	3	1,2	2	T <sub>50</sub> ≤ 8 s
	Ø m (cm)	65	70	65,5	550 mm ≤ d <sub>f</sub> 850 mm
Funil V	T <sub>v</sub> (s)	14	5,5	8	4 s ≤ T <sub>v</sub> ≤ 20 s
Caixa L	H2/H1	0,63	0,8	0,6	0,75 ≤ C <sub>Bl</sub> ≤ 1

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 mostram, respectivamente, os resultados obtidos à compressão, módulo de elasticidade em compressão e a resistência à tracção indirecta para cada um dos três BAC's nas idades 7, 28 e 91 dias. Esses valores correspondem aos valores médios de três provetes em cada idade e para cada tipo de BAC.

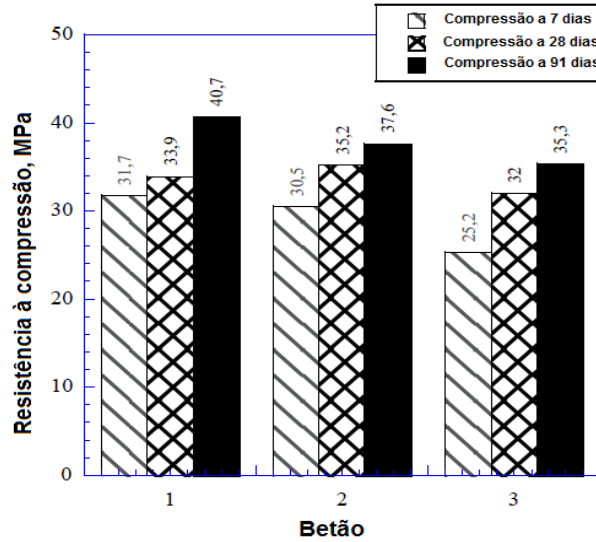


Figura 4.12 - Resistência à compressão, adaptado de Núñez *et al.* [115]

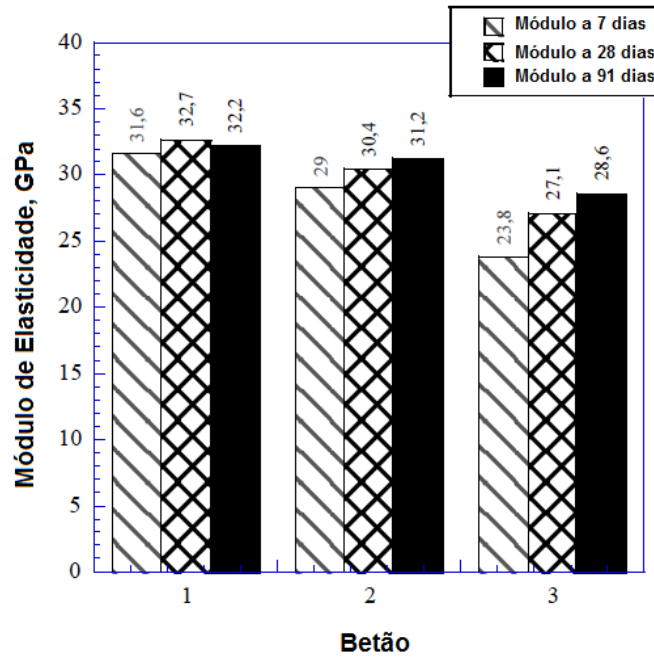


Figura 4.13 - Módulo de elasticidade, adaptado de Núñez *et al.* [115]

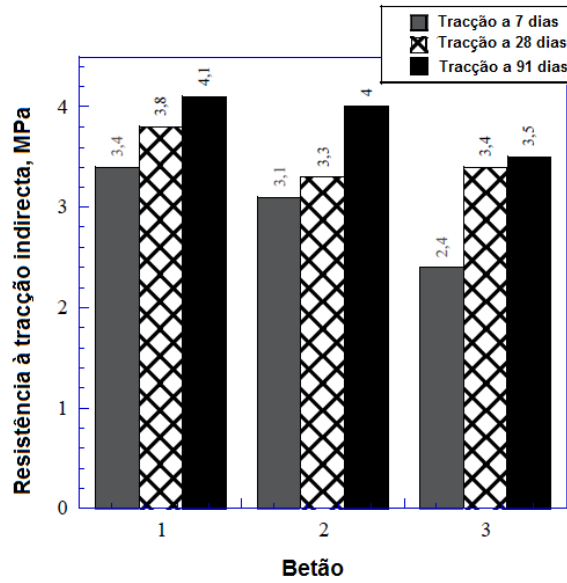


Figura 4.14 - Resistência à tracção indirecta, adaptado de Núñez *et al.* [115]

A Figura 4.15 mostra que as deformações por retracção são maiores no BAC 2 e menores no BAC 1. A Figura 4.16 mostra as deformações de fluência que são menores no BAC 1 do que nos restantes. Por fim a Figura 4.17 apresenta os valores do coeficiente de fluência que também é menor no BAC 1 comparativamente com os outros. O coeficiente de fluência é calculado segundo as seguintes equações (4.3, 4.4): Onde:  $\varepsilon_i$ : é a deformação inicial;  $\varepsilon_t$ : é a deformação total;  $\varepsilon_s$ : é a retracção;  $\varphi(t, t_0)$ : é o coeficiente de fluência.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_t - (\varepsilon_i + \varepsilon_s) \quad (4.3)$$

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_i} \quad (4.4)$$

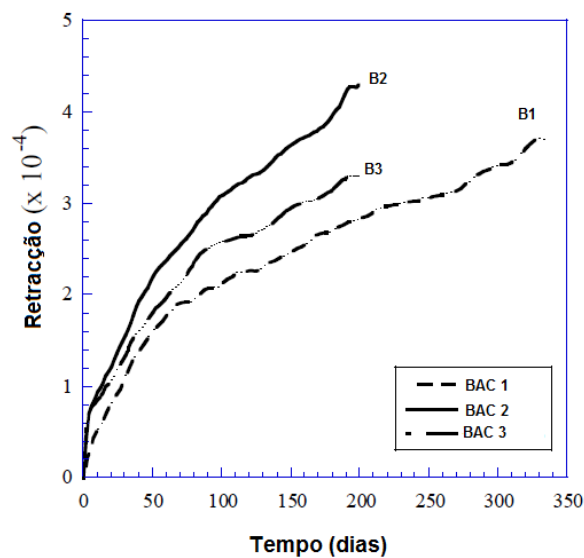


Figura 4.15 - Deformação por retracção, adaptado de Núñez *et al.* [115]

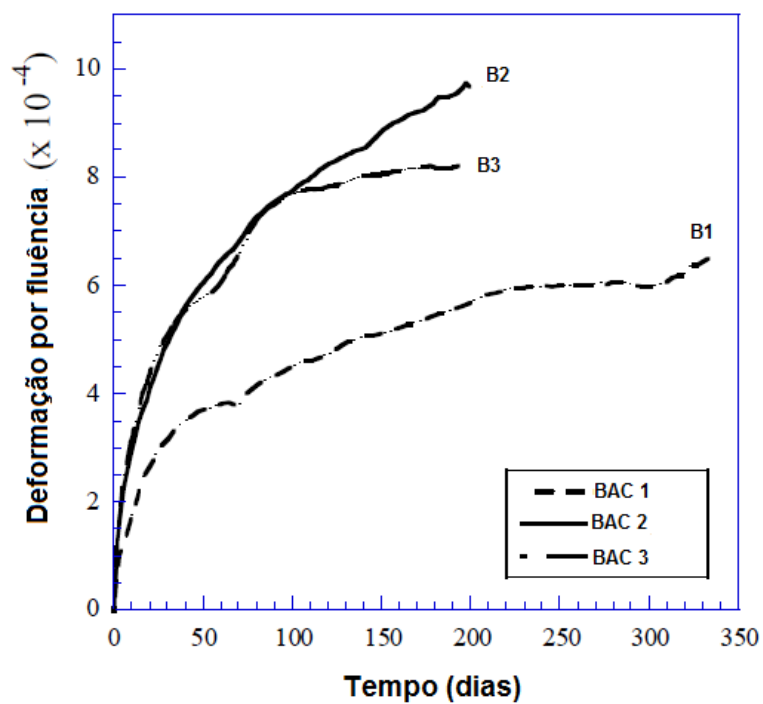


Figura 4.16 - Deformação por fluência, adaptado de Núñez *et al.* [115]

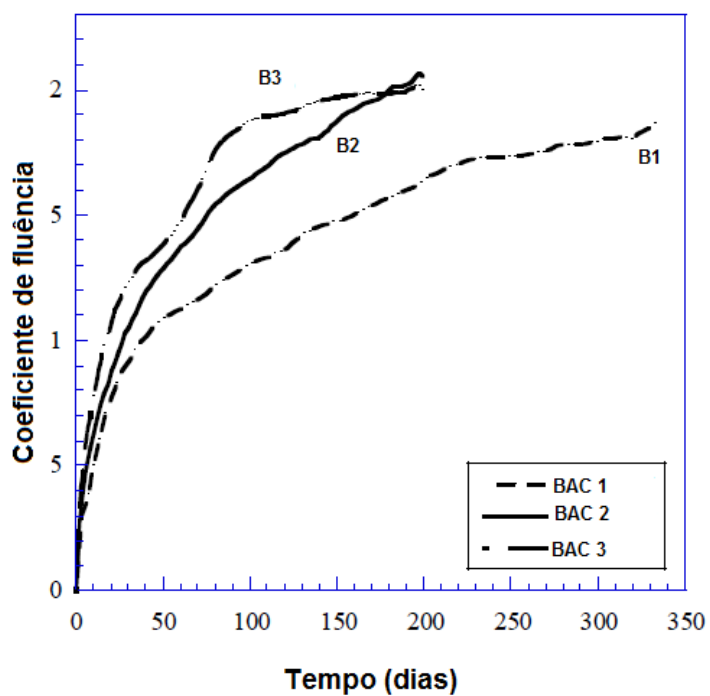


Figura 4.17 - Coeficiente de fluência, adaptado de Núñez *et al.* [115]

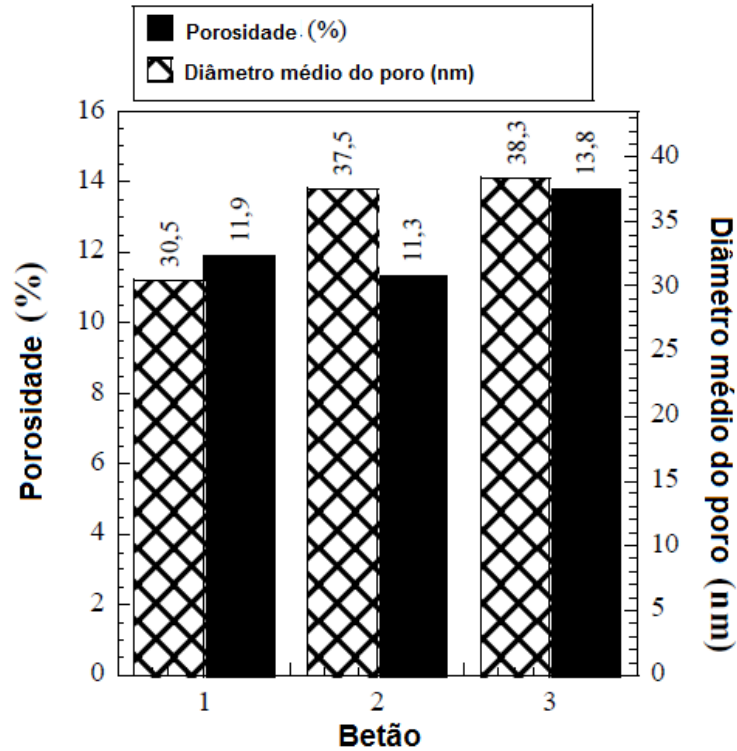


Figura 4.18 - Diâmetro médio do poro e porosidade, adaptado de Núñez *et al.* [115]

Tabela 4.11 - Volume de macroporos e mesoporos [115]

BAC	Volume de macroporos (ml/g)	Volume de mesoporos (ml/g)
1	0,016	0,038
2	0,036	0,025
3	0,036	0,029

#### 4.4.3 - Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de referência

Foram aplicados aos três tipos de BAC os modelos empíricos que estimam as deformações por fluência e a retracção para o betão corrente vibrado propostos pelo ACI [11], EC2 [53] e CEB-FIP 90 [26].

As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 comparam os valores experimentais individualmente com cada um dos modelos empíricos analisados para estimar a retracção.

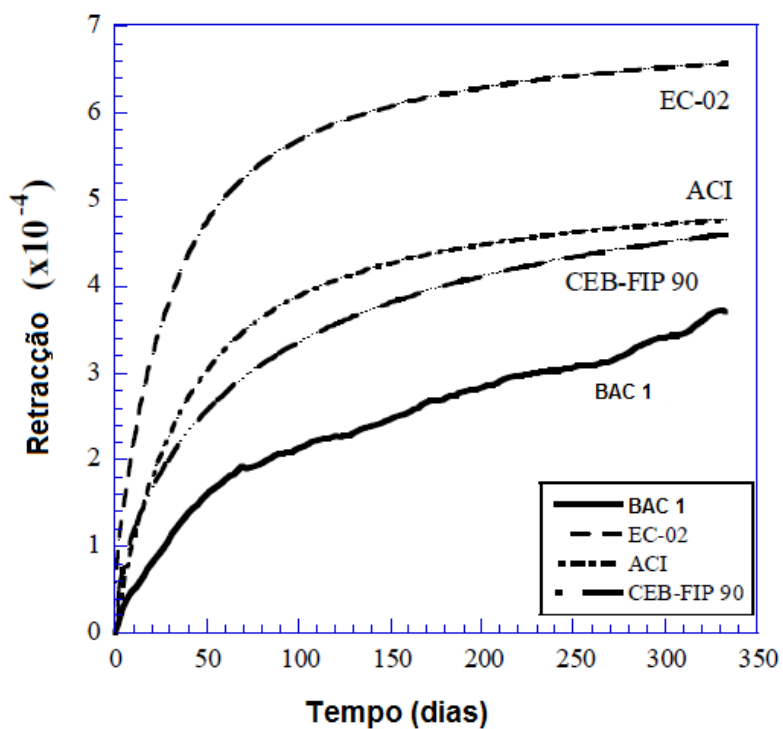


Figura 4.19 - Deformação por retracção do BAC 1, adaptado de Núñez *et al.* [115]

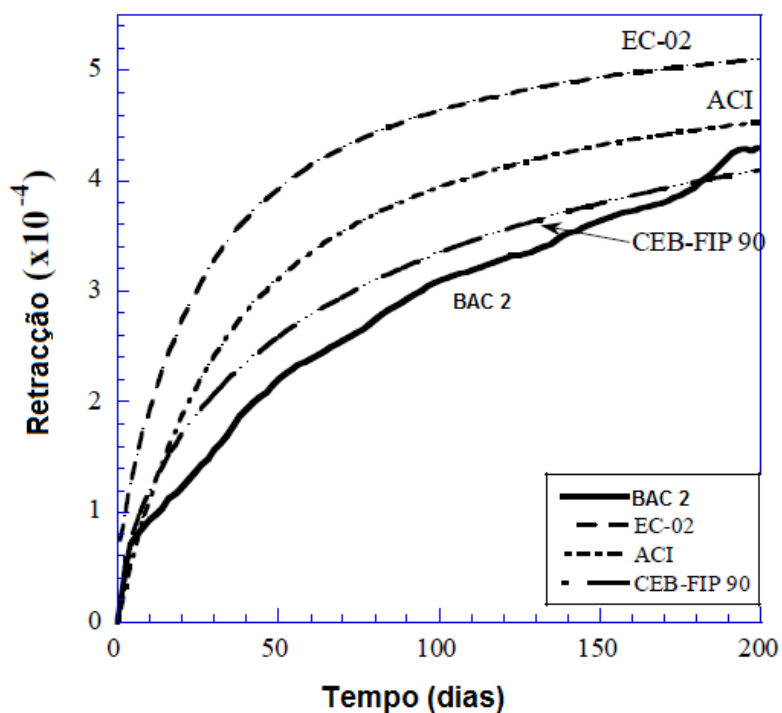


Figura 4.20 - Deformação por retracção do BAC 2, adaptado de Núñez *et al.* [115]

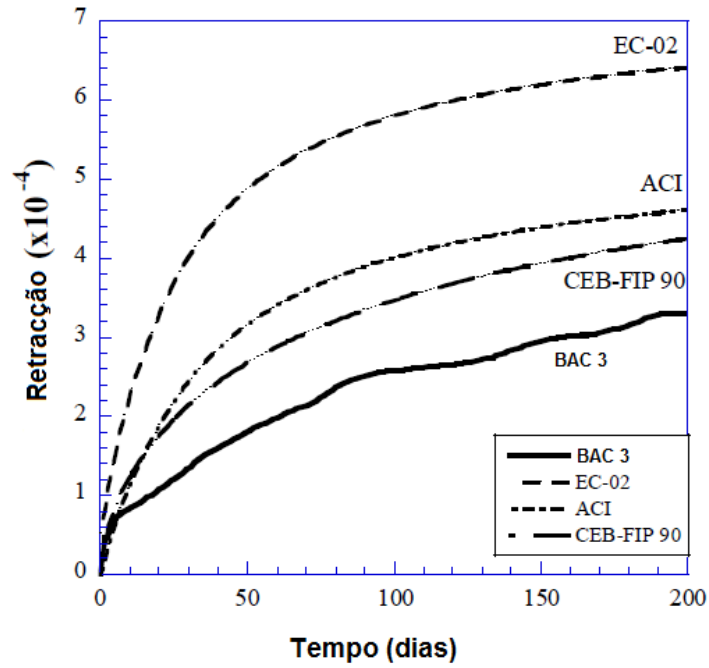


Figura 4.21 - Deformação por retracção do BAC 3, adaptado de Núñez *et al.* [115]

Já as Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 comparam os resultados experimentais com os respectivos modelos analisados para a fluência.

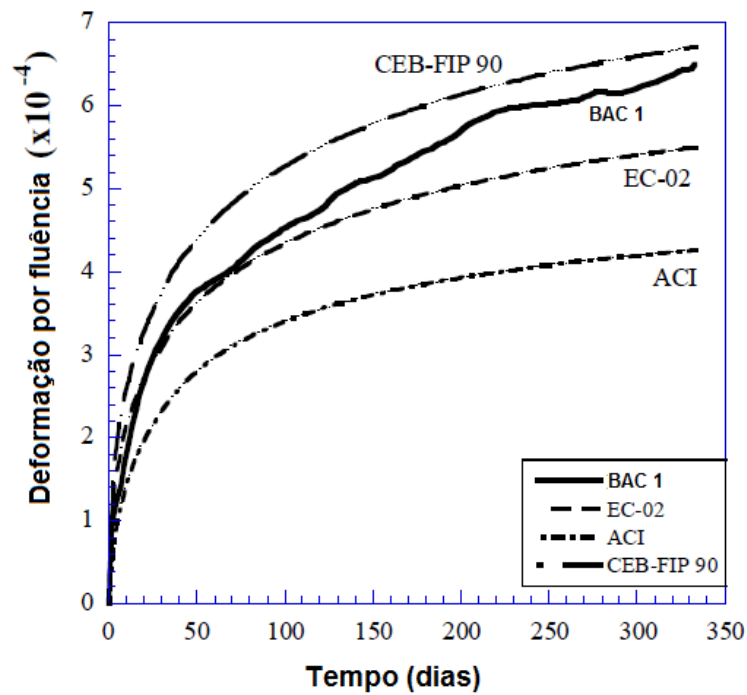


Figura 4.22 - Deformação por fluência do BAC 1, adaptado de Núñez *et al.* [115]

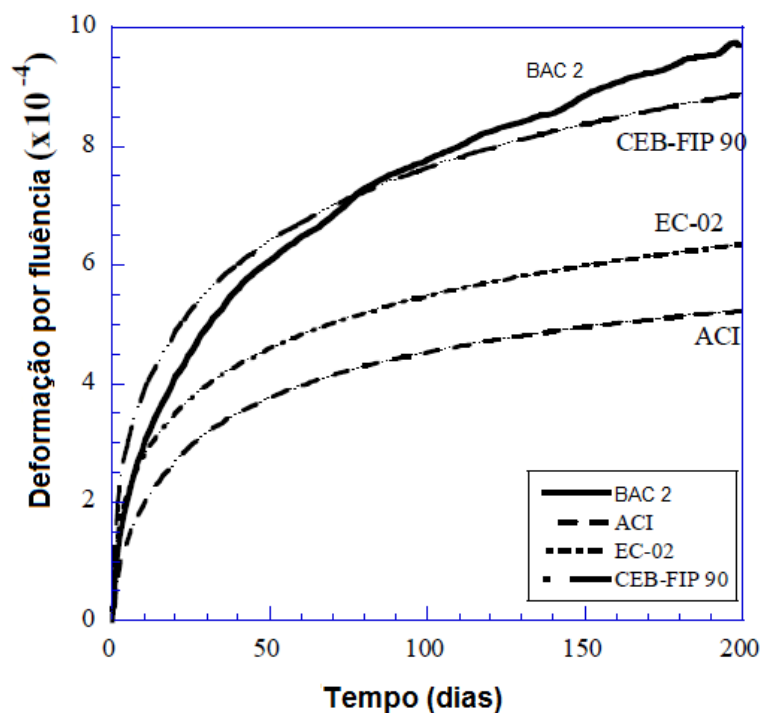


Figura 4.23 - Deformação por fluência do BAC 2, adaptado de Núñez *et al.* [115]

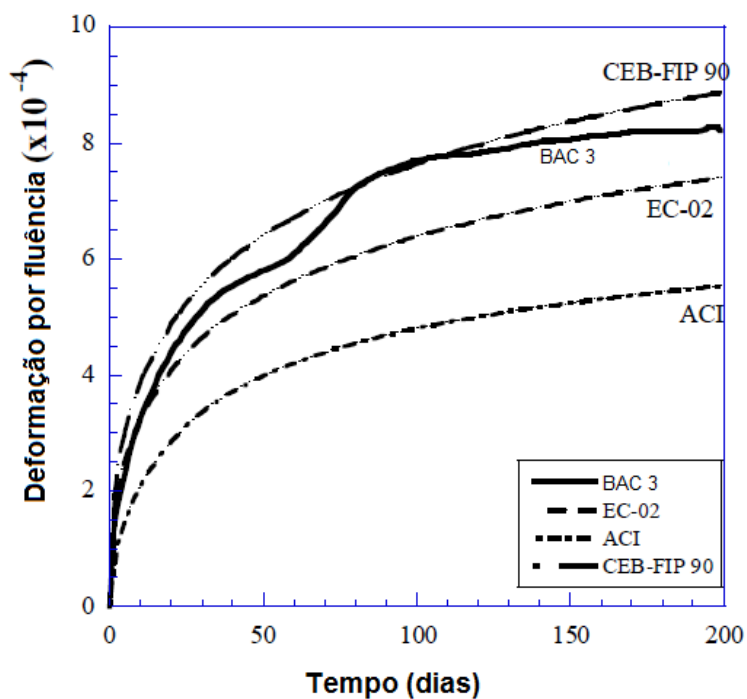


Figura 4.24 - Deformação por fluência do BAC 3, adaptado de Núñez *et al.* [115]

As Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 mostram os mesmos resultados ensaiados, comparando-os com os modelos usados para estimar esse mesmo parâmetro.

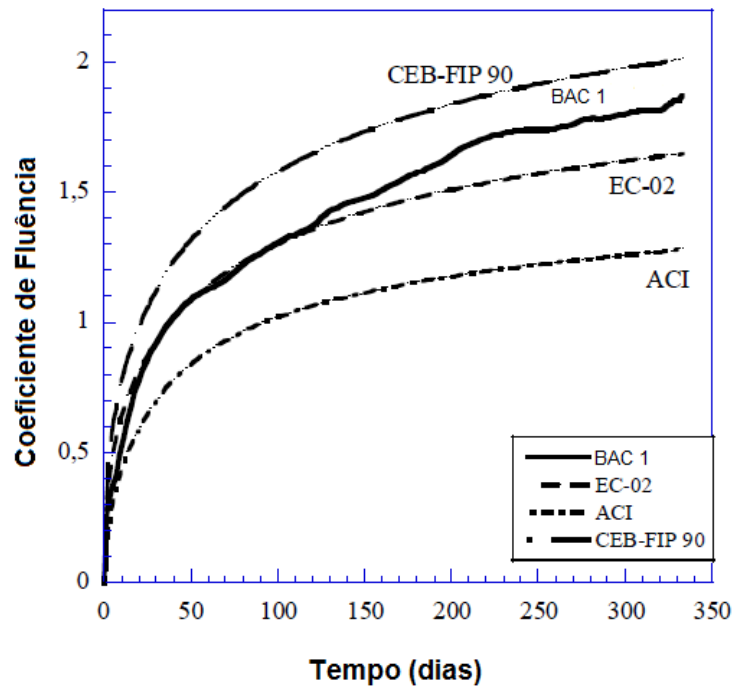


Figura 4.25 - Coeficiente de fluência do BAC 1, adaptado de Núñez *et al.* [115]

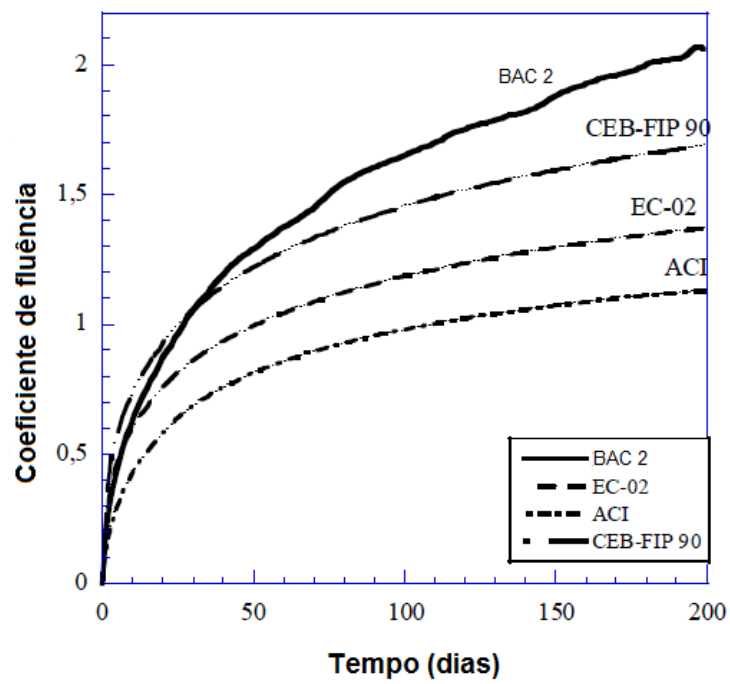


Figura 4.26 - Coeficiente de fluência do BAC 2, adaptado de Núñez *et al.* [115]

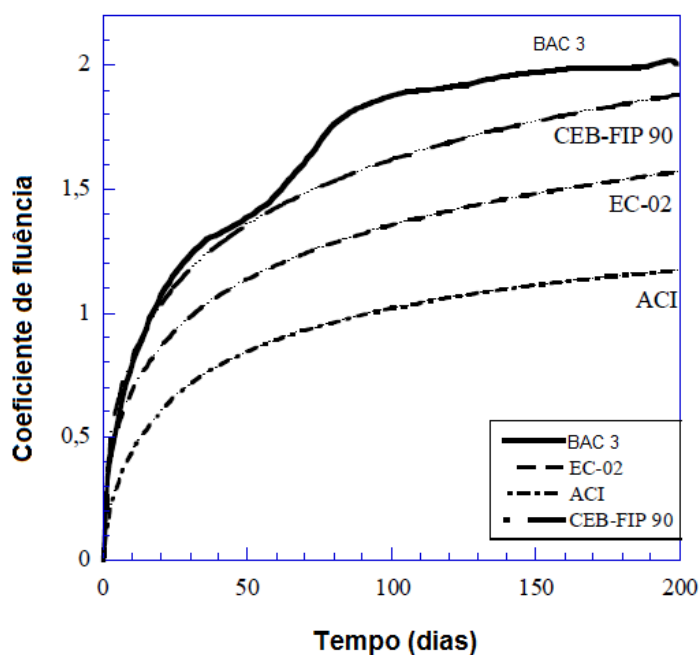


Figura 4.27 - Coeficiente de fluência do BAC 3, adaptado de Núñez *et al.* [115]

A Figura 4.15 mostra que a deformação por retracção é superior no BAC 2 em comparação com o BAC 1 e 3. Chopin *et al.* [30] concluíram que os BAC's com maiores valores de resistência à compressão têm menores valores de retracção, o que coincide com o resultado obtido do BAC 1, que é aquele que tem maior resistência à compressão. Contudo, essa teoria não se aplica aos BAC 2 e 3, uma vez que o BAC 2 tem maior retracção e maior valor de resistência à compressão comparado com o BAC 3.

A dosagem do BAC 3 é a que tem maior conteúdo de cimento e uma elevada razão A/(materiais finos), que deveria traduzir-se numa retracção superior, o que não acontece.

Os BAC's 1 e 2, que têm dosagens de cimento semelhantes, deveriam ter um valor de retracção semelhante, mas isso não ocorre. No BAC 1 é aplicado o cimento Portland sem adições e no BAC 2 o cimento Portland com adição de escórias.

Em relação aos valores obtidos no ensaio da fluência descritos na Figura 4.17, o BAC 1 apresenta menor coeficiente de fluência, sendo que o que apresenta esse valor mais elevado é o BAC 2. A principal causa pode dever-se à tensão aplicada no BAC 1 ser de 35% do valor da resistência à compressão aos 28 dias e nos restantes BAC's ter sido esse valor de 40%. O coeficiente de fluência é semelhante para o BAC 1 e 2. Assim, Chopin *et al.* [30] concluíram que a tensão aplicada durante o ensaio de fluência afecta directamente o coeficiente de fluência.

Neville [106], afirma que não se pode generalizar a influência das adições nos valores da fluência devido aos dados contraditórios que são recolhidos das publicações sobre a utilização de adições nos BAC.

Seng *et al.* [138], observaram que a finura da escória afecta em idades mais recentes as deformações por fluência, como se observa também nos resultados do BAC 2, onde a deformação deveria ser maior no final do ensaio.

Os valores que se obtêm com o EC2 estão sobrestimados para as deformações por retracção em todos os BAC's. Obtêm-se melhores valores estimados utilizando o código do ACI e da CEB-Fip 90, especialmente para o caso do BAC 2.

Em relação às deformações por fluência e coeficiente de fluência, os valores de estimativa que se obtêm com o código do ACI são demasiado baixos relativamente aos valores experimentais. Com o EC 2 obtêm-se valores aproximados, apesar de baixos para o BAC 2 e 3. No entanto o código da CEB-FIP 90 é o mais próximo, apesar de umas vezes sobrestimar esse valor e outras subestimá-lo.

Os valores obtidos da porosidade total (Figura 4.18) são muito semelhantes nos BAC 1 e 2, o que corresponde a propriedades mecânicas semelhantes. Contudo, o BAC 3 tem porosidades superiores e as suas propriedades mecânicas apresentam valores ligeiramente inferiores aos outros dois casos. Em contrapartida, o diâmetro médio dos poros é semelhante no BAC 2 e 3, sendo menor para o BAC 1.

Em relação à distribuição dos poros, o volume de macro poros e meso poros (Tabela 4.11) mostram que o BAC 2 e 3 têm uma estrutura semelhante e muito diferente do BAC 1. O baixo volume de macro poros no BAC 1 relativamente aos outros poderia justificar o bom comportamento frente à retracção e à fluência, embora não seja o único parâmetro a influenciar esse comportamento. Já o BAC 2 e 3 apresentam estrutura porosa similar e os seus comportamentos em relação à retracção e fluência são semelhantes.

#### **4.4.4 - Síntese dos estudos de Núñez *et al.***

Os estudos realizados por Núñez *et al.* [115] permitiram concluir o seguinte:

- As deformações por retracção dependem do tipo de adição que é usado no cimento, sendo os valores obtidos com escórias superiores aos do fíler calcário. A resistência à compressão, volume de pasta e quantidade de cimento influenciam também as deformações por retracção, embora seja de maneira inversamente proporcional;
- Os métodos de cálculo da retracção utilizados para estimar esse valor nos betões correntes vibrados não são totalmente válidos para os BAC's, embora o modelo de código da CEB-FIP 90 seja o mais adequado, dependendo do tipo de cimento;

- Os modelos de previsão usados para estimar as deformações por fluência dos betões correntes vibrados subestimam a fluência e o coeficiente de fluência no caso dos BAC's, sendo o melhor modelo de cálculo para este betão o da CEB-FIP 90;
- A porosidade total obtida nos resultados experimentais é muito semelhante, mas a sua distribuição por tamanho de poros é diferente. O volume de macro poros afecta as propriedades mecânicas, a retracção e a fluência, contudo não é único parâmetro.

## 4.5 - Estudo de Leemann *et al.*

### 4.5.1 - Objectivos e descrição do estudo

Este estudo teve como objectivo comparar a retracção e a fluência em função do tipo de cimento usado. Para isso foram produzidos 3 tipos de betão corrente vibrado com tipos de cimento diferentes. Seguidamente, cada um desses betões foi produzido com cada tipo de cimento respectivamente de maneira a ser auto-compactável.

Os cimentos utilizados na composição dos três tipos de betões correntes vibrados e BAC usados no trabalho de Leemann *et al.* [84] foram:

- CEM I 42,5 N (CEM I),
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R (CEM II),
- CEM III/B 42,5 L-LH HS (CEM III).

Na Tabela 4.12 apresentam-se as composições de cada um desses cimentos.

**Tabela 4.12** – Composição de cada tipo de cimento [84]

Tipo de Cimento	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	SO <sub>3</sub> %	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	LOI %	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
CEM I 42,5 N	62,4	20,8	4,98	3,21	2,14	0,87	0,29	2,67	3100	2,98	3,13
CEM II/B-M (V-LL) 32,5	52,5	23,1	7,31	3,56	2,14	1,19	0,39	2,55	4180	n.d.	2,9
CEM III/B 42,4 L-LH HS	49	30,6	9,65	1,22	5,14	0,61	0,26	1,38	4500	n.d.	3,0

LOI = perdido na combustão; n.d = não definido

A Tabela 4.13 mostra as composições e algumas propriedades no estado fresco dos betões produzidos nesse estudo.

**Tabela 4.13 - Composição e propriedades no estado fresco de cada tipo de betão [84]**

Betão	BCV-I	BCV-II	BCV-III	BAC-I	BAC-II	BAC-III
Tipo de cimento	CEM I	CEM II/B-M	CEM III/B	CEM I	CEM II/B-M	CEM III/B
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	320	320	320	520	520	520
Agregado 0-32 mm (kg/m <sup>3</sup> )	2016	1994	2003	1621	1584	1600
Água (kg/m <sup>3</sup> )	128	128	128	208	208	208
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	3,8	1,6	2,2	4,2	1,1	1,1
Volume de pasta (l/m <sup>3</sup> )	230	238	235	378	392	386
Razão A/C	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2461	2465	2468	2386	2404	2351
Volume de ar (vol%)	1,5	1,1	1,3	0,8	1,2	1,8
Fluxo de betão (cm)	39	60	62	58	57	60

BCV - betão corrente vibrado; BAC - betão auto-compactável;

O fluxo do betão corrente vibrado foi avaliado segundo a norma EN 12350-05, enquanto o fluxo do BAC foi avaliado segundo a norma EN 12350-08. Os betões apresentavam-se estáveis e não havia sinais de ocorrência de segregação. Os provetes de 120 X 120 x 369 mm<sup>3</sup> foram curados a 20° C com uma humidade relativa de 90%. Passado 24 horas os provetes foram descofrados. Posteriormente foram ensaiados à compressão, à flexão e para determinação do módulo de elasticidade aos 2, 7 e 28 dias.

Na Tabela 4.14 apresentam-se os valores das propriedades mecânicas de cada um dos betões produzidos.

**Tabela 4.14 - Resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade dos betões produzidos [84]**

Mistura	f <sub>c</sub> 2d (MPa)	f <sub>c</sub> 7d (MPa)	f <sub>c</sub> 28d (MPa)	f <sub>f</sub> 2d (MPa)	f <sub>f</sub> 7d (MPa)	f <sub>f</sub> 28d (MPa)	M. Elas. 2d (GPa)	M. Elas. 7d (GPa)	M. Elas. 28d (GPa)
BCV-I	36,8	60,7	71,8	5,2	6,3	7,9	33,8	41,0	42,8
BCV-II	28,9	50,1	62,3	4,9	5,5	7,8	30,6	38,4	41,2
BCV-III	23,4	51,2	73,0	4,2	6,4	8,6	29,2	36,0	43,4
BAC-I	32,5	53,5	61,4	4,8	4,7	6,4	28,5	33,2	34,2
BAC-II	27,4	41,7	50,9	4,4	4,2	5,9	28,2	31,9	35,1
BAC-III	15,2	38,5	51,3	3,5	4,2	5,5	19,9	28,2	33,8

f<sub>c</sub>- Resistência à compressão; f<sub>f</sub>- Resistência à flexão; M. Elas. - Módulo de elasticidade;

### 4.5.2 - Análise da influência do tipo de cimento

O BAC retrai consideravelmente mais do que o betão corrente vibrado como se pode observar na Figura 4.28. Os valores aos 91 dias diferem entre os 0,10% (CEM II) e os 0,24% (CEM I). O betão produzido com cimento do tipo CEM I retrai mais do que aquele produzido com os tipos CEM II ou CEM III. O tempo de retracção dos betões produzidos com CEM I, CEM II e CEM III exibem uma taxa de retracção muito grande durante os primeiros 14 dias e uma muito baixa retracção após os 28 dias.

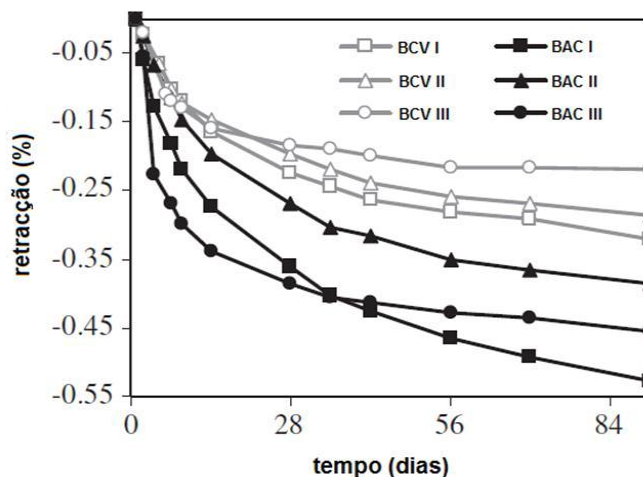


Figura 4.28 - Retracção em função do tempo, adaptado de Leemann *et al.* [84]

A fluência do BAC II e III é ligeiramente superior à fluência do betão de referência BCV II e III. No entanto, o BAC I tem uma fluência muito superior à do BCV I como se verifica na Figura 4.29. O coeficiente de fluência dos BAC's é superior ao dos betões correntes vibrados. Contudo, essa diferença vai diminuindo desde o cimento do tipo CEM I para o CEM II e finalmente para o CEM III como demonstrado na Figura 4.30.

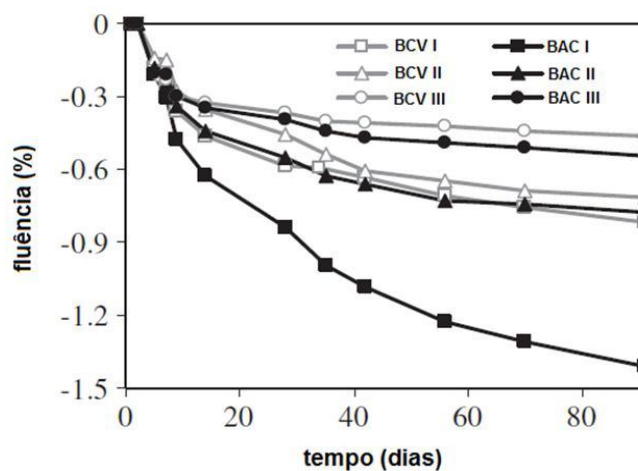


Figura 4.29 - Fluência em função do tempo, adaptado de Leemann *et al.* [84]

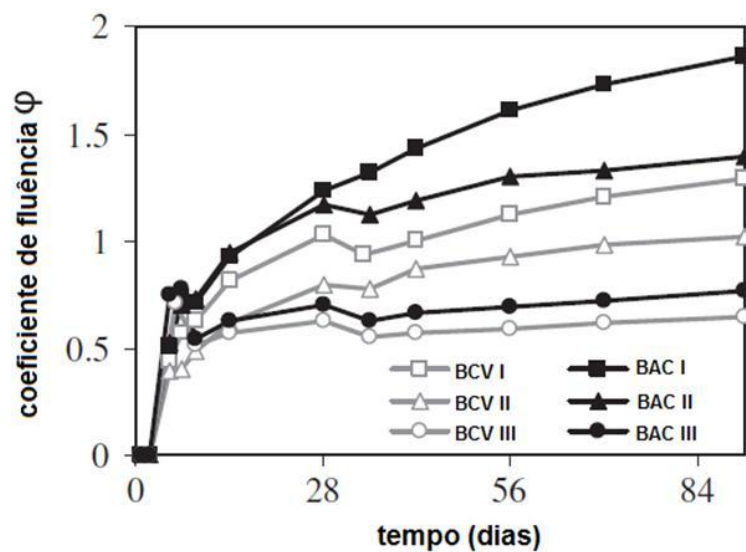


Figura 4.30 - Coeficiente de fluência em função do tempo, adaptado de Leemann *et al.* [84]

Na Figura 4.31 observa-se o comportamento dos provetes à fluência após um ajuste de carga aos 7 e 28 dias.

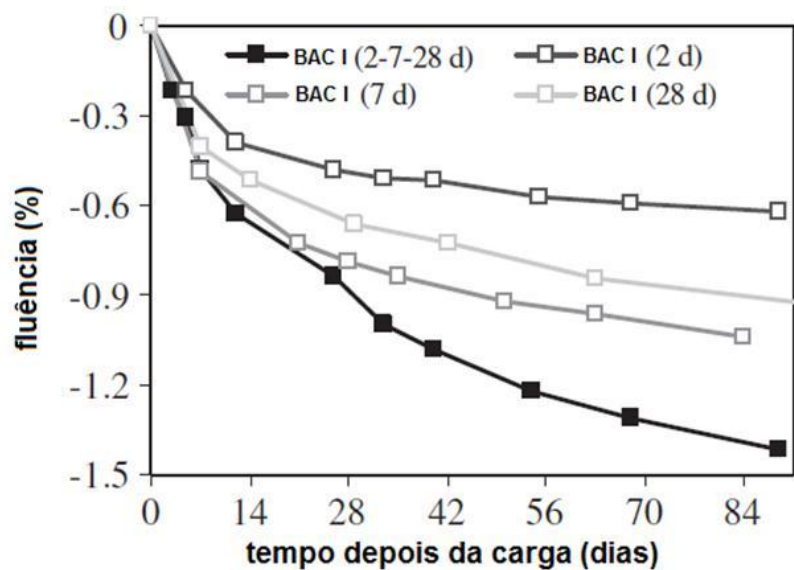


Figura 4.31 - Fluência do BAC 1 em função do tempo depois da carga, adaptado de Leemann *et al.* [84]

A aplicação de carga após 2 dias resulta numa menor fluência, contudo, o coeficiente de fluência mostra uma pequena diferença relativa entre as diferentes idades de carga como se verifica na Figura 4.32.

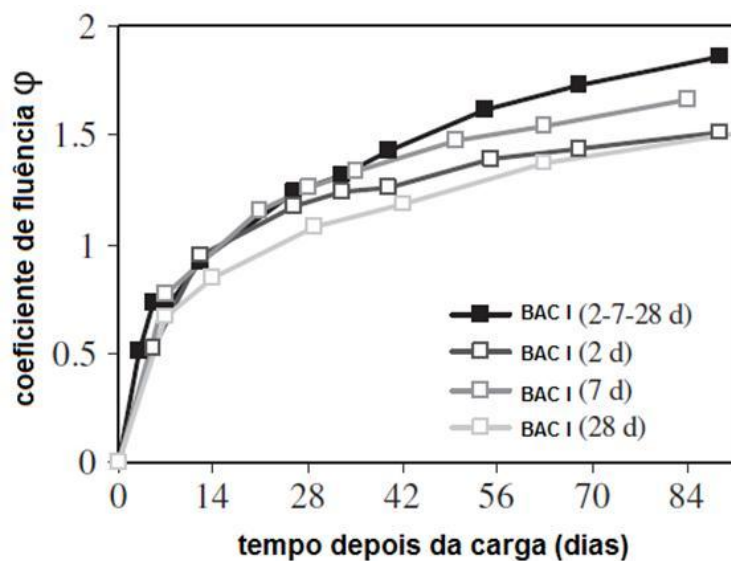


Figura 4.32 - Coeficiente de fluência do BAC 1 em função do tempo depois da carga, adaptado de Leemann *et al.* [84]

#### 4.5.3 - Síntese dos estudos de Leemann *et al.*

Os estudos de Leemann *et al.* permitiram concluir:

- Que a retracção é principalmente influenciada pelo volume de pasta existente no betão;
- Devido ao maior volume de pasta usado pelo BAC, este apresenta uma menor relação entre o módulo de elasticidade e de resistência à compressão comparativamente com o betão corrente vibrado. Consequentemente, o BAC tem maior retracção que o betão corrente vibrado;
- A variedade do tipo de cimento usado influencia a retracção mas não de forma tão directa como o volume da pasta;
- Contrariamente à retracção, o tipo de cimento usado influencia a fluência e o coeficiente de fluência de forma pelo menos igual ou maior em comparação com o volume de pasta.

#### 4.6 - Conclusões

Com base nos estudos analisados, conclui-se que, de uma forma geral, nenhum dos códigos utilizados para estimar as propriedades do betão normal no estado endurecido são totalmente válidos e em muito se afastam do comportamento do betão auto-compactável. No entanto, dependendo da composição do BAC, existem modelos que se aproximam mais dos valores experimentais.

Para se prever as características endurecidas do BAC como a resistência à tracção, módulo de ruptura e módulo de elasticidade (primeira parte), o modelo que mais se aproxima e que melhor estima os valores dessas mesmas características, de uma forma geral é o do ACI.

Já no caso da fluência e da retracção (segunda parte), o melhor modelo que se aproxima dos valores experimentais do BAC são os do CEB-FIP 90.



## Capítulo 5 - Conclusões e propostas para trabalhos futuros

### 5.1 - Introdução

A revisão bibliográfica efectuada na presente dissertação permitiu, numa primeira fase, comparar as propriedades no estado endurecido entre o betão auto-compactável, o betão corrente vibrado e o betão de alta resistência. Na segunda fase da revisão bibliográfica foram compilados e comparados entre si diferentes modelos de previsão das propriedades no estado endurecido do betão corrente vibrado e avaliada a viabilidade de aplicação destes modelos ao betão auto-compactável, através da comparação dos valores obtidos com recurso a estes modelos e os valores experimentais obtidos em diferentes estudos recentes. As propriedades como a resistência à compressão, resistência a tracção, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, retracção e fluência foram tratados nesta dissertação. As conclusões obtidas ao longo da análise efectuada nesta dissertação já foram apresentadas de uma maneira mais detalhada em cada capítulo para melhor interpretação e facilidade de leitura. No Sub-capítulo 5.2 apresenta-se apenas uma síntese das conclusões mais relevantes.

Após realizado todo o trabalho de pesquisa e elaboração desta dissertação, verificou-se existir ainda um vasto campo de investigação relativamente à caracterização das propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido. Nesse sentido, são apresentadas no Sub-capítulo 5.3 algumas propostas para trabalhos futuros nesta área.

### 5.2 - Conclusões

A revisão bibliográfica apresentada na presente dissertação permitiu compilar alguns dos estudos mais recentes apresentados em revistas internacionais de relevo e proporcionou uma ampla discussão e comparação dos modelos actualmente disponíveis para caracterizar as propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido. Em geral, a análise efectuada permitiu estabelecer as seguintes conclusões:

- Comparados os valores de previsão dos códigos aplicados ao betão vibrado corrente com os valores experimentais obtidos no betão auto-compactável, concluiu-se que todos os códigos podem ser aplicados, no entanto, alguns são mais apropriados para a estimativa de determinadas propriedades que outros;
- Os modelos propostos pelo ACI para o betão corrente vibrado são os que melhor se aproximam dos valores obtidos experimentalmente para o betão auto-compactável, nomeadamente, no que se refere à resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade e módulo de ruptura;

- Os modelos do CEB-FIP 90 para o betão corrente vibrado são os que melhor se aproximam dos valores obtidos experimentalmente para o betão auto-compactável, nomeadamente, no que se refere à estimativa dos valores de retracção e de fluência;
- As propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido são geralmente, no mínimo, iguais ou superiores, comparativamente com o betão corrente vibrado e o betão de alta resistência. Quanto à durabilidade, o betão auto-compactável é sem dúvida o melhor;
- Relativamente à fluência e à retracção, o betão auto-compactável apresenta valores mais elevados do que o betão corrente vibrado para igual valor de resistência à compressão;
- Em relação à fadiga do betão auto-compactável não há quaisquer relatos de resultados verificados;
- A evolução da retracção nos betões auto-compactáveis depende do tipo de adição usada, sendo que o fíler calcário apresenta menores valores comparativamente às escórias. Quanto maiores forem a resistência à compressão, o volume de pasta e a quantidade de cimento, menores serão os valores da retracção obtidos, isto é, variam de forma inversamente proporcional;
- Os modelos de cálculo usados para avaliar a retracção no betão corrente vibrado não são totalmente válidos para o betão auto-compactável. No entanto, o código que melhor se aproxima e parece ser mais adequado é o CEB-FIP 90, mas depende do tipo de cimento usado;
- Os modelos usados para o betão corrente vibrado subestimam tanto a fluência como o coeficiente de fluência quando aplicados ao betão auto-compactável, sendo o mais próximo o código do CEB-FIP 90, dependendo do tipo de cimento, pois este influencia o valor da fluência, juntamente com um maior volume de pasta.

### **5.3 - Propostas para trabalhos futuros**

A pesquisa efectuada e apresentada ao longo da presente dissertação permitiu detectar alguns temas que deverão merecer atenção futura, nomeadamente:

- Deve ser elaborado um estudo completo das propriedades do betão auto-compactável no estado endurecido utilizando uma ou várias amostras do mesmo betão, de forma a permitir comparar todas as características entre si e extrapolar valores de umas características para outras. Propõe-se que sejam estudados e efectuados em simultâneo todos os ensaios (resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade, retracção, fluência, fadiga e ensaio de absorção capilar) em diferentes tipos de betão, com diferentes razões de A/C. Que sejam utilizados várias adições e em diferentes percentagens de substituição. Todas essas combinações devem ser feitas também com diferentes dosagens de adjuvantes;

- Um dos estudos que deverá merecer atenção futura é a avaliação da influência que a incorporação de agregados reciclados, normalmente de menor resistência, terá nas propriedades do betão no estado endurecido. Esta avaliação deverá fazer-se para uma gama de resistências alargada, porquanto, para resistências mais baixas, é possível que as diferenças entre os diferentes tipos de betão sejam menos significativas.



## Referências Bibliográficas

- [1] ACI Committee 226 - Use of Fly Ash in Concrete, ACI Materials Journal, Set/Out., 1987 (Citado em [9])
- [2] ACI Committee 201 - Guide to Durable Concrete (ACI 201, 2R-77), ACI Manual of Concrete Practice 1988, Part 1, ACI, 1988 (Citado em [9])
- [3] ACI Committee 363 - State-of-the-Art Report on high strength concrete, Journal of the ACI, Vol. 81 n° 4, Aug. 1984 (Citado em [9])
- [4] Ahmad, S.; Shah, S. - Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete, PCI J 1985 (Citado em [8])
- [5] Aitcin, P.; Albinger, J. - Les Bétons à Hautes Performances, Expériences Nord Américaine et Française, Annales de l'ITBTP, n°473, Mar/Avr. 1989 (Citado em [9])
- [6] Albinger, J. - Fly Ash for Strength and Economy, Concrete International, ACI, Apr. 1984 (Citado em [9])
- [7] Almeida, E.S. - Avaliação do efeito de um adjuvante redutor de retracção no betão auto-Compactável, Tese de fim de curso de licenciatura, UA, Faro, Portugal, 2005
- [8] Almeida, F.; Barragán, B.; Casas, J.; El Debs, A. - Hardened Properties of self-compacting concrete - A statistical approach, CBM, March 2010
- [9] Almeida, I. - Betões de Alta Resistência e Durabilidade: Composição e Características, LNEC, Lisboa, 1990
- [10] American Concrete Institute - ACI Manual of concrete inspection, Detroit, Publication SP-2, 1967 (citado em [40])
- [11] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures, Report by Committee 209, 2004 (citado em [115])
- [12] American Concrete Institute, ACI 318-08 Building code for structural concrete, Detroit, USA, 2008 (citado em [157])
- [13] American Concrete Institute, ACI 363R-08 State of the art report on high strength concrete, Detroit, USA, 2008 (citado em [157])
- [14] American Concrete Institute, ACI Committee 318: building code requirements for structural concrete, Farmington Hills, MI, 1999 (Citado em [8])
- [15] Ashby, J.B. - The Use of Fly Ash in Concrete, Australian Experience, Vol. 1 (Citado em [9])

- [16] ASTM C469-02e1, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression (Citado em [8])
- [17] Attiogbe, E.; See, H.; Dazco, J. - Eng Prop Self-Consolid Concr 2002 (citado em [157])
- [18] Berg, W. - Early Strngth Development of Mortar and Concrete with Fly Ash, Supplementary Papers, Papers nº32 (Citado em [9])
- [19] Bernabeu, "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, 2000 (citado em [114])
- [20] Brazilian association of technical standards NBR 6118: design of concrete structures, Rio de Janeiro, 2003 [in Portuguese] (Citado em [8])
- [21] Brooks, J.; Wainwright, P. - Properties of Ultrahigh Strength Concrete Containing a Superpasticizer, Magazine of Concrete Research, CCA, vol. 35 nº125, Dec. 1983 (Citado em [9])
- [22] Buil, M.; Acker, P. - Creep of a Silica Fume Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 15 nº 3, 1985 (Citado em [9])
- [23] Burg, R.; Ost, B. Engineering properties of commercially available highstrength concretes, Research and development bulletin - RD104T, Skokie- Illinois: Portland Cement Association, 1992 (Citado em [8])
- [24] Cabrera, J.G. - The used of Pulverized Fuel Ash to Produce Durable Concrete, Improvement of Concrete Durability, an Institution of Civil Engineers Seminar (London, May, 1985), Thomas Telford, London, 1986 (Citado em [9])
- [25] Carette, G.; Malhotra, V. - Characterization of Canadian Fly Ashes and Their Relative Performance in Concrete, Canadian, Journal of Civil Engineering, Vol. 14, 1987 (Citado em [9])
- [26] CEB-FIP - Código modelo para hormigón estructural, 1990, ISBN 0-7277-1620-4 (citado em [115])
- [27] Cement and Concrete Association - Superplasticizing Admixtures in Concrete, CCA, 1976 (Citado em [9])
- [28] CEN, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1:2004, CEN, 2004

- [29] Chen, R.; Lund, J. et al - Seismic Design of High Strength Concrete Brigs Piers and Columns, Transportation Research Record nº 1180, Transportation Research Board, Washington, 1988 (Citado em [9])
- [30] CHOPIN, D. et al - Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete (SCC), Proceedings of the Third International Symposium on Self- Compacting Concrete, RILEM Proceedings PRO 33, 2003, ISBN: 2-912143-42-X (citado em [115])
- [31] Colins, T. - Proportioning high Strength Concrete to Control Creep and Shrinkage, ACI Materials Journal, Vol. 86, nº 6 (Citado em [9])
- [32] Comité Euro - International du Béton, Bulletin d'information nº190<sup>a</sup>, CEB-FIP Model Code 1990, First Predraft 1988, Lausanne (Switzerland), Jui. 1988 (Citado em [9])
- [33] Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP model code 1990, London: Thomas Telford, 1993 (Citado em [8])
- [34] Continho, A.S. - Pozolanas, Betões com Pozolanas e Cimentos Pozolânicos, LNEC, Memória nº 136, 1958 (Citado em [9])
- [35] Countinho, A. - O controle da Fabricação do Betão e a medição da sua Qualidade no Estaleiro, Memória nº 188, LNEC, 1962 (Citado em [9])
- [36] Countinho, A. - Pozolanas, Betões com Pozolanas e Cimentos Pozolânicos, LNEC, Memória nº 136, 1958 (Citado em [9])
- [37] Coutinho, A. - Estudo e Controle do Betão no Estaleiro, Técnica nº250, Lisboa, Mar., 1955 (Citado em [9])
- [38] Coutinho, A. - Fabrico e propriedades do Betão, LNEC, Vol. 1, 1973 (Citado em [9])
- [39] Coutinho, A. - La Puzolana y sus Propriedades, LNEC, Memória nº 211, 1963 (Citado em [9])
- [40] Coutinho, A.; Gonçalves, A. - Fabrico e propriedades do Betão, LNEC, Vol. 3, 1994
- [41] CSA Technical Committee, Reinforced Concrete Design, A23.3-04, Design of concrete structures, Rexdale, Ontario, Canadian Standards Association, 2004 (citado em [157])
- [42] Day, K. - Quaiity Control of 55 MPa, Concrete for Collins Place Project, Melbourne, Australia, Concrete International, ACI, Vol. 3 nº 3, 1981 (Citado em [9])
- [43] Della-Libera, G. - Durability of Concrete and its Improvement Through Water Reducing Admixtures, Topic IV (Citado em [9])

- [44] Dewar, J. - The indirect tensile strength of concrete of high compressive strength, in Technical Report n 42.377, Cement and Concrete Association: Wexham Springs, 1964
- [45] Dhir, R.K. - Pulverized Fuel Ash (Citado em [9])
- [46] Dias da Costa, D. - Comportamento Diferido do Betão - Modelação Numérica do comportamento de Fluência de vigas em betão de alta resistência, in Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas, DEC-FCTUC, UC, 2006
- [47] Documents Scientifiques et Techniques - Betons Auto-Plaçants: Recommandations Provisoires, Association Française de Génie Civil, Juillet 2000 (citado em [104])
- [48] Domone, P. - Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art - Report 23, RILEM Technical Committee 174 - SCC, 2001
- [59] EN 12390-3:2001, Testing hardened concrete - part 3: compressive strength of test specimens, 2001 (Citado em [8])
- [50] EN 12390-6:2000, Testing hardened concrete - part 6: tensile splitting strength of test specimens, 2000 (Citado em [8])
- [51] EN 445:1996, Grout for prestressing tendons, Test methods, 1996 (Citado em [8])
- [52] Estudos sobre a permeabilidade do betão - Influencia da granulometria, das dosagens de cimento e de água, da finura do cimento, da cura e da idade, Relatório do LNEC, Agosto de 1983 (citado em [40])
- [53] EUROCODE 2, EN-1992-1-1, Design of concrete structures: Part 1-1 (citado em [115])
- [54] European Standard, European committee for standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures (citado em [157])
- [55] Evans, R. - The plastic theories for the ultimate strength of reinforced concrete beams, J. Inst. Civil Engineers, Dez. 1943 (citado em [40])
- [56] Ferreira, R. - Betão Auto-Compactável: Metodologia de Composição, dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Materiais de Construção na Universidade do Minho, Guimarães, Julho de 2001
- [57] Fulton, F. - Concrete Technology, A South African handbook, Johannesburg, Ed. Conc. Assoc., 1957 (citado em [40])
- [58] Gardner, N.; Zhao, J. - Mechanical properties of concrete for calculation of long term deformations, In: Proceedings of the second canadian on cement and concrete, Vancouver, Canada, 1991 (Citado em [8])

- [59] Gettu, R.; Gomes, P.; Agulló, L.; Josa, A. - High-strength self-compacting concrete with fly ash: development and utilization, In: Proceedings eight CANMET/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete (Las Vegas), ACI SP-221, Farmington Hills (USA): American Concrete Institute, 2004 (Citado em [8])
- [60] Giplan, M.; Haque, M. - Strength Development of Fly Ash Concretes, *Matériaux et Constructions*, RILEM, Vol.19 n° 109 (Citado em [9])
- [61] Gonçalves, A. - Estudo sobre poeiras de Silica Amorfa, Relatório (Proc nº 022/1/6388), LNEC, 1981 (Citado em [9])
- [62] Gonçalves, A. - Resistência do Betão nas Estruturas, Tese, LNEC, *Materiais de Construção*, Out, 1987 (Citado em [9])
- [63] Gonnerman, H.; Shuman, E. - Compression, flexure and tension test of plain concrete, *Proc. ASTM*, Part II, Vol. 28, 1928 (citado em [40])
- [64] González, I. - *Homigón de Alta Resistencia*, Madrid: INTEMAC - Instituto Tecnico de Materiales y Construcciones, 2001
- [65] Grube, H.; Rickert, J. - Self Compacting Concrete - Another Stage in the Development of the 5 - Component System of Concrete, Dusseldorf, 1990
- [66] Holand, I. - High Strength Concrete, A Major Research Programme (Citado em [9])
- [67] Holand, I. - High Strength Structural Concrete - Materials and Mechanical Properties, *Nordisk Betong*, Stockholm, Vol.2 n°3, 1988 (Citado em [9])
- [68] Holschemacher, K. - Hardened Material Properties of Self-Compacting Concrete, *Lithuanian Academy of Sciences - Journal of Civil Engineering and Management*, vol X, n°4, 2004
- [69] Holschemacher, K.; Klug, Y. - A database for the evaluation of hardened properties of SCC, *Lacer*, 2002 (citado em [157])
- [70] Hueste, M.; Chomprea, P.; Trejo, D.; Cline D.; et al - Mechanical properties of high-strength concrete for prestressed members, *ACI Struct J* 2004 (Citado em [8])
- [71] INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL (EHE-08), Anejo 17, Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante, 2008, ISBN 978-84-498-0830-2 (citado em [115])
- [72] Ispas, T.; Ionescu, I. - Production of Fly Ash Concretes Using Superplasticizers (Citado em [9])

- [73] Jaccoud, J.; Farra, B.; Leclercq, A. - Tensile Strength - Modulus of Elasticity - Bond - Tension Stiffening - Limit State of Cracking, in Report to the Joint CEB/FIP Working Group on HSC/HPC, Comité Euro-International du Béton: EPF Lausanne, 1995
- [74] Jia, W. et al - Improvement of Paste Aggregate Interface by Adding Silica Fume (Citado em [9])
- [75] Joshi, R. et al - Strength and Durability of Concrete with High Proportions of Fly Ash and Other Mineral Admixtures, Durability of Building Materials, Elsevier Science Pub., Amsterdam, vol. 4, 1987 (Citado em [9])
- [76] Kashima, S.; Kanasawa, R.; Okada, R.; Yoshikawa, S. - “Application of Self-Compacting Concrete Made with Low-heat Cement for Bridge Substructures of Honshu-shikoku Bridge Authority”, International Workshop on Self-Compacting Concrete, 1998 (citado em [114])
- [77] Kitamura, H.; Ito, H.; Chitamatsu, R; Kamada, F.; et al - Construction of Prestressed Outer Tank for LNG Storage Using High-Strength Self-Compacting Concrete, International Workshop on Self-Compacting Concrete, 1998 (citado em [114])
- [78] Kohno, K.; Komatsu, H. - Use of Ground Botton Ash and Silica Fume in Mortar and Concrete, Vol.2 (Citado em [9])
- [79] L’Hermite - Volume changes of concrete, Proc. IV Int. Symp. Chem. Cem., Washington D. C., NBS Monograph 43, Set. 1962 (citado em [40])
- [80] L’Hermite, R.; Brocard, J.; Joisel, A. - Béton. Fabrication. Mise en oeuvre, in Techniques de l’Ingénieur, Paris, s. d. (citado em [40])
- [81] L’Hermite, R.; Mamillan, M.; Lefèvre - Nouveaux résultats de recherches sur la déformation et la rupture du béton, Ann. Inst. Tech. Bat. Trav. Publ., n° 207, Março-Abril 1965 (citado em [40])
- [82] LAB. NAC. ENG. CIVIL - Betões. Determinação da permeabilidade ao ar e à água. Método de Figg, Especificação E 413 (citado em [40])
- [83] Lamond, J.F. - Twenty Five Years Experience Using Fly Ash in Concrete, vol.1 (Citado em [9])
- [84] Larrard, F. Malier, Y. - Engineering properties of very high performance cncretes, in High Performance Concrete - From Material to Structure, Y. Malier, editor E&FN Spon: London, 1994

- [85] Larrard, F., et al. Optimization of Self-Compacting Concrete Thanks to Packing Model, First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Sweden, 1999 (citado em [155])
- [86] Leemann, A.; Hoffmann, C. - Properties of self-compacting and conventional concrete - differences and similarities, Mag Concr Res 2005 (citado em [157])
- [87] Leemann, A.; Lura, P.; Loser, R. - Shrinkage and creep of SCC - The influence of paste volume and binder composition, CBM, 25, 2011
- [88] Linger, D.; Gillespie, H. - A study of the mechanism of concrete fatigue and fracture, Highway Res. News, Fev. 1966, nº 22 (citado em [40])
- [89] Loland, K.; Hustad, T. - Silica in concrete, Report Section nr.2, Mechanical Properties, SINTEF Report nr. STF 65 A 81031, Cement and Concrete Research Institute, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim (Norway), 1981 (Citado em [9])
- [90] Lorman, W. - The theory of concrete creep, Proc. Am. Soc. Test. Mat., Vol. 40, 1940 (citado em [40])
- [91] Malhotra, V. - Fly Ash in Concrete, CANMET, Pub. SP-85-3, 1986 (Citado em [10])
- [92] Markestad, A. - An Investigation of Concrete in Regard to Permeability Problems and Factors Influencing the Results of Permeability Tests, Publication STF 65 A 77027, Cement and Concrete Research Institute, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim (Norway), 1977 (Citado em [9])
- [93] Martí, J.; Serna, P.; Arbelaez, C.; Rigueira V. - Comportamiento adherente del hormigón autocompactante en transmisión y anclaje (Adhesion behavior of SCC at transmission and anchorage), Materiales de Construcción 2006 (citado em [157])
- [94] Massazza, F.; Costa, U. - Problemi Reologici Connessi con l'Utilizzazione del Cemento, Il Cemento, Vol. 79 nº 4, Oct. 1982 (Citado em [9])
- [95] Mc Currich, L. - Permeability testing of site concrete - a review of methods and experience, Permeability of Concrete and its Control, London, 12 December 1985 (citado em [40])
- [96] McCurrish, L. - Reduction in Permeability and Chloride Diffusion with Superplasticizers, Concrete, Aug. 1986 (Citado em [9])
- [97] Mehta, P.K. - Concrete, Structure, Properties and Materials, Ed. Prentice Hall, New Jersey, 1986 (Citado em [9])

- [98] Mehta, P.K. - influence of Pozzolanic Admixtures of the Transition Zone in Concrete. Durability of Concrete, Aspects of Admixtures and Industrial By Products, International Seminar, April 1986, Document D1:1988, Swedish Council for Building Research, Stockholm, 1988 (Citado em [9])
- [99] Mindess, S. - Mechanical Performance of Cementitious Systems, Structure and Performance of Cements, P. Barnes, Ed., Applied Science Publishers, Essex, 1983, Chapter 7 (Citado em [9])
- [100] Murdock, J.; Kesler, C. - Effect of range of stress on fatigue strength of plain concrete beams, J. Am. Conc. Inst., Agosto 1958 (citado em [40])
- [101] Nasser, K.; Aj-Manaseer, A. - Creep of Concrete Containing Fly Ash and superplasticizer at Diferent Stress/Strength Ratios, ACI Journal, Jul/Aug. 1986 (Citado em [9])
- [102] Nawa, T.; Izumi, T.; Edamatsu, Y. - State-of-the-art Report on Materials and Design of Self-Compacting Concrete, in «International Workshop on Self-Compacting Concrete», August, 1998 (citado em [104])
- [103] Negro, A.; Montanaro, L. - Concrete Durability, Il Cemento n°1, Gen/Mar. 1989 (Citado em [9])
- [104] NEPOMUCENO, M.- Metodologia para a composição de BAC, PhD, UBI, 2005.
- [105] Neville, A. - Properties of concrete, 4ª Edition, Longman, Edinburg, 1995 (citado em [114])
- [106] NEVILLE, A. - Properties of Concrete, 4th ed., Longman Group, London, England, 1995, ISBN 0-582-23070-5 (Citado em [9])
- [107] Neville, A. - Properties of concrete, Londres, Ed. Sir Isaac Pitman, 1963 (citado em [40])
- [108] Neville, A. - Propriedades do Concreto, Trad. Salvador E. Giamusso, Ed. Pini, São Paulo, 1982 (Citado em [9])
- [109] Neville, A.; Brooks, J. - Concrete Technology, Longman, Essex, 1987 (Citado em [9])
- [110] Neville, A.; Dilger, W.; Brooks, J.- Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, Essex (England), 1983 (Citado em [9])
- [111] New Zealand Standard, Concrete structures standard, NZS 3101:2006, The design of concrete structures, Wellington, New Zealand (citado em [157])

- [112] Ngab, A.; Nilson, A.; Slate, F. - Shrinkage and Creep of High Strength Concrete, ACI Journal, Vol. 78 nº4, 1981 (Citado em [9])
- [113] Norwegian Council Standardization, Design of concrete structures, Norwegian code, NS 3473, Oslo, Norway, 1992 (Citado em [8])
- [114] Nunes, S. - Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades, «Dissertação de Mestrado apresentada na FEUP», Porto, Setembro 2001
- [115] Núñez, E.; Ruiz, J.; Cánovas, M. - Retracción y fluencia de hormigón autocompactante de resistência moderada, 2º Congresso Ibérico sobre hormigón Autocompactante, Guimarães - 1 y 2 de Julio de 2010
- [116] Okamura, H.; Ouchi, M. - “Self-Compacting Concrete”, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, nº 1, April, 2003
- [117] Okamura H.; Ouchi, M. - Self-Compacting Concrete: Development, Present Use and Future (Keynotes Lectures), in «Proceedings of the 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete», Sweden, ISBN:2-912143-09-9, Sept. 1999 (citado em [104])
- [118] Olokun F. - Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: evaluation of existing relations for normal weight concrete, ACI Mater J 1991 (Citado em [8])
- [119] Ouchi M. - Applications of self compacting concrete in Japan, Europe and the United States, Kochi University of Technology, Kochi, Japan, 2003 (citado em [157])
- [120] Owens, P. - Fly Ash and its Usage in Concrete, Concrete, Vol. 13 nº 7, Jul. 1979 (Citado em [9])
- [121] Papayianni, J. - Strength and Bond Data for Greek High Lime Fly Ash Concrete International, vol. 1 (Citado em [9])
- [122] Parrot, L.J. - The Properties of High Strength Concrete, CCA, Technical Report TRA 417, 1969 (Citado em [10])
- [123] Payne, J.; Dransfield, J. - The influence of Admixtures and Curing on Permeability, Permeability of Concrete and its Control, Papers for a one-day Conference, The Concrete Society, London, Dec. 1985 (Citado em [9])
- [124] Petersson, O.; Billberg, P. - Investigation on Blocking of Self-Compacting Concrete with Different maximum Aggregate Size and Use of Viscosity Agent Instead of Filler, in «Proceeding of the 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete», Sweden, ISBN: 2-912143-09-8, Sept. 1999 (citado em [104])

- [125] Powers, T.; Copeland, L.; Hayes, J.; Mann, H. - Permeability of Portland cement paste, J. Am. Conc. Inst., Nov. 1954, Res. Dev. Lab. Portl. Cement Assoc. Bull, abril 1955 (citado em [40])
- [126] Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, Decreto-Lei nº 349-C/83 de 30 de Julho de 1983, Imprensa Nacional, Casa da Moeda, E.P., Lisboa, 1985 (Citado em [10])
- [127] Rheobuild 2000 - Modern Advanced Concrete, MAC, (italy), Vol. 15 nº1, Nov. 1983/Mag. 1984 (Citado em [9])
- [128] Ribeiro, A.; Vieira, M. - Retracção do betão, Ordem dos Engenheiros, LNEC, Lisboa, 2004 (citado em [104])
- [129] Ros, M. - Versuche und Eefahrungen an ausgeführten Eisenbeton - Bawerken in der Schweiz 1924-1937, Eidgenossische Materialprüfungs und Veruchanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, Bericht nº 99, Zurich, 1937 (citado em [40])
- [130] Ruettggers, A.; Vidal, E.; Wing, S. - An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Boulder Dam, Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 26, 1930 (citado em [40])
- [131] Saad, M.; Oliveira, P.; Salles, F. - A influência de Alguns Parâmetros Sobre a Resistência do Concreto, Reunião de 1983 do instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo (Citado em [9])
- [132] Samman, T.; Mirza, W.; Wafa, F. - Plastic Shrinkage of Normal and High-Strength Concrete: a comparative study, ACI Materials Journal, American Concrete Institute, 1996
- [133] Seki, G.; Rad, F.; Yamane, F.l - Recherches Experimentales Sur l'Amélioration du Béton par L'Incorporation de Sous, Produits Industriels, Annales de l'ITBTP nº 436, Jul/Aôu. 1985 (Citado em [10])
- [134] Sellevold, E. - Review: Microsilica in Concrete, Report to Elkem AVS, Elkem Chemicals, Oslo, 1984 (Citado em [9])
- [135] Sellevold, E. - The Function of Condensed Silica Fume in High Strength Concrete (Citado em [9])
- [136] Sellevold, E.; Radjy, F. et al - Condensed Silica Fume (Microsilica) in Concrete, Water Demand and Strenth Development, Vol II (Citado em [9])
- [137] Senbetta, Scholer - Testing concrete curing efficiency, Am. Conc. Inst., Jan.-Fev. 1984 (citado em [40])

- [138] SENG, V. et al - Creep and shrinkage of self-compacting concrete with different limestone powder contents, RILEM Proceedings PRO 42, 2005, ISBN: 2-912143-61-6 (citado em [115])
- [139] Shiomi, I.; Masuda, Y.; Abe, M.; Yasuda, M. et al - Influence of Various factors on drying shrinkage of high-strength concrete, in High Strength-Concrete Proceedings, Lillehammer, Norway, 1993
- [140] Skarendahl, Á. - “In situ Applications of SCC - the Swedish experience”, Self-Compacting Concrete, Demonstration and International Workshop, Advanced Concrete and Masonry Centre, Paisley, 2001 (citado em [114])
- [141] Skarendahl, A. - Early Age and Hardened Properties (Background Document), in «Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC», RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 2-912143-23-3, 2000 (citado em [104])
- [142] Skarendahl, A. - Foreword, in «Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC», RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 2-912143-23-3, 2000 (citado em [104])
- [143] Sonebi, M.; Bartos, P.; Zhu, W.; Gibbs, J. et al - “Final Report of Task4: Properties of Hardened Concrete”, Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete, Brite Euram project BRPR-CT96-0366, 2000 (citado em [114])
- [144] Spanish code for structural concrete EHE, Real Decreto 2661/1998, Madrid, December 11, 1998 [in Spanish] (Citado em [8])
- [145] SSC European Project Group - The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Productin and Use, UK, May, 2005
- [146] Superplastificante em Concreto ainda em Fase Experimental, Dirigente Construtor, Ed. Pini, São Paulo, Mar. 1980 (Citado em [9])
- [147] Swamy, R. - High Strength Concrete, Material Properties and Structural Behaviour (Citado em [9])
- [148] Swamy, R.; Anand, K. - Shrinkage and Creep Properties oh High Strength Concrete, Civil Engineering and Public Works Review, London, Vol. 68 nº 807, Oct. 1973 (Citado em [9])
- [149] The Concrete Society - Permeability Testing of Site Concrete, A Review of Methods and Experiences (Citado em [9])
- [150] Torii, K. et al - Applicability of Coal Ashes as an Admixture for Concrete. Transactions of the JCI, Vol. 7, 1985 (Citado em [9])

- [151] Turcry, P.; Loukili, A.; Haidar, K. - Mechanical properties, plastic shrinkage, and free deformations of self-consolidating concrete, First North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, Chicago, IL, ACBM, 2002 (citado em [157])
- [152] U.S. Bureau of Reclamation - Concrete Manual, Denver, 7ª ed., 1963 (citado em [40])
- [153] Valenta, O. - From the Second RILEM Symposium Durability of Concrete, In Prague, Matériaux et Constructions, RILEM, Vol. 3 nº 17, 1970 (Citado em [9])
- [154] Venuat, M. - Fly Ash and its Use in Cement and Concrete, B.R.E. Library Translation 1841, Building Research Establishment, Watford (England), Aug. 1974 (Citado em [9])
- [155] Vieira, M. - BAC - Reologia do Betão no Estado Fresco, IST, 2008
- [156] Vilanova, A. - Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante, (Influence of the dosification and different types of cements and additives on the mechanical properties of SCC), Doctoral Thesis, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Universidad Politécnica de Madrid (citado em [157])
- [157] Vilanova, A.; Fernandez-Gomez, J.; Landsberger, A. - Evaluation of the mechanical properties of self compacting concrete using current estimating models, Estimating the modulus of elasticity, tensile strength, and modulus of rupture of self compacting concrete, CBM, March 2011
- [158] Wolsifier, J. - Ultra High Strength Field Placeable Concrete with Silica Fume Admixture, Concrete International, ACI, Apr. 1984 (Citado em [9])
- [159] Yamato, T; Sugita, H. - Shrinkage and Creep of Mass Concrete Containing Fly Ash, Vol.1 (Citado em [9])
- [160] Yuan, R.; Cook, J. - Study of a Class C Fly Ash Concrete, Vol. 1 (Citado em [9])