



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Civil

ISEL



ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS REGULAMENTARES DE PREVISÃO DA RETRACÇÃO DO BETÃO

ANDRÉ EMANUEL BICHO LOURENÇO DE OLIVEIRA

Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na área de especialização de Edificações

Orientadores:

Doutor Luís Oliveira Santos, Invest. Principal do LNEC, Prof. Adjunto do ISEL

Doutor João de Almeida Fernandes, Investigador Coordenador do LNEC, Prof. Coordenador do ISEL

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Vaz Pinto Almeida Vasques, Prof. Ajunto do ISEL

[Vogais]

Arguente: Doutora Maria Teresa Pina de Oliveira Santos Leite Garcia, Invest^a. Auxiliar do LNEC

Orientador: Doutor Luís Oliveira Santos, Invest. Principal do LNEC, Prof. Adjunto do ISEL

Orientador: Doutor João de Almeida Fernandes, Investigador Coordenador do LNEC, Prof.

Coordenador do ISEL

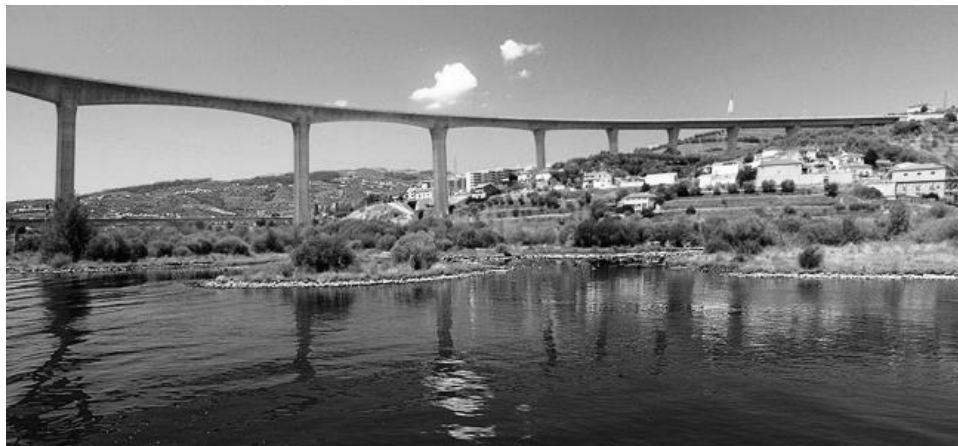
Dezembro, 2011



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Civil

ISEL



ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS REGULAMENTARES DE PREVISÃO DA RETRACÇÃO DO BETÃO

ANDRÉ EMANUEL BICHO LOURENÇO DE OLIVEIRA

Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na área de especialização de Edificações

Orientadores:

Doutor Luís Oliveira Santos, Invest. Principal do LNEC, Prof. Adjunto do ISEL

Doutor João de Almeida Fernandes, Investigador Coordenador do LNEC, Prof. Coordenador do ISEL

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Vaz Pinto Almeida Vasques, Prof. Ajunto do ISEL

[Vogais]

Arguente: Doutora Maria Teresa Pina de Oliveira Santos Leite Garcia, Invest^{ra}. Auxiliar do LNEC

Orientador: Doutor Luís Oliveira Santos, Invest. Principal do LNEC, Prof. Adjunto do ISEL

Orientador: Doutor João de Almeida Fernandes, Investigador Coordenador do LNEC, Prof. Coordenador do ISEL

Dezembro, 2011

À minha família...

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação foi efectuada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), instituição de Ciência e Tecnologia que concedeu os meios necessários para a sua realização.

O carácter deste trabalho é individual, contudo o seu desenvolvimento não seria possível sem a participação de diversas pessoas às quais manifesto o meu mais sincero agradecimento.

- Aos orientadores, Eng^o. João Almeida Fernandes, Investigador Coordenador e Director do Departamento de Estruturas do LNEC pela facilidade com que fui recebido e ao Eng^o. Luís Oliveira Santos, Investigador Principal do Núcleo de Observação de Estruturas, por todo o interesse demonstrado e ajuda incansável o que inclui o acesso a numerosa bibliografia facilitada e conhecimentos transmitidos, bem como todo o apoio, disponibilidade e sobretudo amizade;
- Ao Eng^o. Paulo Silveira, Investigador Principal e Chefe do Núcleo de Observação de Estruturas, por todas as facilidades com que fui acolhido no NOE e pelas sugestões prestadas;
- À Eng^a. Teresa Garcia Investigadora Auxiliar do Núcleo de Observação de Estruturas, pelo apoio, disponibilidade e sugestões;
- Ao Eng^o. João Pedro Santos, do NOE pela informação e bibliografia disponibilizada e por todas as sugestões e apoio;
- À Eng^a. Xu Min, Investigadora Auxiliar do NOE por todo o apoio prestado;
- Aos Técnicos Experimentadores do NOE, Victor Devesa, Amândio Marecos, José Fidalgo, João Paulo Santos e Diamantino Coelho, pelos conhecimentos transmitidos em diversas ocasiões.

Finalmente um agradecimento especial à minha família por todo o apoio, compreensão, coragem e incentivo que me foram transmitindo ao longo de todo este processo.

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS REGULAMENTARES DE PREVISÃO DA RETRACÇÃO DO BETÃO

RESUMO

A adequada previsão do comportamento diferido do betão, designadamente da retracção, é essencial no projecto de uma obra de grandes dimensões, permitindo conceber, dimensionar e adoptar as disposições construtivas para um comportamento estrutural que satisfaça os requisitos de segurança, utilização e durabilidade.

O actual momento é marcado por uma transição em termos da regulamentação de estruturas, com a eminente substituição da regulamentação nacional por regulamentação europeia. No caso das estruturas de betão, o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP), em vigor desde 1983, será substituído pelo Eurocódigo 2. Paralelamente, a *Federation International du Béton* publicou o *Model Code 2010 (MC2010)*, um documento que certamente terá forte influência na evolução da regulamentação das estruturas de betão.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objectivo estabelecer uma comparação entre os diferentes modelos de previsão da retracção incluídos nos documentos normativos referidos, identificando as principais diferenças e semelhanças entre eles e quantificando a influência dos diferentes factores considerados na sua formulação, de forma a avaliar o impacto que a introdução destes modelos de previsão irá ter no projecto de estruturas de betão.

Com o propósito de aferir a forma como estes modelos reflectem a realidade do fenómeno em estudo, procedeu-se à aplicação destes modelos de previsão ao betão de duas obras cujo comportamento estrutural é observado pelo LNEC, concretamente a ponte Miguel Torga, sobre o rio Douro, na Régua, e a ponte sobre o rio Angueira, no distrito de Bragança. Em ambas as obras tinha sido efectuada a caracterização *in situ* da retracção, tendo-se comparado os valores experimentais assim obtidos com os valores provenientes da aplicação dos modelos de previsão considerados neste trabalho.

Finalmente são apresentadas algumas conclusões obtidas com o trabalho desenvolvido nesta dissertação, bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

Palavras-Chave: comportamento diferido, betão, retracção, modelos de previsão, propriedades mecânicas, regulamentação.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STANDARD MODELS FOR PREDICTING SHRINKAGE ON CONCRETE

ABSTRACT

An accurate prediction of time dependent behaviour of the concrete, namely shrinkage, is essential for the design of concrete structures, especially for large structures, allowing the conception, dimensioning and detailing of structures forward the fulfilment of safety, serviceability and durability requirements.

The replacement of the national concrete code (REBAP) by the Eurocode 2 will strongly change the way the prediction of shrinkage and concrete design. Recently, the *Fédération Internationale du Béton* published the Model Code 2010 (MC2010), which will certainly have strong influence in future European concrete codes.

The aim of this work is to assess the impact of the new shrinkage prediction models in the design of concrete structures.

In this context, this work want to establish a comparison between different shrinkage prediction models in the documents listed above, identifying the main differences and similarities between them and quantifying the influence of different factors considered in their formulation with the purpose to realize the impact that the introduction of these models will have in concrete structures.

With the goal to realise how these models reflect the reality of the phenomenon we proceeded to apply these models to predict two different concrete bridges observed by LNEC: Miguel Torga bridge over the Douro River in Régua and the bridge over the Angueira river. In both bridges the shrinkage characterization has been made since years, like that it's possible to compare the experimental values with the values we will obtain from the application of the prediction models considered in this work.

Finally the conclusions are presented and some future developments are proposed.

Key Words: time dependent behaviour, concrete, shrinkage, prediction models, mechanical properties, standardisation.

NOTAÇÕES E SIGLAS

NOTAÇÕES

Letras Latinas:

A_c	área total da secção transversal de uma secção de betão
f_{ck}	valor característico da tensão de ruptura do betão à compressão aos 28 dias de idade
f_{cm}	valor médio da tensão de ruptura do betão à compressão aos 28 dias de idade
$f_{cm}(t)$	valor médio da tensão de ruptura do betão à compressão aos t dias de idade
h_0	espessura equivalente/fictícia de um elemento
HR	humidade relativa do ar
T	temperatura
t	idade do betão
t_0	idade do betão no momento do carregamento
t_s	idade do betão quando se inicia a retracção
u	perímetro da secção transversal de betão em contacto com a atmosfera

Letras Gregas:

$\beta_s(t-t_s)$	coeficiente que descreve o desenvolvimento da retracção ao longo do tempo
ε	extensão
ε_{cs0}	coeficiente nominal de retracção do betão
$\varepsilon_{s(f_{cm})}$	factor para ter em conta o efeito da resistência do betão na retracção

SIGLAS

CEB	Comité Euro-International du Béton
DE	Departamento de Estruturas do LNEC
EC2	Eurocódigo 2
EN	Norma Europeia
ENV	Pré-Norma Europeia
fib	Fédération Internationale du Béton / International Federation for Structural Concrete
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NOE	Núcleo de Observação de Estruturas do LNEC
MC	Model Code
NP	Norma Portuguesa

ÍNDICE DO TEXTO

Capítulo 1

INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Organização da Dissertação	4

Capítulo 2

COMPORTAMENTO DO BETÃO.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Estrutura Interna do Betão	6
2.3. Comportamento Diferido do Betão	15
2.4. Retracção	18
2.5. Factores que Condicionam a Retracção	19

Capítulo 3

MODELOS REGULAMENTARES DE PREVISÃO DE RETRACÇÃO	23
3.1. Considerações Gerais	24
3.2. REBAP	24
3.3. Eurocódigo 2	27
3.3.1. Eurocódigo 2 – Parte 1.1 - Regras Gerais para Edifícios	27
3.3.2. Eurocódigo 2 – Parte 2 - Pontes	30
3.3. Model Code 2010	31

Capítulo 4

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE RETRACÇÃO	37
4.1. Comparação Geral	37
4.1.1. REBAP	40
4.1.2. Eurocódigo 2	40
4.1.3. Model Code 2010	44
4.2. Comparação de modelos	46

4.2.1.	REBAP vs. EC2 vs. MC2010.....	46
4.2.2.	Efeito da variação do valor médio da tensão de ruptura por compressão .	47
4.2.3.	Efeito da variação do valor da humidade relativa (HR)	51
4.2.4.	Efeito da variação da espessura equivalente (h_0).....	57
4.3.	Considerações finais	58

Capítulo 5

COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
5.1. Considerações gerais	61
5.2. Procedimento experimental	62
5.2.1. Noções gerais	62
5.2.2. Extensómetros	62
5.2.3. Pares Termo-Eléctricos	63
5.2.4. Termómetros de resistência eléctrica.....	64
5.2.5. Processo construtivo dos provetes de retracção	64
5.2.6. Sistemas de aquisição e transmissão de dados	66
5.3. Tratamento de dados	67
5.4. Retracção observada na ponte Miguel Torga.....	69
5.4.1. Descrição da estrutura	69
5.4.2. Descrição da instrumentação	70
5.4.3. Comparação dos resultados experimentais com os modelos de previsão.72	
5.4.3.1. REBAP	74
5.4.3.2. EC2 – Parte 1.1 – Regras gerais e para edifícios	77
5.4.3.3. EC2 – Parte 2 - Pontes.....	80
5.4.3.4. MC 2010	82
5.4.4. Retracção para betão jovem.....	84
5.4.5. Retracção para betão com extensão de retracção estabilizada	86
5.5. Retracção observada na ponte de Angueira	88
5.5.1. Descrição da estrutura	89
5.5.2. Descrição da instrumentação	90
5.5.3. Comparação dos resultados experimentais com os modelos de previsão.90	
5.5.3.1. REBAP	91
5.5.3.2. EC2 – Parte 1.1 – Regras gerais e para edifícios	93
5.5.3.3. EC2 – Parte 2 - Pontes.....	95
5.5.3.4. MC 2010	97
5.6. Considerações finais	98
5.6.1. Ponte Miguel Torga.....	99
5.6.2. Ponte sobre o rio Angueira	99

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	101
6.1. Considerações finais	101
6.2. Perspectivas futuras	103
BIBLIOGRAFIA	105
ANEXOS	109
- Anexo A - <i>Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP)</i>	111
- Anexo B <i>Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1</i>	117
- Anexo C - <i>Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 2</i>	123
- Anexo D - <i>Model Code 2010</i>	125

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Comportamento do Betão

Figura 2.1	-	Esquema da estrutura do cimento após hidratado	16
Figura 2.2	-	Representação esquemática da relação tensões-extensões para a análise estrutural	17
Figura 2.3	-	Representação esquemática da tendência da retracção com base nos aglomerados utilizados	20

CAPÍTULO 3

Modelos de Previsão Regulamentares de Retracção

Figura 3.1	-	Função $\beta_s(t)$, que exprime a evolução da Retracção com a idade do betão, para vários valores de espessura fictícia, h_0	26
------------	---	--	----

CAPÍTULO 4

Comparação entre os Modelos de Retracção

Figura 4.1	-	Evolução da extensão de retracção no betão para tempo infinito, variando valores de h_0 segundo o REBAP	42
Figura 4.2	-	Evolução no tempo da retracção no betão segundo EC2-2, para tempo infinito variando o valor de f_{ck}	43
Figura 4.3	-	Evolução no tempo da retracção no betão segundo o MC2010, para tempo infinito variando o valor de f_{ck}	45
Figura 4.4	-	Evolução no tempo da retracção no betão segundo o REBAP, EC2 e MC2010	46
Figura 4.5	-	Evolução da retracção no betão a tempo infinito variando valores de f_{cm} segundo o REBAP, EC2 e MC2010	47
Figura 4.6	-	Central Meteorológica	52
Figura 4.7	-	Central Higrométrica	53
Figura 4.8	-	Localização das estações	53
Figura 4.9	-	Gráficos de observação das humidades relativas para diferentes estações ao longo de Portugal Continental – Verão	54

Figura 4.10	- Gráficos de observação das humidades relativas para diferentes estações ao longo de Portugal Continental – Inverno	55
Figura 4.11	- Evolução da retracção no betão a tempo infinito variando valores de RH (%) segundo o REBAP, EC2 e MC2010	56
Figura 4.12	- Representação comparativa do andamento das curvas de extensão por retracção segundo o REBAP, EC2 e MC2010	57
Figura 4.13	- Evolução da retracção no betão a tempo infinito, variando valores de h_0 (cm) segundo o REBAP, EC2 e MC2010	57

CAPÍTULO 5

Comparação com Resultados Experimentais

Figura 5.1	- Extensómetros de corda Vibrante	63
Figura 5.2	- Termómetro	64
Figura 5.3	- Execução de provetes de retracção	65
Figura 5.4	- Data Loguer e expansor de canais	66
Figura 5.5	- Router e <i>Fatbox</i>	67
Figura 5.6	- Vista Geral da Ponte Miguel Torga	70
Figura 5.7	- Ponte Miguel Torga. Localização da secção instrumentada	71
Figura 5.8	- Ponte Miguel Torga. Secção Instrumentada S4	72
Figura 5.9	- Extensões de retracção na secção S4	73
Figura 5.10	- Ponte Miguel Torga. Secção S4. Retracção do provete CR4.8 em obra: curvas ajustadas a esses valores pelo REBAP, EC2 1.1, EC2 2 e MC2010 e curvas dos modelos	74
Figura 5.11	- Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o REBAP	75
Figura 5.12	- Curva média e curva proposta do REBAP	76
Figura 5.13	- Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 1.1	77
Figura 5.14	- Curva média e curva proposta do EC2 – 1.1	78
Figura 5.15	- Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 2	80
Figura 5.16	- Curva média e curva proposta do EC2 – 2	80
Figura 5.17	- Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o MC2010	82
Figura 5.18	- Curva média e curva proposta do MC2010	83
Figura 5.19	- Ponte Miguel Torga. Secção S4. Retracção do provete CR4.8 em obra: valores experimentais, curvas ajustadas a esses valores e curvas propostas pelo REBAP, EC2, e MC2010 para betão jovem	85

Figura 5.20	-	Ponte Miguel Torga. Secção S4. Retracção do provete CR4.8 em obra: valores experimentais, curvas ajustadas a esses valores e curvas propostas pelo REBAP, EC2, e MC2010 para betão com extensão de retracção estável	87
Figura 5.21	-	Vista geral da ponte sobre o rio Angueira	89
Figura 5.22	-	Ponte sobre o rio Angueira. Localização das secções instrumentadas	90
Figura 5.23	-	Extensões de retracção nas secções S1, S2, S3 e S4	91
Figura 5.24	-	Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o REBAP	91
Figura 5.25	-	Curva média e curva proposta do REBAP	92
Figura 5.26	-	Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 1.1	93
Figura 5.27	-	Curva média e curva proposta do EC2 – 1.1	94
Figura 5.28	-	Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 2	95
Figura 5.29	-	Curva média e curva proposta do EC2 – 2	95
Figura 5.30	-	Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o MC2010	96
Figura 5.31	-	Curva média e curva proposta do MC2010	97

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2

Comportamento do Betão

Quadro 2.1	-	Características dos componentes do clínquer Portland	9
Quadro 2.2	-	Características dos componentes do cimento Portland	13

CAPÍTULO 3

Modelos de Previsão Regulamentares de Retracção

Quadro 3.1	-	Valores da extensão de retracção do betão	25
Quadro 3.2	-	Valores do coeficiente η	25
Quadro 3.3	-	Valores de k_h na expressão 4.5	28
Quadro 3.4	-	Valores nominais da retracção livre por secagem, $\epsilon_{cd,0}$, em ‰ para o betão com cimentos CEM da Classe N	30
Quadro 3.5	-	Coeficientes α_i utilizados nas equações 4.20 e 4.23	34
Quadro 3.6	-	Valor da retracção total ($\times 10^3$) para betão estrutural com 70 anos de idade	35

CAPÍTULO 4

Comparação entre os Modelos de Retracção

Quadro 4.1	-	Parâmetros de que depende a retracção do betão segundo o REBAP, EC2 e MC2010	39
Quadro 4.2	-	Valores numéricos da variação da retracção no betão segundo o EC2-1.1, variando as classes de betão	41
Quadro 4.3	-	Comparação dos valores numéricos, de variação da retracção no betão do EC2-1.1 e do EC2 - 2 variando as classes de betão	43
Quadro 4.4	-	Valores numéricos de variação da retracção no betão segundo o MC 2010, variando o f_{ck}	45
Quadro 4.5	-	Valores da extensão de retracção no betão segundo o EC2-1.1, variando os valores de f_{ck}	49
Quadro 4.6	-	Valores da extensão de retracção no betão segundo o EC2-2, variando os valores de f_{ck}	50
Quadro 4.7	-	Valores de extensão de retracção do betão segundo o MC2010, variando os valores de f_{ck}	51

CAPÍTULO 5

Comparação com Resultados Experimentais

Quadro 5.1	-	Coeficientes de ajustamento dos modelos teóricos aos valores experimentais de retracção do betão para a ponte Miguel Torga	74
Quadro 5.2	-	Valores dos coeficientes de correlação de Pearson e média do erro	76
Quadro 5.3	-	Valores dos coeficientes de correlação de Pearson e média do erro	78
Quadro 5.4	-	Valores dos coeficientes de correlação de Pearson e média do erro	81
Quadro 5.5	-	Valores dos coeficientes de correlação de Pearson e média do erro	83
Quadro 5.6	-	Valores dos coeficientes de correlação de Pearson para cada modelo para betão jovem	84
Quadro 5.7	-	Valores da média das diferenças das extensões entre os pontos da curva teórica e os pontos da curva estimada	86
Quadro 5.8	-	Valores do coeficiente de Pearson (ρ) e média do erro para REBAP, EC2-1.1, EC2-2, MC2010 para a ponte sobre o rio Angueira	99

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O comportamento diferido do betão tem maior importância após a entrada das estruturas em serviço, pelo que os seus efeitos têm de ser considerados na verificação da segurança em relação aos estados limites de utilização. Esses efeitos traduzem-se em deformações, que são relevantes no caso de estruturas de grandes dimensões e em redistribuição de esforços.

O comportamento diferido do betão tem sido alvo de estudo por parte de diversos investigadores, tendo em vista a elaboração de modelos de previsão dos fenómenos associados, designadamente a retracção e a fluência, que permitam o adequado dimensionamento das estruturas.

Define-se retracção como uma variação de volume que ocorre, a temperatura constante e na ausência de qualquer tensão aplicada, desde o final da compactação até se atingir o estado limite de equilíbrio higrométrico com o ambiente [Coutinho, 1988]. O fenómeno da fluência define-se como sendo o aumento da deformação que se verifica ao longo do tempo numa peça sujeita a uma tensão constante, deduzindo as deformações devidas à retracção [Coutinho, 1988].

É importante referir que o comportamento diferido do betão é um fenómeno global, e a separação de retracção e fluência é efectuada apenas por motivos de conveniência [ACI 1992], este dois fenómenos não são independentes, contudo considerá-los como independentes é uma aproximação aceitável [Catarino, 1986; Pinho, 1991; Coutinho e Gonçalves, 1994; Neville, 2000; Kovler, 2001].

Quanto à regulamentação aplicada, esta tem o objectivo de regulação da actividade segundo parâmetros previamente estipulados e que estão relacionados com a segurança e economia, bem como a qualidade do projecto e futura obra. A regulamentação reflecte o conhecimento comum sobre a matéria e serve também como garantia de segurança para os utilizadores. Assim o projecto poderá ser

calculado com recurso a valores normalizados que ao serem introduzidos nos cálculos estruturais irão dotar o projecto de uma maior segurança, fazendo com que o projectista seja capaz de realizar um trabalho mais optimizado possível sempre entrando em linha de conta com o factor economia.

Atendendo que os fenómenos da retracção e fluência impõem deformações às estruturas, estes fenómenos são particularmente relevantes em estruturas de grandes dimensões. Com o passar do tempo, essas deformações podem provocar a degradação levando a consideráveis custos quer do ponto de vista económico como também do ponto de vista social. De uma forma geral a retracção do betão afecta significativamente a durabilidade do betão, as condições de serviço, a integridade estrutural, a estética e a estabilidade da estrutura [Goel e Kumar, 2007]

A eminente entrada em vigor da nova regulamentação europeia, designadamente do EC2, bem com a recente publicação do MC2010 tornam oportuna uma análise comparativa dos modelos de previsão incluídas nestes documentos de forma a identificar as principais alterações e quantificar as consequências decorrentes.

Os estudos desenvolvidos, quer a nível de acompanhamento de estruturas reais quer a nível da caracterização de provetes, têm permitido um aprofundamento significativo do conhecimento destes fenómenos, nomeadamente, dos factores que influenciam o seu desenvolvimento, os mecanismos do seu processamento e as consequências para as estruturas. Apesar de esta matéria ser alvo de estudo por muito investigadores, estas propriedades estão ainda longe de serem totalmente compreendidas, é na sequência desta evolução de conhecimentos que se tem verificado alterações significativas em termos regulamentares.

Com efeito, o modelo de previsão incluído no Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP), actualmente em vigor, foi baseado no *Model Code 78 (MC78)*. Posteriormente, foram desenvolvidos modelos de previsão no âmbito do *Model Code 1990 (MC90)* e do *Eurocódigo 2 (EC2)*, aprovado como Norma Portuguesa e que brevemente venha a ter carácter vinculativo. Muito recentemente o CEB apresentou uma nova evolução dos modelos de previsão do comportamento diferido do betão, incluído no MC2010. Estes modelos tornam possível a previsão de deformações e, conseqüentemente, têm a maior relevância na concepção e dimensionamento de grandes estruturas de betão.

Importa pois esclarecer quais as alterações decorrentes da utilização destes diferentes modelos de evolução de previsão da retracção.

1.2. Objectivos

O presente trabalho centra-se na análise comparativa dos modelos regulamentares de previsão da retracção do betão.

Atendendo ao enquadramento apresentado estabelecem-se os seguintes objectivos:

- Avaliação do impacto da introdução dos novos modelos regulamentares de previsão da retracção, decorrentes da substituição do REBAP pelo Eurocódigo 2.
- Comparação da eficiência dos referidos modelos de previsão.

A avaliação do impacto que a introdução destes modelos de previsão irá ter no projecto de estruturas de betão é efectuada através da comparação entre os modelos de previsão da retracção incluídos no REBAP, EC2 e MC 2010, identificando as principais diferenças e semelhanças e quantificando a influência dos diferentes factores considerados na sua formulação.

Com o propósito de aferir a forma como estes modelos reflectem a realidade do fenómeno em estudo, procedeu-se à aplicação destes modelos de previsão ao betão de duas obras cujo comportamento estrutural é observado pelo LNEC, concretamente a ponte Miguel Torga, sobre o rio Douro, na Régua, e a ponte sobre o rio Angueira, no distrito de Bragança. Em ambas as obras tinha sido efectuada a caracterização *in situ* da retracção, tendo-se comparado os valores experimentais assim obtidos com os valores provenientes da aplicação dos modelos de previsão considerados neste trabalho.

1.3. Organização da Dissertação

A dissertação apresentada é constituída por cinco capítulos e anexos, sendo que neste primeiro capítulo, denominado “Introdução”, é justificada a relevância do referido trabalho, os principais objectivos e a descrição sumária dos conteúdos dos capítulos apresentados.

No capítulo 2, “Comportamento do Betão”, faz-se a descrição do comportamento elástico e diferido do betão e de alguns conceitos importantes sobre a caracterização deste material bem como de alguns factores que condicionam o fenómeno em estudo. Além disso parte deste capítulo é dedicado unicamente ao fenómeno da retracção em si, e é feita a apresentação do fenómeno e dos factores que são intrínsecos ao mesmo.

No capítulo 3, “Modelos de Previsão Regulamentares de Retracção”, é feita a apresentação dos vários modelos de previsão da retracção que foram alvos de estudo, nomeadamente o REBAP, o EC2 parte 1.1 e parte 2 e ainda o mais recente MC2010.

No capítulo 4, “Comparação entre os Modelos de Retracção”, comparam-se os modelos enumerados anteriormente. Neste capítulo é possível visualizar um confronto directo entre os diversos modelos de forma a compreender o comportamento de cada um bem como as principais diferenças e semelhanças.

No capítulo 5, após uma breve descrição dos equipamentos utilizados pelo NOE para a medição das extensões de retracção em obra, é feita uma comparação entre os valores experimentais obtidos em duas obras e os valores previstos pelos modelos de retracção abordados neste trabalho.

Por último o capítulo 6 é dedicado às principais conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho bem como a indicação de algumas directrizes que poderão ser seguidas no futuro.

Capítulo 2

COMPORTAMENTO DO BETÃO

2.1. Introdução

Foi a partir do século XIX, com a substituição progressiva da cal como ligante hidráulico pelo cimento *Portland* que as estruturas de betão se foram firmando na nossa sociedade. Posteriormente, no século XX, assim que se deu a introdução de armaduras de aço no betão, capazes de absorver as tensões de tracção que o betão por si só não tinha essa capacidade, o betão armado tornou-se um dos mais importantes elementos para a engenharia civil.

Mais tarde, instalou-se a ideia tentar eliminar a fissuração no betão por intermédio de armaduras de pré-esforço, contudo esta não foi uma ideia muito bem sucedida, a utilização de betão pré-esforçado exigia mais pesquisa sobre o assunto, nomeadamente de alguns fenómenos em especial, são eles a retracção e a fluência e também a relaxação do aço. Ao longo dos tempos foram feitas sucessivas tentativas para a introdução de peças de betão pré-esforçado mas sempre fracassando devido à pouca experiência que levou a combinar betões pouco compactos com aços de baixa resistência. Como consequência de tal combinação, o estado de coacção inicial desaparecia assim que a deformação elástica era igualada, ou por vezes até ultrapassada devido às deformações de retracção, fluência e relaxação do aço.

Foi no ano de 1928 que *Freyssinet* utilizou aços de alta resistência e baixa relaxação como forma de garantir um estado de coacção durável, da mesma forma se começou a exigir mais aos betões do ponto de vista da resistência. Com esta exigência imposta ao betão começou-se a utilizar aços de alta resistência o que introduziu tensões de compressão mais elevadas nas peças de betão.

Após a 2ª Guerra Mundial, houve a necessidade imensa de reconstruir tudo o que foi destruído durante os confrontos. Foi nessa altura que a construção de estruturas de betão pré-esforçado se começou a generalizar e com a utilização de armaduras de pré-esforço não seria necessária a utilização de armaduras passivas. Neste campo foi feita alguma pesquisa e rapidamente se concluiu que apesar das tensões de tracção serem anuladas, fenómenos como a retracção, ou a fluência, bem como as variações

de temperatura e outros são responsáveis pelo aparecimento de fendilhação no betão que poderia ser controlada através do dimensionamento de uma armadura ordinária adequada. Contudo, o pré-esforço introduziu elevadas tensões de compressão responsáveis pelo aparecimento de deformações por fluência o que originou perda de pré-esforço nos cabos. Para que esses efeitos sejam evitados pode-se dimensionar, juntamente com os cabos de pré-esforço, armaduras ordinárias que sejam capazes de controlar a fendilhação e diminuir o valor de pré-esforço instalado e foi assim desta forma que apareceu o betão armado pré-esforçado

Hoje em dia existe uma enorme pressão em redor de prazos a serem cumpridos e para tal os ritmos de construção são muito exigentes o que leva ao carregamento cada vez mais prematuro do betão jovem o que origina o aumento da fluência.

Cada vez mais se é desafiado com vãos cada vez maiores e em estruturas de betão armado pré-esforçado e é desta forma que as cargas permanentes assumem uma enorme importância em relação às sobrecargas, desta forma é imprescindível uma correcta previsão dos efeitos da retracção e da fluência, a complexidade estrutural é cada vez mais uma realidade nas nossas estruturas e a utilização de técnicas e sistemas estruturais durante a construção é uma constante o que faz com que os efeitos da retracção e fluência, uma vez mais, sejam importantes.

Numa análise visual é possível definir betão como um material construtivo homogéneo, desta forma podemos então dizer que o comportamento do betão ao nível macroscópico se pode considerar homogéneo e está altamente condicionado pela sua estrutura que nível microscópico, que acaba por lhe conferir características de um material heterogéneo. É desta forma que de seguida é feita uma breve alusão à estrutura interna deste material heterogéneo.

2.2. Estrutura Interna do Betão

O material betão é uma mistura, devidamente doseada, de pedras e areias, um ligante hidráulico e água. É a reacção do ligante com a água que permite ao betão uma coesão e resistência que lhe confere a categoria de material de construção.

Betão é um material formado pela *mistura de cimento, de agregados grossos e finos e água, com ou sem a incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento*. Os materiais constituintes do betão devem ser escolhidos de forma a satisfazer os requisitos especificados para betão fresco e

endurecido, incluindo a consistência, massa volúmica, resistência, durabilidade, protecção contra a corrosão do aço embebido, tendo em conta o processo de produção e o método previsto para a execução das obras em betão [NP EN 206-1 (2005) – Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ.]

É impossível desassociar o comportamento mecânico do betão do comportamento dos seus constituintes. Por esta razão de seguida inclui-se uma breve abordagem aos constituintes do betão para que seja mais simples a compreensão do comportamento mecânico do material.

Como material construtivo o betão possui diversos componentes, nomeadamente:

- Cimento;
- Agregados:
 - Grossos;
 - Finos.
- Água;
- Adjuvantes;
- Adições.

O cimento, palavra que deriva do latim *cæmentu*, é um material que, em contacto com a água, produz uma reacção exotérmica de cristalização de produtos hidratados, ganhando assim resistência mecânica.

É importante realçar que a nossa sociedade é altamente dependente de cimento, este é uma matéria mineral com origem directamente das matérias-primas que a Natureza põe ao nosso dispor, o cimento é hoje em dia o produto mais usado pelo Homem, superando o aço e apenas excedido pela água.

Foi no ano de 1786 que o inglês *John Smeaton* criou uma mistura resistente através da calcinação de calcários argilosos e moles. De certa forma, pode-se apontar esse como o marco da criação do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês *Joseph Aspdin* queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino, foi desta forma que percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

O Cimento *Portland* é composto de clínquer e de adições que distinguem os diversos tipos existentes, conferindo diferentes propriedades mecânicas e químicas a cada um.

Os constituintes principais do clínquer do cimento *Portland* são:

- Silicato tricálcico – 45% a 75%;
- Silicato dicálcico – 7% a 35%;
- Aluminato tricálcico – 0% a 13%;
- Ferroaluminato tetracálcico – 0% a 18%.

Importa ainda referir que o gesso é adicionado em quantidades geralmente inferiores a 3% da massa de clínquer, tem a função de aumentar o tempo de presa. Sem esta adição, o tempo de presa do cimento seria de poucos minutos, inviabilizando o seu uso. Devido a isto, o gesso é uma adição obrigatória, presente desde os primeiros tipos de cimento *Portland*.

A composição do clínquer é de alta importância pois esta condiciona as propriedades do cimento, tais como a velocidade de hidratação, o calor de hidratação, o desenvolvimento da resistência mecânica e a resistência a ataques químicos. A especificação do E378 do LNEC indica as proporções médias dos principais componentes anidros do clínquer *Portland* e as características do seu comportamento, tal como demonstra o quadro seguinte.

Quadro 2.1 – Características dos componentes do clínquer Portland [LNEC E 378 1996]

		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Proporções Médias		60%	20%	8%	12%
Velocidades de Hidratação		Elevada	Moderada	Muito Elevada	Elevada
Calor de Hidratação	<u>Quantidade</u>	Elevada (120cal/g)	Pequena (60cal/g)	Muito Elevada (200cal/g)	Moderada (200cal/g)
	<u>Desenvolvimento</u>	Rápido	Lento	Rápido	Lento
Desenvolvimento da Resistência		Rápido e Prolongado	Lento e Muito Prolongado	Muito Rápido e de Curta Duração	Lento e Pouco Significativo
Resistência a Ataque Químico		Pequena	Moderada	Muito Pequena	Grande

A escória é um sub-produto de alto-forno. Entre diversas impurezas como outros metais, concentram-se na escória silicatos, que apesar de rejeitados no processo de metalização, proporcionam-na características de ligante hidráulico. Sendo um sub-produto, este material tem menor custo em relação ao clínquer e é utilizado também por aumentar a durabilidade do cimento, principalmente em ambientes com presença de sulfatos. Contudo, a partir de certo grau de substituição de clínquer a resistência mecânica começa a diminuir.

Os materiais pozolânicos activados reagem espontaneamente com CaO em fase aquosa, por conterem elevado teor de sílica activa SiO₂. Esta característica levou ao uso de pozolânas como ligante hidráulico complementar ao clínquer, com a característica de tornar os betões mais impermeáveis o que é útil na construção de algumas estruturas especiais como barragens, por exemplo.

As pozolânas com composição química e mineralógica conforme com o definido na NP EN 197-1, são originalmente argilas contendo cinzas vulcânicas, encontradas na região de *Pozzuoli*, Itália. Actualmente, materiais com origens diferentes mas com

composições semelhantes também são considerados pozolânicos, tais como as pozolânas activadas artificialmente e alguns sub-produtos industriais como cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral.

O processo de activação de argilas é amplamente praticado pela própria indústria de cimentos, é geralmente realizado em fornos rotativos semelhantes àqueles utilizados na fabricação de clínquer ou mesmo em antigos fornos de clínquer adaptados, trabalhando a temperaturas mais baixas (até 900 °C).

O calcário é composto basicamente de carbonato de cálcio (CaCO_3), encontrado abundantemente na natureza. É empregue como elemento de preenchimento, capaz de penetrar nos interstícios das partículas e agir como lubrificante, tornando o produto mais plástico e não prejudicando o papel dos outros elementos. O calcário é também um material de diluição do cimento, utilizado para reduzir o teor de outros componentes de maior custo, desde que não ultrapassando os limites de composição ou reduzindo a resistência mecânica.

Hoje em dia o cimento *Portland* é normalizado e existem diversos tipos de cimento *Portland* no mercado, são eles:

- **Cimento *Portland* comum**

O CP-I é o tipo mais básico de cimento *Portland*, indicado para o uso em construções que não necessitem de condições especiais e não apresentem ambientes desfavoráveis como exposição a águas subterrâneas, esgotos, água do mar ou qualquer outro meio com presença de sulfatos. A única adição presente no CP-I é o gesso (cerca de 3%, que também está presente nos demais tipos de cimento *Portland*).

- **Cimento *Portland* comum com adição**

O CP I-S, tem a mesma composição do CP-I (clínquer combinado com gesso), porém com adição reduzida de material pozolânico (de 1 a 5% em massa). Este tipo de cimento tem menos permeabilidade devido à adição pozolânica.

- **Cimento *Portland* composto com escória**

Os cimentos CP II são ditos compostos pois apresentam, além da sua composição básica (clínquer e gesso), a adição de outro material. O CP II-E,

contém adição de escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação.

- **Cimento *Portland* composto com pozolâna**

O CP II-Z contém adição de material pozolânico que varia de 6% a 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítimas.

- **Cimento *Portland* composto com pozolâna**

O CP II-F é composto de 90% a 94% de clínquer e gesso. Este tipo de cimento é recomendado desde estruturas em betão armado até argamassas de assentamento e revestimento porém não é indicado para aplicação em meios muito agressivos.

- **Cimento *Portland* de alto-forno**

O cimento *Portland* de alto-forno contém adição de escória no teor de 35 a 70% em massa, que lhe confere propriedades como:

- Baixo calor de hidratação;
- Maior impermeabilidade;
- Maior durabilidade;

Este tipo de cimento é recomendado tanto para obras de grande porte e em meio agressivo, como barragens, esgotos e efluentes industriais como também para aplicação geral em argamassas de assentamento e revestimento.

- **Cimento *Portland* Pozolânico**

O cimento *Portland* pozolânico contém adição de pozolâna no teor que varia de 15% a 50% em massa. Este alto teor de pozolâna confere ao cimento uma alta impermeabilidade e conseqüentemente maior durabilidade. O betão confeccionado com este tipo de cimento *Portland* apresenta resistência mecânica à compressão superior ao betão de cimento *Portland* comum. Este é

um tipo de cimento especialmente indicado em obras expostas à acção de água corrente e ambientes agressivos.

- **Cimento *Portland* de alta resistência inicial**

O Cimento Portland de alta resistência inicial assim como o comum não contém adições. Aquilo que diferencia este tipo de cimento dos outros é o processo de dosagem e produção do clínquer. O Cimento Portland de alta resistência inicial é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila se comparado aos outros tipos de cimento e com moagem mais fina. Esta diferença de produção confere a este tipo de cimento uma alta resistência inicial do betão quando este é ainda jovem, podendo até atingir valores na ordem dos 26MPa de resistência à compressão em apenas 1 único dia de idade. Este é sobretudo um cimento recomendado em obras onde o ritmo seja mais rápido que o normal, com necessidade de descofrar mais cedo.

- **Cimento *Portland* resistente a sulfatos**

Qualquer um dos tipos de cimento anteriormente citados podem ser classificados como resistentes a sulfatos, desde que se enquadrem dentro de algumas características, nomeadamente:

- Teor de aluminato tricálcico no máximo 8%;
- Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

Para situações como meios agressivos sulfatados como redes de águas residuais ou industriais este tipo de cimento é o mais recomendado.

A composição dos diferentes tipos de cimentos *Portland* pode ser observada, em suma, no quadro seguinte:

Quadro 2.2 – Características dos componentes do cimento Portland [NP EN 197-1 2001]

Cimento Portland	Tipo	Clínquer+Gesso (%)	Escória Siderúrgica (%)	Material Pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I – S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II – E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II – Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II – F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-Forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V - ARI	Alta Resistência Inicial	95-100	-	-	0-5

Os agregados também desempenham um papel importante no comportamento do betão, ocupando cerca de 75% do volume de betão.

Os agregados podem ser caracterizados da seguinte forma [NP EN 206-1:2005]:

- Natural;
- Artificial;
- Recicladados a partir de outros materiais previamente utilizados na construção.

Ainda no campo dos constituintes do betão, também a água de amassadura é importante. Esta deverá estar limpa de quaisquer constituintes prejudiciais que poderão afectar a presa, o endurecimento e a resistência da peça, deverá ser destituída de qualquer substância capaz de provocar a corrosão das armaduras.

Existem normas que indicam os requisitos que a água deverá cumprir, como a NP EN 1008 de 2003, que indica que a água da rede pública de abastecimento deverá satisfazer esses requisitos impostos pela norma.

Apesar de não serem dos constituintes essenciais do betão, os adjuvantes são muitas vezes adicionados ao betão fresco, para modificar as suas propriedades com vantagens quer do ponto de vista físico quer do ponto de vista económico. Existem variados tipos de adjuvantes, normalmente classificados segundo o efeito que provocam no betão, podendo distinguir-se:

- Redutores de água;
- Retardadores/Aceleradores de presa;
- Redutores de água e retardadores ou aceleradores de presa;
- Superplastificantes que funcionam como grandes redutores de água;
- Superplastificantes e retardadores de presa.

Existe ainda um outro constituinte do betão: as adições. As necessidades constantes de melhorar certas características do betão, levaram ao desenvolvimento de aditivos e incentivou também a busca por outros tipos de materiais que, adicionados ao betão, pudessem melhorar ainda mais o seu desempenho. Foram já efectuadas várias experiências com sucesso que consagraram alguns destes materiais, permitindo atingir os objectivos como aumentar a resistência, colorir o betão, diminuir o calor de hidratação, minurar fissuras, etc.

Entre os materiais utilizados como adições temos as fibras de nylon ou de polipropileno que evitam fissuras, os pigmentos para dar cor ao betão, as fibras de aço que substituem armaduras e a sílica activa que aumenta a resistência e diminui a permeabilidade, entre outros.

Uma das vantagens das adições é que em certos tipos, tanto no cimento como no betão, as adições carregam consigo um benefício ambiental com efeito no caso das cinzas volantes e das escórias de alto-forno, consideradas subprodutos altamente poluentes, desta forma, tem-se não só um destino para estes resíduos, como também uma economia de energia.

2.3. Comportamento Diferido do Betão

Segundo o químico industrial francês *Le Châtelier*, durante o endurecimento do betão ocorrem variados processos químicos que podemos dividir em três grandes grupos, são eles:

- Fenómenos Químicos (hidratação do cimento);
- Fenómenos Físicos (cristalização);
- Fenómenos Físico-Químicos.

Após a primeira mistura, água e cimento, ocorrem inúmeras reacções de hidratação escalonadas ao longo do tempo, esse sistema de reacções é algo complexo, pois os produtos de reacção acabam por reagir novamente com a água e existe desta forma uma interacção constante.

Após a hidratação, os compostos mais importantes que se formam são:

- Silicatos de alumínio hidratados;
- Trissulfoaluminato de cálcio hidratado;
- Monossulfato de cálcio hidratado;
- Aluminato de cálcio hidratado;
- Hidróxido de cálcio.

É a primeira cristalização dos componentes hidratados dissolvidos na água que constitui a presa, a precipitação de novos produtos oriundos da reacção permite a dissolução de nova quantidade de componentes anidros, o que alimenta de forma continuada a reacção de hidratação, provocando uma nova cristalização e que ciclicamente continua, apesar de cada vez com mais dificuldade, devido ao facto do betão ao endurecer se opor a todo este processo, pois quanto mais sólido o betão estiver mais difícil se torna o transporte de iões através do corpo, a este processo dá-se o nome de endurecimento do betão.

A resistência mecânica das peças vai depender de coesão dos componentes hidratados e igualmente da aderência entre si, além disso, o papel dos agregados é também bastante importante para a resistência mecânica dos corpos. A ligação entre os agregados e o cimento dá-se de três formas distintas:

- Aderência mecânica (desenvolve-se à escala macroscópica);
- Aderência Física (desenvolve-se à escala microscópica);
- Ligação Química.

Do ponto de vista da aderência mecânica, esta deve-se a alguns factores tais como a rugosidade e porosidade dos agregados, a capacidade de absorção da superfície do agregado desempenha também um papel importante para a aderência mecânica e consequente resistência da peça.

Ao nível microscópico a interpenetração do agregado e da pasta de cimento contribui para a aderência física e a ligação química desenvolve-se entre a superfície dos agregados e os produtos de hidratação do cimento, verificando-se assim continuidade entre o agregado e o cimento hidratado.

Podemos encontrar a água na pasta de cimento de diversas formas, tais como [Coutinho, 1988]:

- Água de constituição;
- Água de cristalização/hidratação;
- Água zeolítica;
- Água adsorvida;
- Água capilar;
- Água livre.

No esquema abaixo, proposto por Daimon *et al* [Coutinho,A.S 1988] , é possível ter uma ideia mais exacta de como a água se dispersa na pasta de cimento.

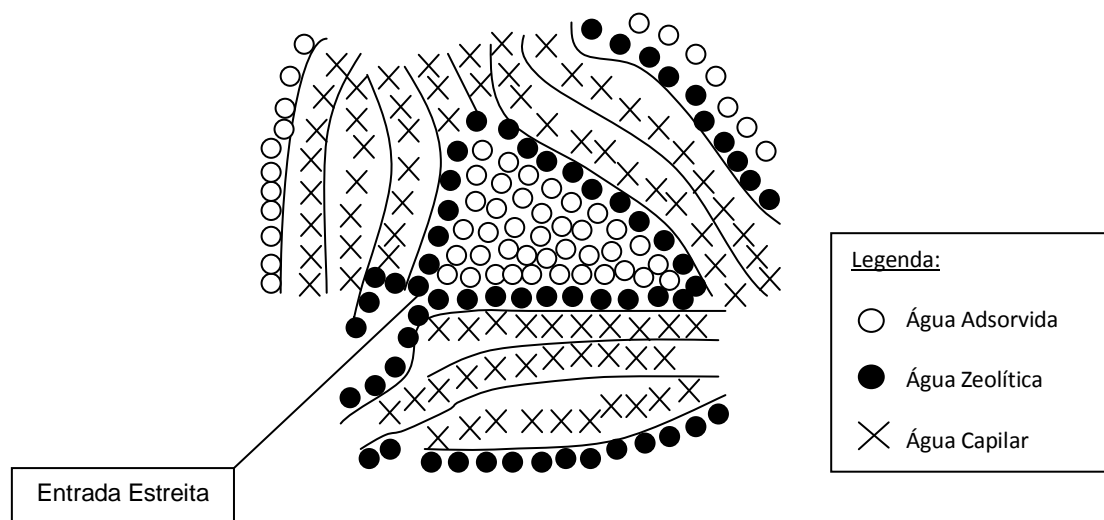


Figura 2.1 – Esquema da estrutura do cimento após hidratado [Coutinho, 1988]

O comportamento do betão do ponto de vista da relação entre tensões e deformações e durante a aplicação do carregamento, pode ser distinguido segundo duas categorias, podendo a deformação no betão ser considerada:

- Instantânea;
- Diferida.

A relação tensão, deformação é determinada através de ensaios estáticos normalizados com velocidades de carregamento na ordem dos 0,5MPa/s, para diferentes provetes com tensões inferiores à tensão de ruptura fazendo-se a medição das deformações para diferentes instantes de tempo.

O resultado representa-se por um ramo de parábola cujo vértice corresponde ao ponto de máxima resistência, sendo esse um ponto notável importante da curva, contudo existe um outro ponto notável importante, nomeadamente para tensões até 40% da tensão de ruptura onde nos encontramos no domínio da fluência linear e as deformações são igualmente lineares sendo o módulo de elasticidade o coeficiente que as relaciona.

É possível observar em representação esquemática a relação tensão deformação instantânea na figura 2.2.

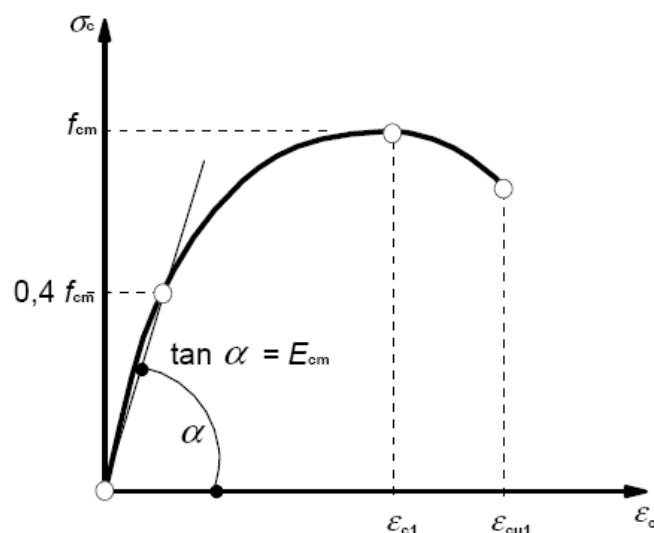


Figura 2.2 – Representação esquemática da relação tensões-extensões para a análise estrutural (a utilização de $0,4f_{cm}$ para a definição de E_{cm} é uma aproximação)

2.4. Retracção

Pode-se definir o fenómeno da retracção como sendo a diferença de volume de uma peça de betão desde a altura da sua betonagem até a peça encontrar o seu equilíbrio higrométrico, ou seja, trata-se da variação da deformação que se verifica numa determinada peça desde o final da sua compactação até ao estado limite de equilíbrio higrométrico com temperatura constante e na ausência de qualquer tensão aplicada [Coutinho; Gonçalves, 1994]

É possível dividir este fenómeno em dois períodos diferentes, um que ocorre antes da presa e outro posterior à presa. A retracção que ocorre antes da presa dá pelo nome de retracção plástica e é devida ao assentamento dos materiais constituintes da massa de betão e à evaporação de água à superfície. Depois da presa existem algumas causas que influenciam a retracção, nomeadamente:

- Hidratação do cimento de onde resultam produtos cujo volume final é inferior à soma do volume dos componentes anidros com o da água com a qual reagem, e passagem da água livre a água combinada, adsorvida ou zeolítica devido à hidratação contínua do cimento (que se verifica na ausência de trocas de humidade com o exterior) e é chamada retracção autogénea.

$$\textit{Volume Final} < \textit{Volume dos Componentes Anidros} + \textit{Volume de Água}$$

- Movimentos da água, de onde é originária a retracção por secagem:
 - Saída por evaporação;
 - Entrada por capilaridade;
 - Entrada por permeabilidade;
 - Entrada por condensação capilar.
- Carbonatação dos componentes hidratados de onde resultam produtos com volume inferior ao somatório do volume dos reagentes e é a chamada retracção de carbonatação:

$$\textit{Volume Final} < \Sigma \textit{Volume de Reagentes}$$

O betão só adquire características necessárias para funcionar como material estrutural após a presa, desta forma, a retracção a considerar no decorrer deste trabalho será a retracção que ocorre após a presa. As parcelas da retracção de secagem e autogénea são as duas mais significativas e onde se irá focar este trabalho

2.5. Factores que Condicionam a Retracção:

Existem dois grupos de factores que condicionam este fenómeno, são eles factores intrínsecos e factores externos, tais como:

- Factores Intrínsecos (relacionados com o material):
 - Propriedades dos constituintes;
 - Propriedades da mistura;
 - Condições de fabrico.

- Factores Externos (condições a que o material está sujeito):
 - Geometria da Peça;
 - Temperatura;
 - Humidade Relativa;
 - Condições Ambientais.

Os factores intrínsecos são factores que apesar de afectarem o valor final da retracção não afectam de forma significativa a evolução do fenómeno no tempo.

Os factores externos afectam o valor final e também a velocidade com que o fenómeno se processa. Ainda nos factores externos, as condições ambientais, tais como o vento ou a radiação solar por exemplo desempenham um papel importante neste processo.

Não existe nenhuma relação definida entre a retracção da pasta de cimento e o betão feito com essa pasta [Coutinho; 1988], contudo podemos dizer que cimentos com maior finura ou com maior percentagem de alumina conduzem a maiores retracções.

A natureza do agregado utilizado no betão também influencia o fenómeno da retracção. Em estudos efectuados em 1958, *G. E. Troxel, J. M. Raphael, R. E. Davis*

[Troxel, Raphael, Davis, 1958] demonstraram que a retracção observada para betões com aglomerados diferentes era sucessivamente maior consoante o aglomerado fosse quartzo, calcário, granito, basalto, godo ou grés. Actualmente nas obras correntes a escolha dos aglomerados passa maioritariamente pelos calcários, granitos e basaltos.

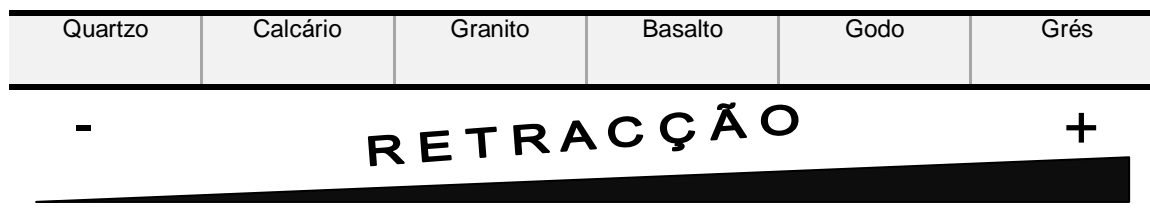


Figura 2.3 – Representação esquemática da tendência da retracção com base nos agregados utilizados

A granulometria dos agregados é também um factor importante, este poderá influenciar a retracção. Tal como *Pickett* propôs em 1956 [Pickett, 1956]:

$$S_b = S_c(1 - g)^n \quad (3.1)$$

Onde:

- S_b – Retracção do betão;
- S_c – Retracção da pasta dura de cimento;
- g – Teor de agregados;
- $1.2 < n < 1.7$.

A retracção depende das propriedades dos constituintes mas também da forma como estes são combinados, nomeadamente as dosagens de cimento e água, por exemplo, relativamente à razão água/cimento (A/C), esta varia de forma directa com a retracção para valores de A/C maiores do que 0,20 e menores do que 0,60. No entanto, quando a relação A/C é maior do que 0,60, a água adicional evapora-se sem provocar vestígios de retracção [Brooks, 1989].

Tal como referido anteriormente, os factores externos não só afectam o valor final da retracção como também a velocidade com que o fenómeno se processa. No caso da humidade relativa, esta faz variar de forma inversa o valor da retracção, ou seja,

quando maior o valor da humidade relativa menor será o valor da retracção e a velocidade do fenómeno é independente do teor de humidade ambiental. Em laboratório é possível fazerem-se estudos experimentais a condições ambientais constantes, contudo em obra as condições são mais adversas e variáveis e é exactamente devido a esses factos que existe a necessidade de saber como é que a retracção se comporta nesse tipo de ambientes com condições ambientais variáveis, alguns estudos científicos feitos pela *Bundesanstalt Fur Material Forshung und – Prufung (BAM)* comprovam que peças mais esbeltas são mais sensíveis às variações de humidade, além disso conclui-se também que os provetes submetidos a humidade constante mostram retracções superiores às dos provetes sujeitos a ciclos de humidade relativa variável cuja média era igual ao valor da humidade constante, sendo que a humidade constante era de 65% e os ciclos variáveis entre 45% e 90%, os ciclos eram basicamente dois períodos de 7 dias com HR=90% E HR=40% e com temperatura constante de 20°C [Muller, S; Pristl, M].

No que diz respeito a adjuvantes, a influência da utilização destes não se tem mostrado de grande importância, sendo-lhes atribuído diferenças na ordem de 10%. É para betões mais jovens que se verificam variações mais importantes. Em trabalhos anteriores levados a cabo no LNEC, [Ribeiro, *et al*, 2002] verificou-se que, dependendo do adjuvante a utilizar, que a retracção poderia ser até 25% menor. Esta é ainda uma área onde há muito a explorar pois a eficácia deste tipo de produtos está altamente dependente das propriedades dos outros constituintes do betão.

Capítulo 3

MODELOS DE PREVISÃO REGULAMENTARES DE RETRACÇÃO

3.1. Considerações Gerais

A necessidade de remodelar a regulamentação nacional sobre as estruturas de betão armado publicada em 1967 deve-se acima de tudo à evolução dos conceitos sobre a segurança estrutural, também consagrada no Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios de Betão Armado e Pontes [RSAEEP]. A evolução da regulamentação portuguesa na área reflectiu a também evolução da actividade internacional neste domínio, principalmente a actividade do Comité Euro-international du Béton (CEB), cuja acção tem tido em vista o avanço tecnológico e a harmonização entre os parâmetros regulamentares de diferentes países incluindo Portugal.

A primeira versão de recomendações do CEB é datada de 1964 e foram estas recomendações que serviram de base à publicação da regulamentação portuguesa de 1967 onde foram contempladas as disposições sobre pré-esforço.

No entanto o grande desenvolvimento observado em estudos sobre segurança estrutural, demonstraram que tal matéria deveria possuir regulamentação específica aplicável a todos os tipos de estrutura independentemente do material. Foi então que o presente regulamento, aplicável às estruturas de betão armado e betão pré-esforçado, foi elaborado, em 1983.

A ideia da publicação dos Euro Códigos estruturais data de 1998, é desta forma que surge o Eurocódigo2 (EN 1992) que é uma norma europeia da responsabilidade do Comité Europeu da Normalização que visa unificar critérios e normativas de cálculo e dimensionamento de estruturas, em Portugal, a tradução dos Eurocódigos e a elaboração dos «anexos nacionais» é, por incumbência do IPQ, coordenada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Em 2010 a *fib* publicou o MC2010 que será um possível modelo de base a incluir numa próxima revisão do EC2.

O progressivo aumento do conhecimento sobre o comportamento dos materiais, comportamento estrutural e segurança estrutural tem sido responsável pela periódica revisão da normalização no domínio.

3.2. Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP)

O modelo de previsão da retracção que o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado [REBAP] preconiza e que está presente no Anexo I é um modelo multiplicativo de previsão indicado no CEB-FIB Model Code 1978 [MC78].

É importante referir que o REBAP indica algumas directrizes para o cálculo deste fenómeno mas sempre tendo em conta que são para condições termo-higrométricas ambientais sensivelmente constantes no tempo, além disso os valores indicados são valores médios e podem-se utilizar na generalidade das situações. O REBAP sugere ainda que caso haja necessidade de efectuar uma análise mais segura deve-se efectuar um incremento de 20% do valor recomendado.

A extensão devido à retracção pode ser determinada através da expressão:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs0} \times (\beta_s(t) - \beta_s(t_0)) \quad (3.1)$$

Onde “ ε_{cs0} ” é o valor de referência da retracção e depende de alguns factores nomeadamente:

- Humidade Relativa (HR) e condições higrométricas no geral;
- Espessura Fictícia do Elemento;
- Consistência do Betão Fresco.

O valor de referência da retracção (ε_{cs0}) pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_{cs1} \times \eta \quad (3.2)$$

Onde, por intermédio, do quadro seguinte podemos obter o valor de ε_{cs1} .

Quadro 3.1 – Valores da extensão de retracção do betão, ε_{cs1} [REBAP]

HR ambiente	$\varepsilon_{cs1} (x10^{-6})$	λ
Imersão em água	+100	30,0
Alta 90%	-130	5,0
Média 70%	-320	1,5
Baixa 40%	-520	1,0

Para o valor de η :

Quadro 3.2 – Valores do coeficiente η [REBAP]

Espessura Fictícia, h_0 (cm)	≤ 5	10	20	40	80	≥ 160
η	1,20	1,05	0,90	0,80	0,75	0,70

Sabendo que:

$$h_0 = \lambda \times \frac{2Ac}{u} \quad (3.3)$$

- Ac : Área da Secção Transversal;
- u_0 : Parte do Perímetro dessa Secção em Contacto com o Ambiente.

O valor correspondente à parcela " $\beta_s(t) - \beta_s(t_0)$ " diz respeito à variação da retracção com a idade do betão e depende de:

- Temperatura Ambiente;
- Tipo de Cimento;
- Espessura Fictícia do Betão.

No que diz respeito ao valor de $\beta_s(t)$, a determinação destes valores é conseguida através de uma função que exprime a evolução da retracção ao longo do tempo e para diferentes espessuras fictícias (h_0).

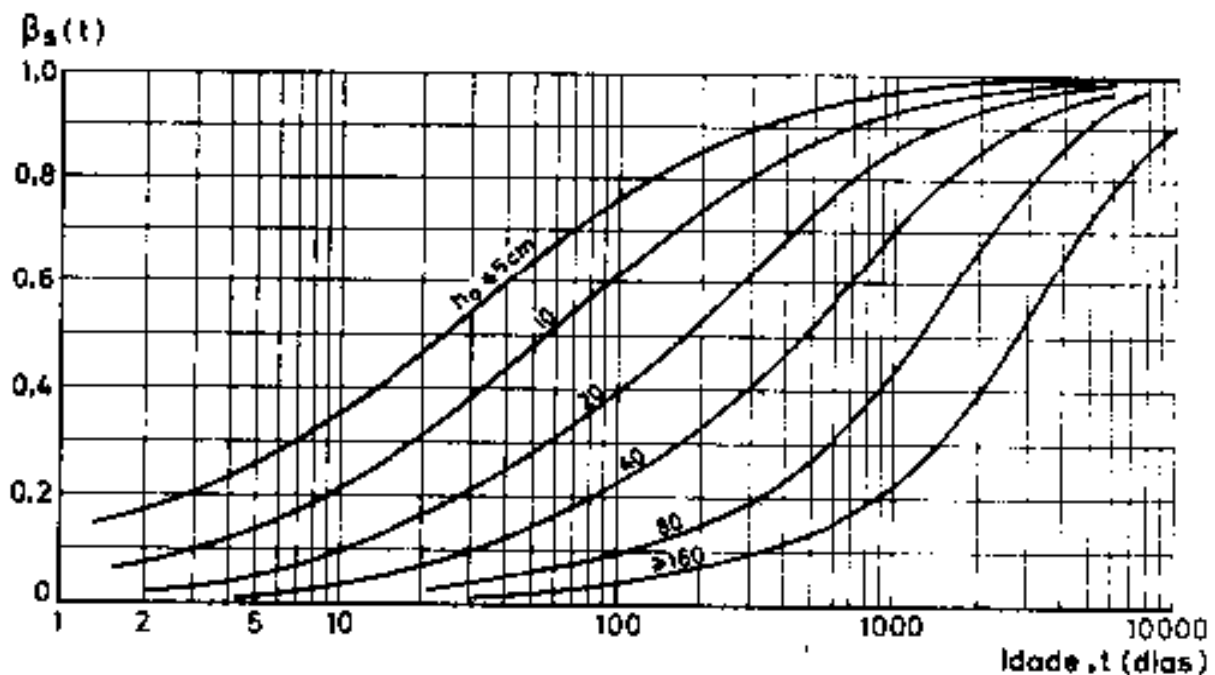


Figura 3.1 – Função $\beta_s(t)$, que exprime a evolução da retracção com a idade do betão, para vários valores da espessura fictícia, h_0 . [REBAP]

Tal como foi referido anteriormente, este modelo de previsão é fundamentado em condições termo - higrométricas ambientais sensivelmente constantes e uma temperatura ambiente de 20°C considerando betões fabricados com cimento de endurecimento corrente ou lento. Contudo para valores de temperatura diferentes ou outros tipos de cimentos é necessário fazer uma correcção através das idades “ t ” e “ t_0 ”, calculadas pela expressão 3.4.

$$t' = \alpha \frac{\sum_{i=1}^{i=t} (T_i + 10)}{30} \quad (3.4)$$

Em que T_i representa, em graus Celsius, a temperatura média do dia i e α é um coeficiente que toma os seguintes valores:

- Cimentos de endurecimento corrente ou lento: $\alpha=1$;
- Cimentos de endurecimento rápido: $\alpha=2$;
- Cimentos de endurecimento rápido e de alta resistência: $\alpha=3$.

3.3. Eurocódigo 2

Os Eurocódigos são um conjunto de normas europeias da responsabilidade do Comité Europeu de Normalização e para este fenómeno o eurocódigo preconiza dois modelos diferentes, nomeadamente:

3.3.1. Eurocódigo 2 – Parte 1.1 – Regras Gerais para Edifícios

Na parte 1.1 do Eurocódigo 2 podemos dizer que a retracção depende essencialmente da humidade ambiente, das dimensões do elemento e da composição do betão. Além disso, o EC2 defende que a extensão total de retracção (ϵ_{ss}) é constituída por duas componentes diferentes a extensão de retracção de secagem (ϵ_{cd}) e a extensão de retracção autogénea (ϵ_{ca}).

Assim, vem que:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad (3.5)$$

A retracção de secagem (ϵ_{cd}) evolui lentamente e deve-se à migração de água através do betão endurecido.

A parcela da Secagem é dada pela expressão 3.5:

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0} \quad (3.6)$$

- Para o cálculo de $\beta_{ds}(t, t_s)$, é necessário utilizar a seguinte expressão:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04\sqrt{h_0^3}} \quad (3.7)$$

- Onde a parcela $(t - t_s)$ é um valor em dias que corresponde à diferença entre a idade do betão na data considerada até, normalmente, o tempo até ao fim da cura;
- Para o valor de h_0 , este é determinado pela expressão:

$$h_0 = \frac{2Ac}{u}$$

- K_h é um valor que depende da espessura equivalente (h_0), sendo obtido pelo quadro 3.3:

$$h_0 = \frac{2Ac}{u} \quad (3.8)$$

Quadro 3.3 – Valores de k_h na expressão (4.5) [NP EN 1992-1-1]

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥500	0,70

- Para o cálculo do valor da extensão de retracção por secagem de referência, $\epsilon_{cd,0}$, pode-se a utilizar a seguinte expressão:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times \exp(-\alpha_{ds2} \times \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}) \right] \times 10^{-6} \times \beta_{RH} \quad (3.9)$$

Onde: α_{ds1}

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (3.10)$$

- f_{cm} é o valor médio da tensão de ruptura do betão à compressão [MPa];
- $f_{cm0}=10\text{MPa}$;
- α_{ds1} e α_{ds2} são coeficientes que dependem do tipo de cimento utilizado;
 - Para cimento da classe de resistência R: $\alpha_{ds1}= 6$ e $\alpha_{ds2} = 0,11$
 - Para cimento da classe de resistência N: $\alpha_{ds1}= 4$ e $\alpha_{ds2} = 0,12$
 - Para cimento da classe de resistência S: $\alpha_{ds1}= 3$ e $\alpha_{ds2}= 0,13$

Os valores nominais da retracção de secagem, $\varepsilon_{cd,0}$, são obtidos com recurso ao quadro seguinte, proposto pelo EC2:

Quadro 3.4 – Valores nominais da retracção livre por secagem, $\varepsilon_{cd,0}$, em ‰ para o betão com cimentos CEM da Classe N [NP EN 1992-1-1]

$\frac{f_{ck}}{f_{ck,cube}}$ [MPa]	Humidade Relativa [%]					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,40	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00

No caso da parcela autogénea (ε_{ca}), esta desenvolve-se durante o endurecimento do betão, a maioria do fenómeno ocorre nos primeiros dias após a betonagem.

O valor da parcela autogénea em função da idade do betão em dias (t) pode ser obtida através da equação 3.10:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (3.11)$$

- $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5})$ (3.12)

- $\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 (f_{ck} - 10) 10^{-6}$ (3.13)

- f_{ck} corresponde ao valor característico da tensão de ruptura do betão à compressão, aos 28 dias de idade.

3.3.2. Eurocódigo 2 – Parte 2 - Pontes

A parte 2 do Eurocódigo 2 é referente a pontes de betão e, visto se tratar de estruturas especiais, aborda a temática da retracção de uma forma diferente, embora com alguns aspectos em comum.

Continua a existir a distinção entre retracção autogénea, relativa ao processo de hidratação e retracção de secagem, relativa à variação de humidade.

A retracção autogénea (ε_{ca}) pode ser calculada utilizando as seguintes fórmulas:

- Para $t < 28$ dias o valor de $\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}}$

- Quando: $\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} \leq 0.1$ então:

$$\varepsilon_{ca}(t, f_{ck}) = 0 \quad (3.14)$$

- Quando: $\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} \geq 0.1$ então:

$$\varepsilon_{ca}(t, f_{ck}) = (f_{ck} - 20) \left(2.2 \frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} - 0.2 \right) 10^{-6} \quad (3.15)$$

• Para $t \geq 28$ dias

$$\varepsilon_{ca}(t, f_{ck}) = (f_{ck} - 20) \left(2.8 - 1.1 \exp\left(\frac{-t}{96}\right) \right) 10^{-6} \quad (3.16)$$

É de notar que, de acordo com o MC2010, cerca de 97% da retracção autogénea ocorre nos primeiros 3 meses após a betonagem [MC2010].

No que se refere à retracção por secagem, que ocorre para humidades relativas inferiores a 80%, pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s, f_{ck}, h_0, RH) = \frac{K(f_{ck})(72 \exp(-0.046 f_{ck}) + 75 - RH)(t - t_s) 10^{-6}}{(t - t_s) + \beta_{cd} \times h_0^2} \quad (3.17)$$

- Com $K(f_{ck})=18$, para $f_{ck} \leq 55$ MPa
- Com $K(f_{ck})=30-0.21f_{ck}$, para $f_{ck} > 55$ MPa

3.4. Model Code 2010 (CEB-FIP MC 2010)

Este é de todos os modelos o mais jovem e aquele que eventualmente numa próxima revisão do EC2 servirá de modelo base.

O MC2010 faz a diferenciação entre retracção autogénea e retracção por secagem tal como no EC2.

Quando a idade do betão no início da retracção é inferior a 14 dias ($t_s < 14$ dias), à temperatura ambiente normal a duração da cura não afecta significativamente o valor da retracção total, desta forma, este parâmetro assim como o efeito da temperatura não é levada em conta.

A retracção de secagem diminui de forma directa com a relação de água/cimento e diminui igualmente com a diminuição do teor de cimento, em relação à retracção autogénea, esta aumenta com a diminuição da relação água/cimento e diminui com a diminuição do teor de cimento.

No caso de betões com características especiais cujo comportamento diverge consideravelmente do betão considerado normal, o MC2010 recomenda a realização de alguns testes de acordo com os procedimentos indicados em [RILEM, 1998] e [ISO 1920-8].

O MC2010 também divide a retracção total em retracção de secagem e retracção autogénea, pelo que o seu valor é efectuado por intermédio da expressão seguinte:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (3.18)$$

Onde:

- $\varepsilon_{cas}(t)$, parcela correspondente à retracção autogénea, é obtida através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) \times \beta_{as}(t) \quad (3.19)$$

$$- \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \times \left(\frac{f_{cm}/10}{6 + f_{cm}/10} \right)^{2.5} \times 10^{-6} \quad (3.20)$$

$$- \beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2 \times \sqrt{t}) \quad (3.21)$$

Onde:

- f_{cm} é a resistência do betão aos 28 dias de idade [MPa] dada pela equação

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad (3.22)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f$$

Onde $\Delta f = 8MPa$.

- $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ corresponde à parcela de retracção por secagem e pode ser igualmente obtida pela expressão:

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \times \beta_{RH}(RH) \times \beta_{ds}(t - t_s) \quad (3.23)$$

Onde:

- t é a idade do betão em dias;
- t_s é a idade do betão em dias até ao princípio da secagem;
- (t, t_s) é a duração em dias da secagem

A retracção por secagem, pode ser calculada por intermédio do coeficiente, $\varepsilon_{cds0}(f_{cm})$ (coeficiente de retracção por secagem) do $\beta_{RH}(RH)$ que entra em linha de conta com a humidade relativa do ambiente e a função $\beta_{ds}(t - t_s)$ que descreve o desenvolvimento ao longo do tempo. Desta forma vem que:

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times \exp(-\alpha_{ds2} \times f_{cm})] \times 10^{-6} \quad (3.24)$$

Os valores de α_{ds1} e α_{ds2} estão dependentes do tipo de cimento utilizado, tal como a tabela seguinte propõe:

Quadro 3.5 – Coeficientes α_i utilizados nas equações 3.20 e 3.24 [MC 2010]

Classe de Cimento	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
32,5N	800	3	0,013
32,5R; 42,5N	700	4	0,012
42,5R; 52,5N; 52,5R	600	6	0,012

$$- \left\{ \begin{array}{l} \beta(RH) = -1.55 \times \left[1 - \frac{RH^3}{100} \right]; \text{ para } 40 \leq RH \leq 99\% \times \beta_{s1} \\ 0.25; \text{ para } RH \geq 99\% \times \beta_{s1} \end{array} \right. \quad (3.25)$$

$$- \beta_{ds}(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)}{0.035 \times h^2 + (t-t_s)} \right]^{0.5} \quad (3.26)$$

$$- \beta_{s1} = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.1} \leq 1 \quad (3.27)$$

Onde:

- t é a idade do betão em dias;
- t_s é a idade do betão em dias até ao princípio da secagem;
- (t, t_s) é a duração em dias da secagem;
- $h = \frac{2Ac}{u}$ trata-se da espessura equivalente da peça;
- RH é a humidade relativa do ambiente [%];
- f_{cm} resistência do betão aos 28 dias de idade [MPa].

Quando não se é exigida muita certeza, ou seja, quando o menor grau de precisão for suficiente, então nesse caso é possível adoptar os valores da tabela seguinte. Esses são valores representativos da retracção total para betões comuns com resistência característica entre os 20 e os 50MPa com 70 anos de idade e cimentos tipo 32,5R e 42,5N.

Embora seja possível apontar um valor final para a retracção, ainda existe pouca informação em relação à retracção após longos períodos de secagem. Os valores apontados na tabela, são valores para peças com uma espessura equivalente $h = \frac{2Ac}{u} = 600mm$ e poderão ser valores exagerados para esse período de secagem.

Quadro 3.6 – Valor da retracção total ($\times 10^{-3}$) para betão estrutural com 70 anos de idade [MC2010]

RH=50% (Atmosfera Seca)			RH=80% (Atmosfera Húmida)		
Espessura Equivalente = $\frac{2Ac}{u}$					
50	150	600	50	150	600
-0,57	-0,56	-0,47	-0,32	-0,31	-0,26

Em contraste com o observado em betões normais, o comportamento ao nível da retracção de betões com agregados leves é caracterizada pelo ligeiro aumento de volume em betões ainda jovens, esse facto resulta da água armazenada nos agregados porosos que só será libertada muito lentamente na pasta da matriz de cimento. Este ligeiro aumento de volume é ignorado na seguinte expressão:

$$\varepsilon_{lcs}(t, t_s) = \eta \times \varepsilon_{cs}(t, t_s) \quad (3.28)$$

Onde:

- $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ é calculado através da expressão:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (3.29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta=1.5 \text{ para LC8, LC12, LC16} \\ \eta=1.2 \text{ a partir de LC20} \end{array} \right. \quad (3.30)$$

- É de notar que os números que acompanham o símbolo “LC” fazem referência ao valor médio da resistência à compressão para betões com 28 dias de idade (f_{ck}) em MPa para betões de agregados leves.

Capítulo 4

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE RETRACÇÃO

4.1. Comparação Geral

Os modelos de previsão da retracção propostos pelo REBAP e pelo EC2 são ambos modelos multiplicativos, existindo um factor que define o valor final da retracção e outro que estabelece a velocidade de processamento do fenómeno ao longo do tempo.

O EC2, tal como o MC2010, dividem o valor final da retracção em duas parcelas, uma referente à retracção por secagem e outra referente à retracção autogénea. O EC2 refere-se à retracção de secagem como sendo uma retracção que evolui lentamente e é devida à migração da água através do betão endurecido, no que diz respeito à parcela autogénea, e ainda no EC2, esta desenvolve-se durante o endurecimento do betão e a grande maioria do fenómeno ocorre nos primeiros dias após a betonagem, o EC2 aponta que este tipo de retracção deve ser considerado especificamente quando se coloca betão novo sobre betão endurecido.

O EC2 entra em linha de conta com o valor da tensão de ruptura à compressão do betão (f_{ck}), na sua parcela autogénea. No entanto o modelo preconizado no REBAP aponta que o valor final da retracção depende de HR e da geometria da peça.

A parte 1.1 do Eurocódigo, referente a regras gerais e regras para edifícios, bem como a parte 2, referente a pontes de betão, recorrem a modelações matemáticas distintas para o mesmo fenómeno, tal como está evidenciado nos capítulos 4.2.1 e 4.2.2. Apesar de haver diversos pontos em comum, como por exemplo a distinção entre retracção autogénea e retracção por secagem os valores finais para as mesmas condições e com a utilização de betões idênticos são diferentes, tal como será comprovado mais adiante neste trabalho.

No MC2010, apesar da distinção entre retracção de secagem e autogénea se manter, este modelo assume que a retracção por secagem diminui com a diminuição da relação água/cimento. Em relação à parcela autogénea, o modelo prevê o seu aumento com a diminuição da relação água/cimento e diminui com a diminuição de teor em cimento.

A classe do betão é o parâmetro geralmente utilizado para considerar os efeitos das propriedades intrínsecas do betão no desenvolvimento da retracção dada a sua simplicidade. Entre essas propriedades inclui-se a relação água/cimento, ao se aumentar progressivamente a classe do betão iremos obter sucessivamente betões mais compactos e logo com uma relação água cimento mais reduzida, desta forma podemos dizer que a classe do betão é uma grandeza capaz de expressar relativamente bem ou pelo menos oferecer uma boa indicação sobre o teor água/cimento.

Contudo, este tipo de parâmetros como o teor em cimento ou a relação água/cimento que poderiam ser aferidos através da consistência do betão deixaram de o ser aquando do início da utilização de plastificantes e superplastificantes que deturpam os valores da consistência do betão com efeito, os plastificantes e superplastificantes, são aditivos químicos que podem ser adicionados ao betão para torná-lo mais trabalhável. Quando se pretende um betão mais resistente adiciona-se menos água à mistura, o que o torna menos trabalhável, sendo, por vezes, necessário o uso de plastificantes ou superplastificantes. Os superplastificantes usam-se também como aditivo na mistura de cinza pozolânica com betão com o objectivo de aumentar a resistência do mesmo.

Os modelos de previsão preferem utilizar parâmetros que possam ser estimados ainda em fase de projecto. Desta forma, com a utilização produtos como os plastificantes e superplastificantes a consistência do betão torna-se mais difícil de estimar.

Todos os modelos de previsão possuem pontos em comum e ao mesmo tempo pontos divergentes. A retracção no betão depende de diversos factores que são tidos em conta para o valor final, contudo os parâmetros de que dependem são diferentes.

Como se pode observar no quadro 4.1, com a evolução do conhecimento sobre o fenómeno da retracção, desde 1978 até 2010, foi possível identificar maior número de factores que o condicionam e variáveis que inicialmente não eram tomadas em conta passaram a ser necessárias para o comportamento e conseqüente estudo do fenómeno.

Quadro 4.1 – Parâmetros de que depende a retracção do betão segundo o REBAP, EC2-1.1, EC2-2 e MC2010

	REBAP (1983)	EC2-1.1 (2004)	EC2-2 (2005)	MC2010 (2010)
HR	X	X	X	X
h_0	X	X	X	X
t - Idade do betão	X	X	X	X
t_s - Idade no início da Retracção		X	X	X
Classe de Cimento	X	X		X
f_{ck}		X	X	X
f_{cm}		X	X	X
Betão com/sem Sílica			X	
Temperatura	X			X

À medida que o conhecimento sobre o fenómeno se adensa e se torna mais sustentável seria de esperar que o valor previsível para a retracção fosse menor, pois existe uma maior certeza sobre o assunto o que irá fazer com que os últimos modelos sejam modelos menos conservativos, ou seja, em 1983, aquando do REBAP, o conhecimento sobre o fenómeno era ainda um pouco vago e por isso seria de esperar que para colmatar a falta de conhecimento, o modelo aponta valores acima do valor real esperado e desta forma o modelo acaba por se proteger da falta da experiência e seguindo a mesma ordem de ideias os modelos mais actuais seriam modelos cujos valores finais seriam menores, pois o conhecimento sobre o fenómeno é maior e portanto a incerteza é reduzida não havendo necessidade de apontar valores tão elevados. Este seria um raciocínio lógico, contudo existe o outro lado, ou seja, à medida que a experiência nos capacita sobre o real comportamento do fenómeno é de supor a entrada de outras variáveis ao processo, variáveis essas que na altura do REBAP não tinham sido postas em linha de conta e que

com os modelos do EC2 e MC2010 entram de forma decisiva no comportamento das peças da betão, tal como o tipo de cimento por exemplo, desta forma seria de esperar um acréscimo do valor final da retracção para os modelos mais actuais. Inicialmente o fenómeno em si era ainda um pouco desconhecido e não lhe era dada a devida importância, com o passar do tempo o fenómeno começou a adquirir um novo estatuto e a ser-lhe dada a devida importância, ou seja dá-se uma evolução no próprio conhecimento, além dessa mesma evolução também existe a evolução das características e propriedades do betão.

Ambos os raciocínios têm fundamento, serve o presente trabalho para apurar qual será o raciocínio mais correcto e em que condições.

4.1.1. REBAP

O REBAP, tal como dito anteriormente é um modelo de 1983 e entra em linha de conta com diversos factores tais como a humidade relativa, o desenvolvimento no tempo e a dimensão da peça, todos os factores assumem papéis de relevo no comportamento do fenómeno, tal como a figura 3.1 demonstra, a função $\beta_s(t)$ exprime a evolução da retracção com a idade do betão e para vários valores de espessura fictícia.

É evidente a influência da espessura fictícia neste modelo de previsão da retracção. Com efeito, à medida que o valor de h_0 aumenta, o valor da retracção varia na razão inversa, isso deve-se ao facto das trocas com o exterior serem menores em peças com espessuras fictícias maiores.

4.1.2. Eurocódigo 2

4.1.2.1. Eurocódigo 2 – Parte 1.1 – Regras Gerais para Edifícios

O preconizado pela parte 1.1 do Eurocódigo sofre um comportamento expectável, à medida que o valor de f_{ck} aumenta podemos observar uma diminuição da parcela de retracção por secagem e simultaneamente um aumento da parcela referente à retracção autógena.

No que diz respeito ao valor final da retracção, é visível que a partir de betões mais resistentes, nomeadamente a partir de betões C80/95, o valor final da retracção inverte a sua tendência decrescente e começa a aumentar.

O quadro seguinte é ilustrativo disso mesmo, ou seja, quando se utilizam betões mais resistentes no sentido da optimização do projecto está-se simultaneamente a minorar os problemas resultantes da retracção, esta é uma vantagem que vem adjacente com a utilização de betões de classes superiores, contudo a partir de betões de classe 80/95 esse esforço deixa de ser compensatório.

Quadro 4.2 – Variação da retracção no betão em função das classes de resistência de acordo com o EC2-1.1

Classes de Betões	$\epsilon_{cd} \times 10^{-6}$ (secagem)	$\epsilon_{ca} \times 10^{-6}$ (autogénea)	$\epsilon_{cs} \times 10^{-6}$ (final)
20/25	347,0 (93,28%)	25,0 (6,72%)	372,0 (100%)
40/50	272,9 (78,44%)	75,0 (21,56%)	347,9 (100%)
60/75	214,7 (63,20%)	125,0 (36,80%)	339,7 (100%)
80/95	168,9 (49,11%)	175,0 (50,89%)	343,9 (100%)
90/105	149,8 (42,82%)	200,0 (57,18%)	349,8 (100%)

HR=70% , $h_0=20\text{cm}$, cimento:32.5R ou 42.5N

Relativamente ao andamento das curvas de retracção ao longo do tempo, podemos observar graficamente os resultados apresentados anteriormente.

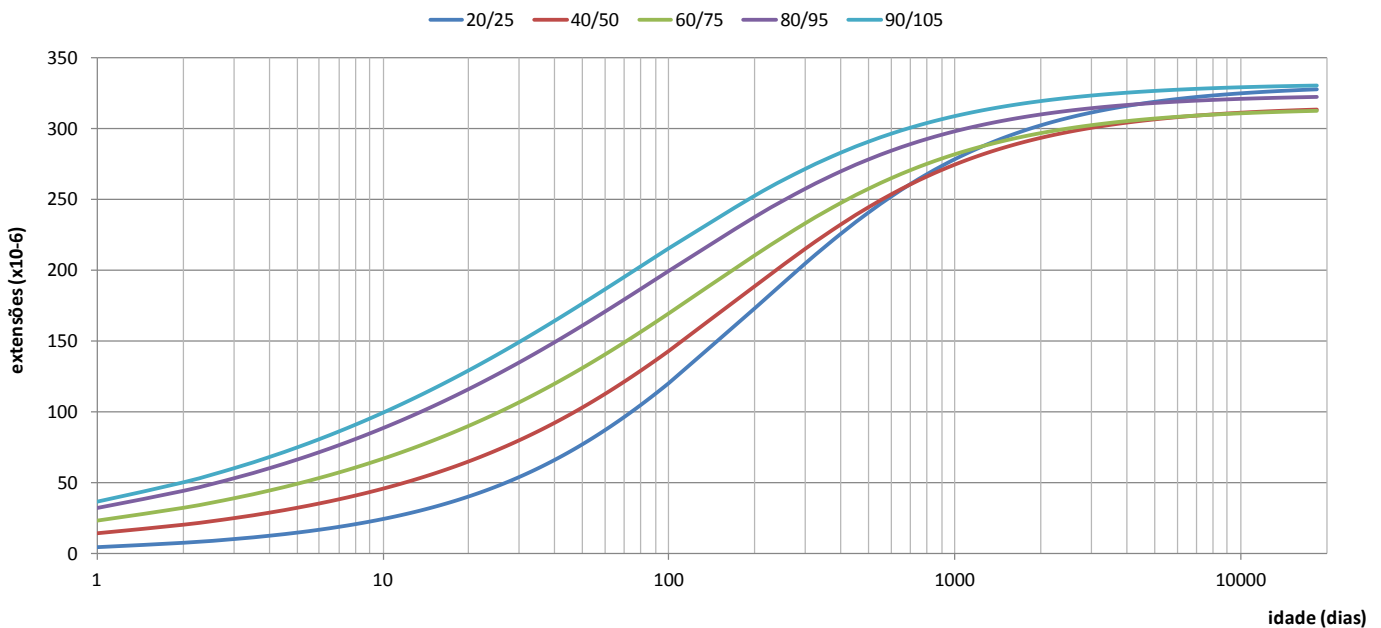


Figura 4.1 – Evolução no tempo da retracção no betão segundo EC2-1.1, variando as classes de betão

4.1.2.2. Eurocódigo 2 – Parte 2 - Pontes

A segunda parte do EC2, referente a estruturas de pontes de betão, não descola completamente ao que o modelo anterior defendia no entanto os resultados obtidos são relativamente diferentes.

Este modelo é bastante mais conservativo comparativamente com o anterior para tempo infinito para f_{ck} baixos como $f_{ck}=20\text{MPa}$, para betões de classe 40/50 os resultados são praticamente iguais e para betões de f_{ck} a partir de 80MPa os valores apontados pela parte 2 do EC2 apresentam-se menos conservativos apontando valores de extensão menores comparativamente com a parte 1.1.

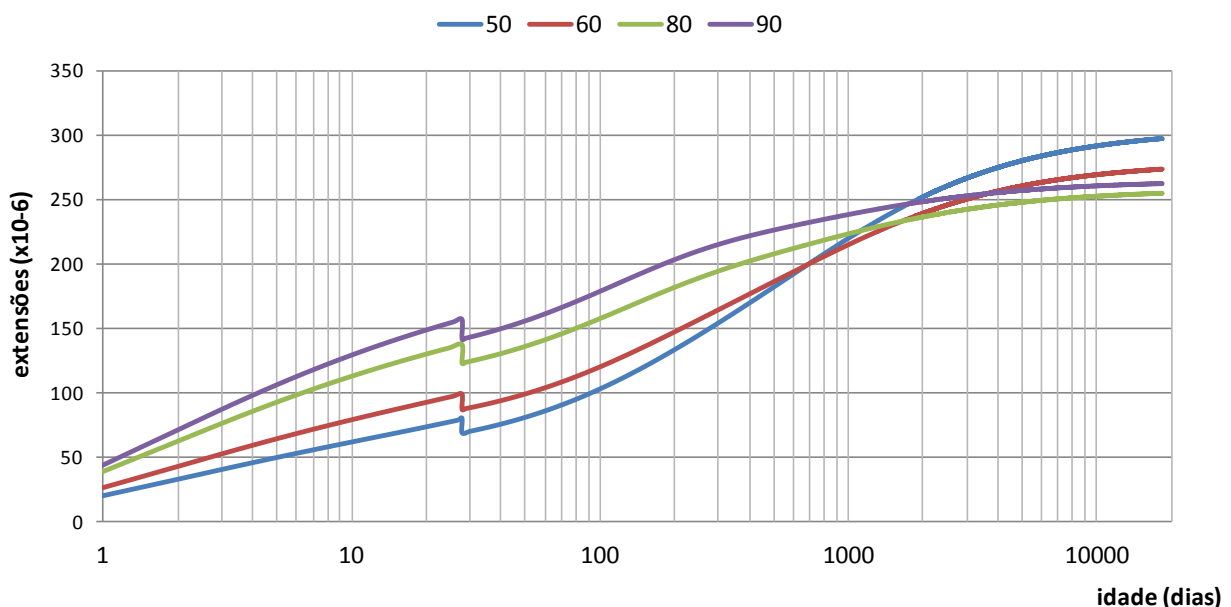
Para condições semelhantes de $RH=70\%$ e $h_0=30\text{cm}$, variando apenas o valor de f_{ck} os valores obtidos para um e outro modelo são os seguintes:

Quadro 4.3 – Comparação dos valores numéricos, de variação da retracção no betão do EC2-1.1 e do EC2 - 2 variando as classes de betão

Classe	$\varepsilon_{cs} \times 10^{-6}$ (final) – EC 2 – 1.1	$\varepsilon_{cs} \times 10^{-6}$ (final) – EC 2 – 2	$ \varepsilon_{cs}(EC2 - 2) - \varepsilon_{cs}(EC2 - 1.1) \times 10^{-6}$
20/25	327.8	296.7	31.1
40/50	313.2	272.8	40.4
60/75	312.4	275.0	37.4
80/95	322.4	258,0	64.4
90/105	330.7	262.0	68.7

HR=70% , $h_0=30\text{cm}$, cimento:32.5R ou 42.5N

A imagem seguinte mostra o comportamento das curvas preconizadas por este modelo para tempo infinito. É facilmente visível a tendência do valor da extensão de retracção diminuir até betões de classe 80/95 e a partir daí a tendência inverte-se e a constante diminuição do valor da retracção por secagem não compensa o aumento da parcela autogénea.



Nota: A diferença visível no andamento das curvas para $t=28$ dias é devida à aplicação directa das fórmulas

Figura 4.2 – Evolução no tempo da retracção no betão segundo EC2-2, variando o valor de f_{ck}

4.1.3. Model Code 2010

O *Model Code 2010* apresenta algumas diferenças em relação aos restantes modelos, este é o modelo mais recente e seria de esperar que fosse o modelo que melhor representasse o fenómeno da retracção.

Neste caso, o valor a extensão por retracção irá sempre seguir uma atitude descendente à medida que se utilizam betões de classes superiores, este facto é algo que rompe com o preconizado pelos outros modelos, que a certo ponto (betões C80/95) a tendência era igualmente descendente mas a partir dessa fronteira o que se observava era um aumento no valor final da retracção.

Tal como explicado anteriormente este é também um modelo onde o valor final da retracção se divide em retracção autogénea e retracção por secagem. O valor da retracção autogénea vai consecutivamente aumentando com o aumento do valor de f_{ck} e o valor da retracção por secagem segue uma tendência inversa, tal como os outros modelos anteriores, contudo a diferença deste modelo para os outros é o facto do valor final da retracção ir diminuindo sempre desde betões menos resistentes até betões de alta resistência e é neste ponto específico que este modelo difere dos outros, ou seja, no *Model Code 2010* a diminuição da extensão por secagem é capaz de compensar o aumento da extensão autogénea.

O quadro seguinte mostra exactamente os valores numéricos preconizados neste modelo, para condições padrão, onde facilmente se percebe a tendência descendente do valor da retracção final e da retracção por secagem e em contrapartida o aumento sucessivo do valor da retracção autogénea.

Quadro 4.4 – Valores numéricos, de variação da retracção no betão segundo o MC 2010, variando o f_{ck}

f_{ck}	$\epsilon_{cd} \times 10^{-6}$ (secagem)	$\epsilon_{ca} \times 10^{-6}$ (autogénea)	$\epsilon_{cs} \times 10^{-6}$ (final)
50	326.35 (73.35%)	118.57 (26.65%)	444.92 (100%)
60	289.45 (66.78%)	143.99 (33.22%)	433.44 (100%)
80	227.69 (54.40%)	190,83 (45.60%)	418.52 (100%)
90	201.94 (48.77%)	212,09 (51.23%)	414.03 (100%)

HR=70% , $h_0=30\text{cm}$, cimento:32.5R ou 42.5N

As curvas de seguida apresentadas servem para confirmar os dados numéricos introduzidos acima.

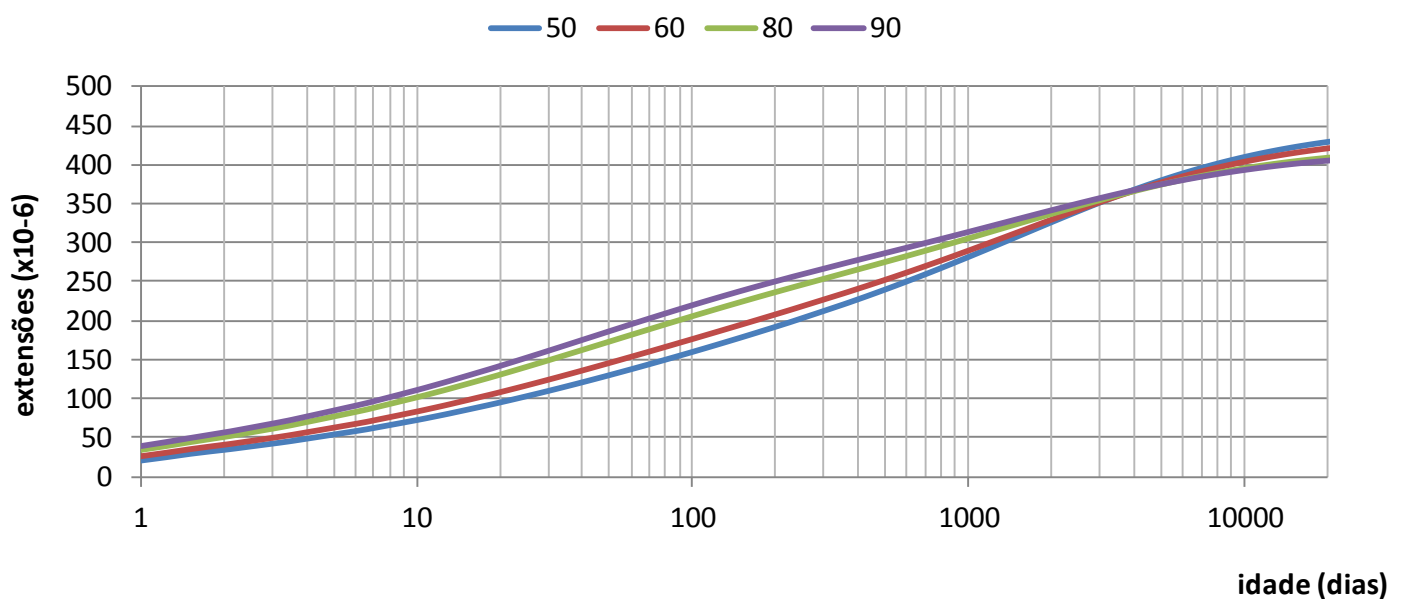


Figura 4.3 – Evolução no tempo da retracção no betão segundo o MC2010, variando o valor de f_{ck}

4.2. Comparação de modelos

4.2.1. REBAP vs. EC2 vs. MC2010

O gráfico seguinte pretende fazer a comparação entre os três modelos de previsão de retracção (REBAP, EC2 e MC2010), para valores até 50 anos (18500 dias), para condições consideradas padrão com humidade relativa ambiente de 70%, com $h_0=30\text{cm}$ e para uma classe de cimento 32,5R ou 42,5N, com a utilização de betões com $f_{ck}=50\text{MPa}$.

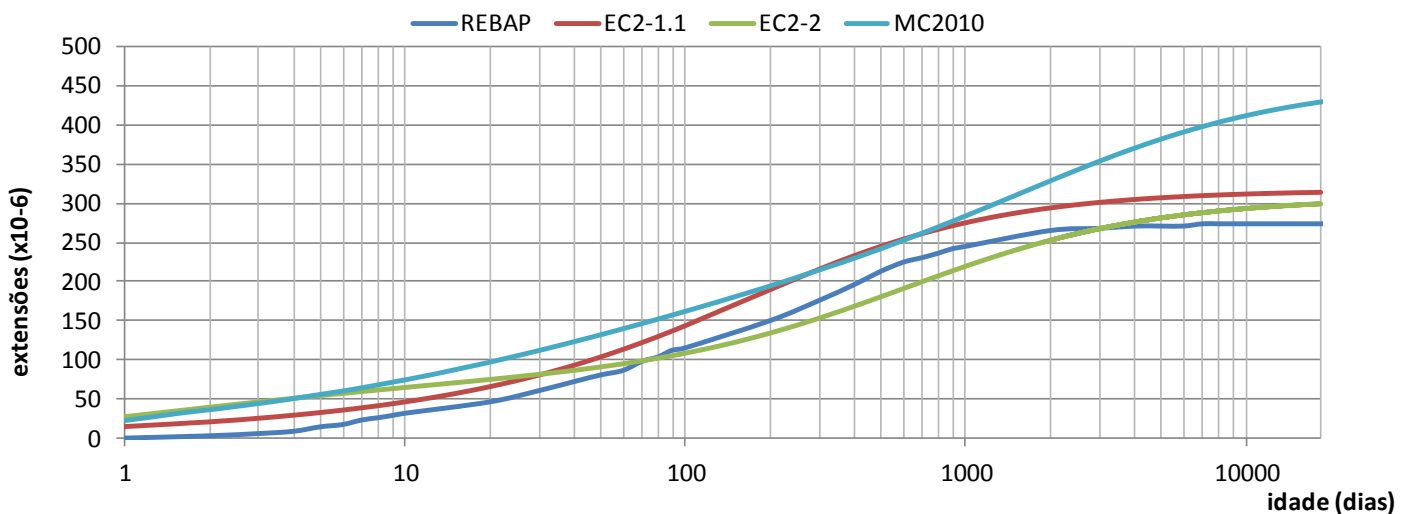


Figura 4.4 – Evolução no tempo da retracção no betão segundo o REBAP, EC2 e MC2010

É visível que o modelo do REBAP é inferior aos restantes, além disso é possível observar no gráfico que os valores da retracção vão aumentando ao longo do tempo e para todos os modelos os valores vão estabilizar. Para o modelo preconizado pelo REBAP, a retracção vai estabilizar por volta do dia 3000 comparativamente para o EC2-1.1 a retracção estabiliza após 2000 dias e para o MC2010 o fenómeno irá cessar mais tarde.

No que diz respeito à parte 2 do EC2, podemos verificar que o valor inicial é o mais elevado a par do MC2010, comparativamente com os outros modelos. A longo prazo essa tendência é invertida e para betões com idades elevadas podemos verificar que o valor apontado por este modelo é mais semelhante ao valor apontado pelo EC2-1.1.

Podemos ainda observar que o modelo do REBAP é o modelo menos conservativo a longo prazo.

A tempo infinito é o *Model Code 2010*, que apresenta valores mais elevados em relação aos outros modelos. O MC2010 aponta valores a tempo infinito de 405×10^{-6} , sendo o valor mais

elevado de todos, em contrapartida os modelo do EC2-1.1 mostra valores de 313×10^{-6} , o modelo do REBAP apresenta valores de 275×10^{-6} e do EC2-2 mostra valores idênticos ao do EC2-2 de 300×10^{-6} .

4.2.2. Efeito da variação do valor médio da tensão de rotura por compressão

O efeito da variação do valor médio da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade é um factor importante para o modelo, no caso de se utilizar betões mais resistentes no sentido da optimização do projecto consegue-se reduzir os valores das extensão por retracção, esta é uma vantagem que vem quase que como extra quando são aplicados betões de classes superiores.

A figura 4.5 tem o objectivo de comparar de forma simples e expedita o comportamento dos três modelos em estudo quando se varia o valor característico da tensão de ruptura por compressão ($f_{ck}=f_{cm}-8$).

É de notar que as curvas são relativas a tempo infinito (50 anos ou 18500dias) e a condições consideradas padrão com humidade relativa ambiente de 70%, com $h_0=20\text{cm}$ e para uma classe de cimento 32,5R ou 42,5N

O andamento das curvas que estão disponibilizadas em baixo é interessante, vejamos:

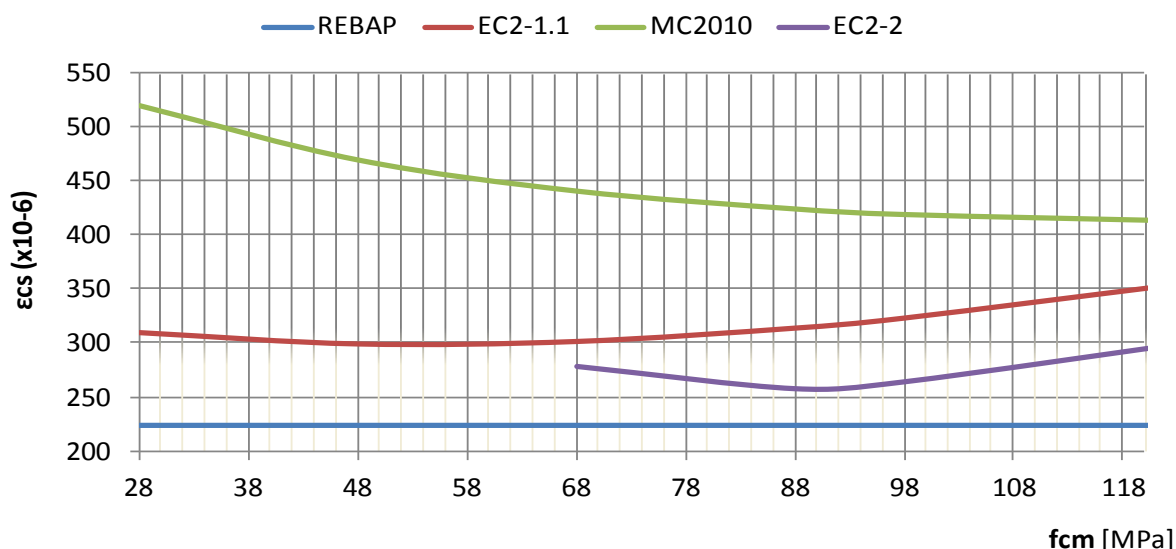


Figura 4.5 – Evolução da retracção no betão a tempo infinito variando valores de f_{cm} segundo o REBAP, EC2 e MC2010

O modelo do REBAP mantém-se constante, representando-se como uma linha com declive nulo, este é um comportamento expectável, pois este modelo não depende do valor característico da tensão de ruptura por compressão.

Relativamente à parte 2 do EC2 podemos observar uma descida dos valores da retracção do betão à medida que o valor de f_{cm} do betão aumenta. À semelhança do que acontece com a parte 1.1 do mesmo Eurocódigo, a partir de betões de classes 80/95 ($f_{cm}=88\text{MPa}$) é possível observar-se um aumento do valor expectável da retracção, uma vez mais devido ao aumento da extensão de retracção relativa à parcela autogénea. Este modelo é referente a pontes de betão e por isso é razoável a utilização de betões a partir de $f_{cm}=58\text{MPa}$.

O modelo do EC2-1.1 tem um comportamento inicial decrescente, pois ao aumentar o valor de f_{cm} seria de esperar que o valor final da retracção fosse reduzindo, contudo a partir da utilização de betões 80/95 ($f_{ck}/f_{ck,cube}$), podemos observar um acréscimo no valor da retracção. Este facto explica-se com o aumento da parcela autogénea da retracção. Para betões de classes elevadas, com f_{cm} a partir de 88MPa, pode-se observar um aumento do valor da retracção autogénea, apesar da parcela de secagem diminuir, essa diminuição não é suficiente para compensar a subida da parcela autogénea, e é devido a esse facto que o valor final aumenta para betões de classes superiores.

Os quadros seguintes são bastante ilustrativos desse facto:

Quadro 4.5 – Variação da retração no betão em função de f_{cm} segundo o EC2-1.1

f_{cm} $f_{cm}=f_{ck}+8$	$\epsilon_{cd} \times 10^{-6}$ (secagem)	$\epsilon_{ca} \times 10^{-6}$ (autogénea)	$\epsilon_{cs} \times 10^{-6}$ (final)
28	347,0 (93,28%)	25,0 (6,72%)	372,0 (100%)
48	272,9 (75,36%)	75,0 (20,16%)	347,9 (100%)
68	214,7 (63,20%)	125,0 (36,80%)	339,7 (100%)
88	168,9 (49,11%)	175,0 (50,89%)	343,9 (100%)
98	149,8 (42,82%)	200,0 (57,18%)	349,8 (100%)
128	104,5 (27,54%)	275,0 (72,46%)	379,5 (100%)

HR=70% , $h_0=30\text{cm}$, cimento:32.5R ou 42.5N

Quadro 4.6 – Quadro 4.5 – Variação da retracção no betão em função de f_{cm} segundo o EC2-2

f_{cm} $f_{cm}=f_{ck}+8$	$\epsilon_{cd} \times 10^{-6}$ (secagem)	$\epsilon_{ca} \times 10^{-6}$ (autogénea)	$\epsilon_{cs} \times 10^{-6}$ (final)
28	606,4 (100%)	000,0 (0%)	606,4 (100%)
48	295,8 (84,08%)	56,0 (15,92%)	351,8 (100%)
68	166,3 (59,76%)	112,0 (40,24%)	278,3 (100%)
88	90,0 (38,88%)	168,0 (65,12%)	258,0 (100%)
98	68,2 (25,81%)	196,0 (74,19%)	264,2 (100%)
128	25,4 (8,32%)	280,0 (91,68%)	305,4 (100%)

HR=70% , $h_0=30\text{cm}$, cimento:32.5R ou 42.5N

Quadro 4.7 – Variação da retracção no betão em função de f_{cm} segundo o MC2010

f_{cm} $f_{cm}=f_{ck}+8$	$\epsilon_{cd} \times 10^{-6}$ (secagem)	$\epsilon_{ca} \times 10^{-6}$ (autogénea)	$\epsilon_{cs} \times 10^{-6}$ (final)
68	297,0 (67,35%)	144,0 (32,65%)	441,0 (100%)
88	233,6 (55,04%)	190,8 (44,96%)	424,4 (100%)
98	207,2 (49,42%)	212,1 (50,58%)	419,3 (100%)
128	144,6 (35,07%)	267,7 (64,93%)	412,3 (100%)

HR=70% , $h_0=30\text{cm}$, cimento:32.5R ou 42.5N

4.2.3. Efeito da variação do valor da humidade relativa (HR)

A humidade relativa (%) é um factor de importante para o comportamento do fenómeno da retracção.

A humidade relativa é a relação entre a pressão de vapor do ar (medida em Pascal) e a pressão de vapor do ar obtida em condições de equilíbrio ou saturação sobre uma superfície de água líquida ou gelo. O valor da HR varia entre 0% e 100% para condições até a saturação: HR=100%, significa que a peça está imersa eliminando a parcela da retracção por secagem. Por outras palavras, pode-se dizer que humidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água existente no ar e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura que corresponde ao ponto de saturação.

A expressão que nos permite calcular o valor da humidade relativa é a seguinte:

$$HR(\%) = (e / e_s) \times 100\% \quad (4.1)$$

Sendo:

- HR a humidade relativa do ar expressa em percentagem;
- e é a pressão parcial de vapor de água do ar [g/Kg];
- e_s é a pressão de vapor nas condições de equilíbrio, denominada pressão de vapor de saturação.

A medição da humidade na atmosfera, é feita através de um higrómetro.

É utilizado principalmente em estudos do clima, mas também em locais fechados onde o controlo de humidade é importante como em peças de museus, bibliotecas e laboratórios.

Em obras de algum porte onde o fenómeno da retracção tem impacto, é comum a utilização deste tipo de aparelhos para medir o grau de humidade presente na atmosfera.

É comum a utilização deste tipo de sensor acoplado em estações meteorológicas



Figura 4.6 – Sensor termo-higrométrico
Obra monitorizada pelo NOE - Ponte Miguel Torga – Régua



Figura 4.7 – Central Meteorológica
Obra monitorizada pelo NOE Ponte da Cabala – Angola

A figura 4.8 mostra o comportamento dos três modelos em estudo num intervalo desde HR=60% ate HR=80%. Este intervalo foi escolhido numa tentativa de representar a realidade, sendo que a humidade relativa ambiente média ronda os 70%.

Tal como os gráficos seguintes demonstram, a variação da humidade relativa é bastante forte com amplitudes grandes, no entanto os mesmos gráficos são capazes de mostrar que o intervalo escolhido dos 60% aos 80% de humidade relativa não é descabido, pois são valores que estão compreendidos nas amplitudes diárias. Os gráficos foram fornecidos pelo Instituto de Meteorologia de Portugal são relativos a um intervalo de dias do mês de Fevereiro bem como dos meses de Junho e Julho do presente ano, que apesar de não serem representativos do ano inteiro é suficiente para se formar uma ideia em relação aos valores adoptados. A escolha destes dois períodos deve-se ao facto de um ser uma altura do ano caracterizadamente húmida e a outra prima pelo oposto.

Os gráficos, foram escolhidos de forma a dar um aspecto geral de Portugal continental, fazendo um varrimento de Norte a Sul de todo o território.



Figura 4.8 – Localização das estações

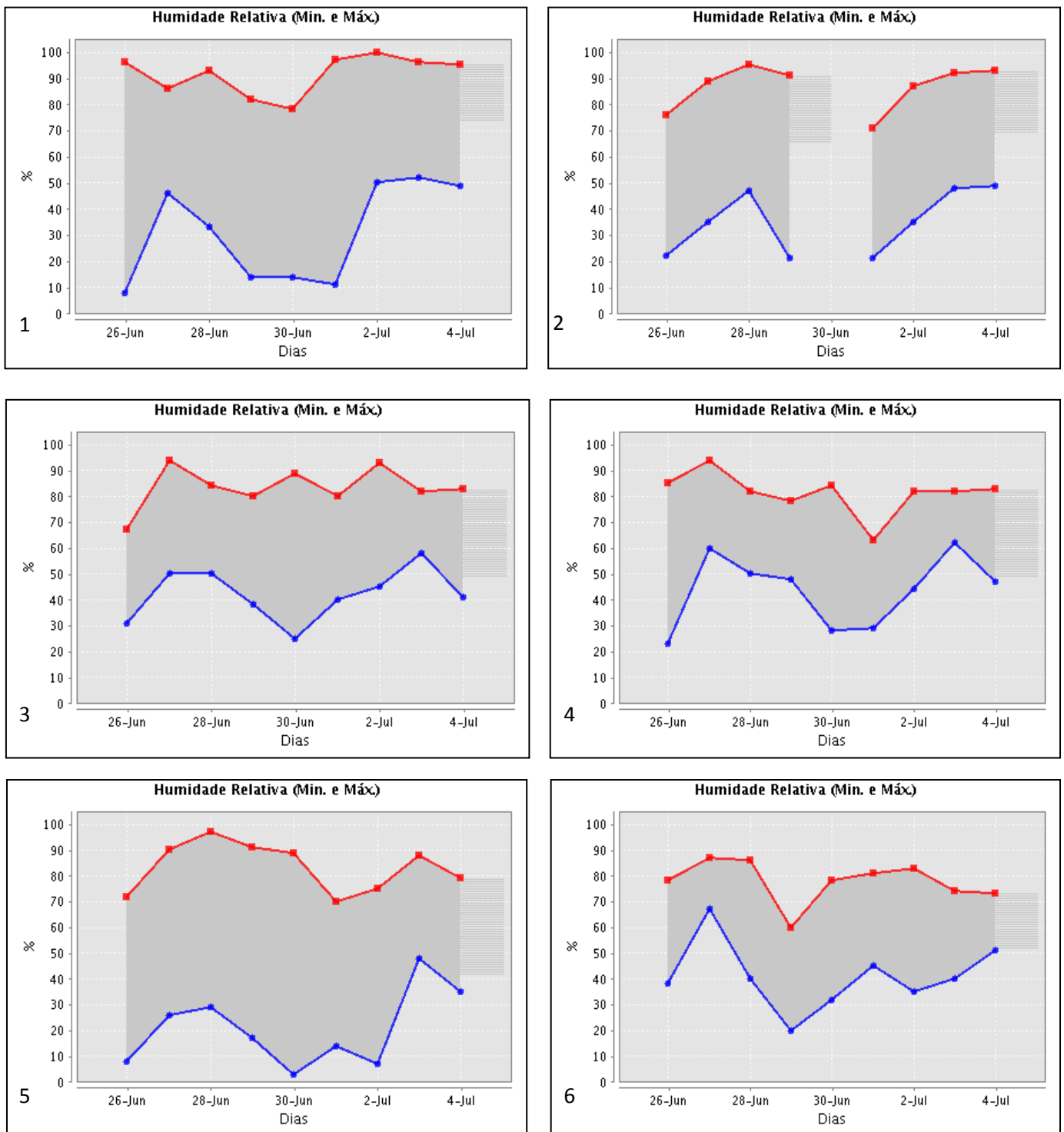


Figura 4.9 – Gráficos de observação das humidades relativas para diferentes estações ao longo de Portugal Continental - Verão [Instituto de Meteorologia, IP]

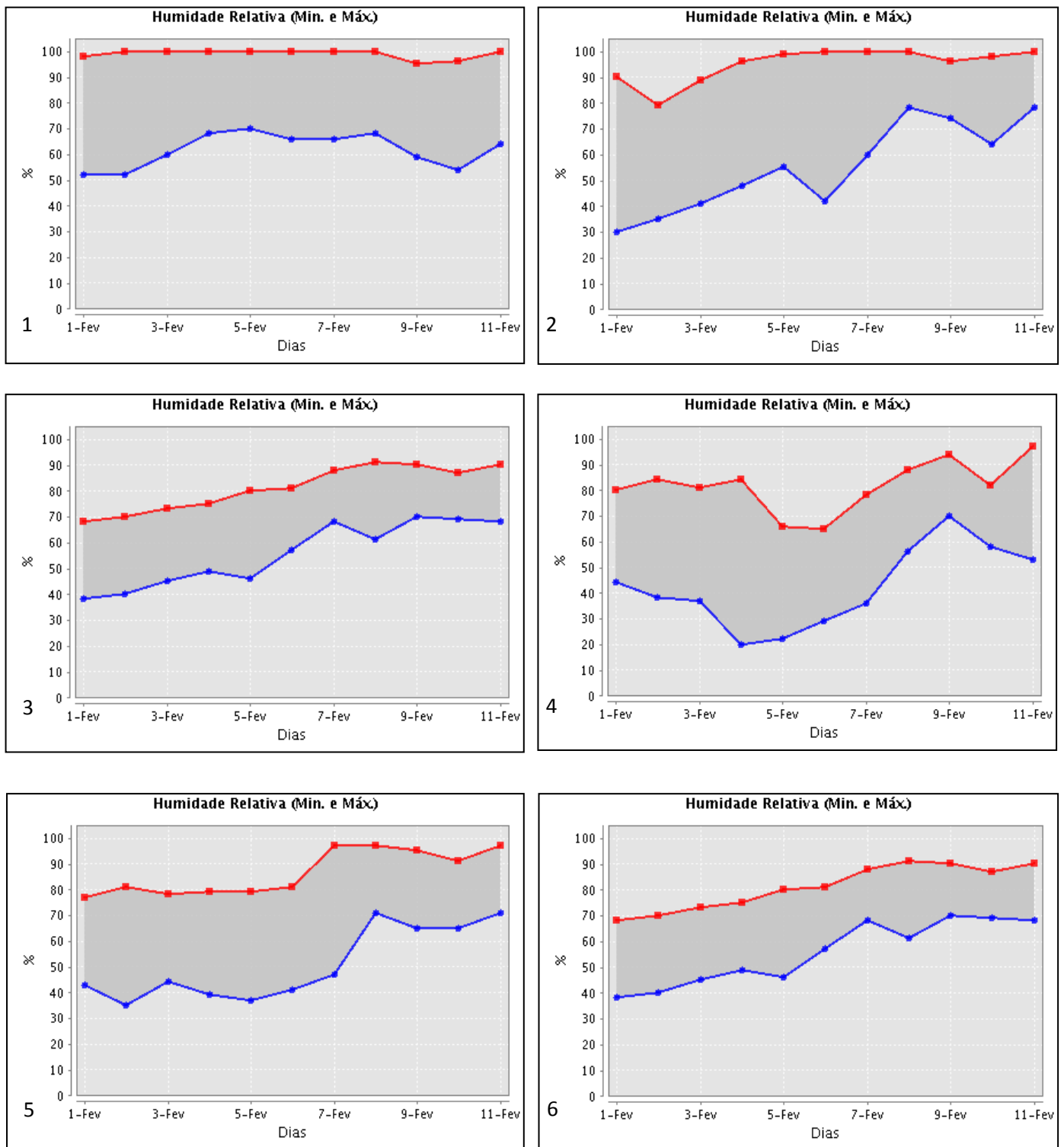


Figura 4.10 – Gráficos de observação das humidades relativas para diferentes estações ao longo de Portugal Continental - Inverno [Instituto de Meteorologia, IP]

Tal como se pode observar através da figura 4.11, os modelos evidenciam tendências semelhantes apesar de apresentarem valores diferentes.

As curvas são para a classe de cimento 32,5R ou 42,5N e com $h_0 = 20\text{cm}$.

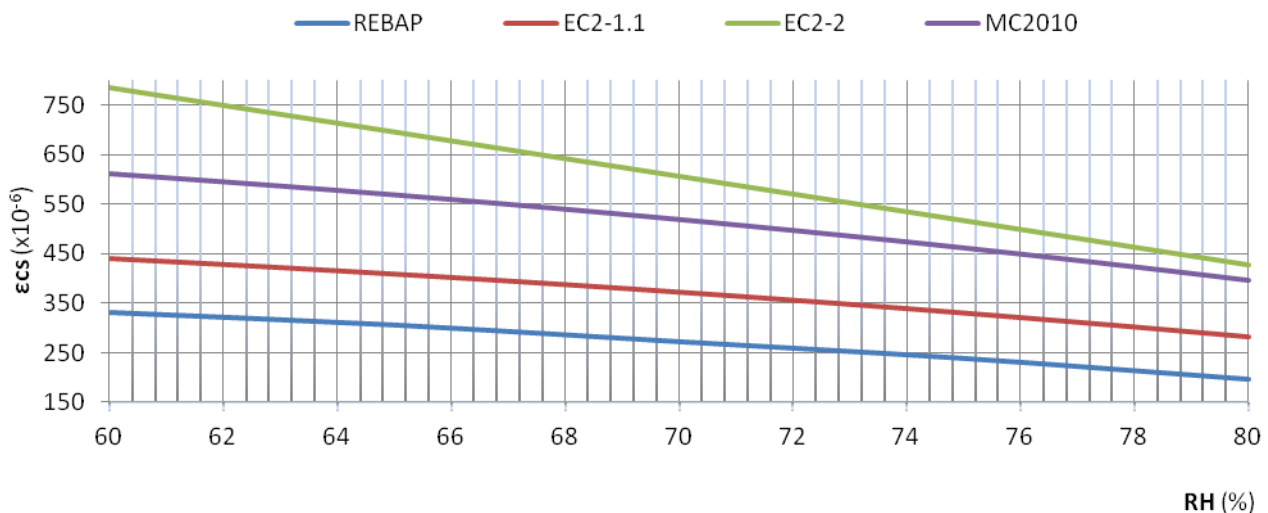


Figura 4.11 – Retracção no betão a tempo infinito, variando valores de RH (%) segundo o REBAP, EC2 e MC2010

É o modelo da segunda parte do Eurocódigo 2, relativo a pontes de betão, que aponta para valores mais elevados do grupo, o REBAP é o modelo que estima a retracção de uma forma menos conservativa, quanto aos modelos do *Model Code 2010* e a primeira parte do Eurocódigo 2 são modelos que retratam o fenómeno em estudo de forma intermédia, embora seja o modelo mais recente, MC2010, que se mostra um pouco mais conservativo em relação ao EC2-1.1.

Observando o gráfico na sua generalidade o andamento das curvas é o expectável, à medida que a humidade relativa sobe a extensão de retracção varia na razão inversa. Isto deve-se ao facto da retracção por secagem diminuir, deixando de causar tanto impacto na retracção final à medida que a humidade relativa vai aumentando.

A figura seguinte pretende esclarecer se o andamento das rectas da figura 4.11 são semelhantes entre si ou não. Desta forma a figura foi construída da seguinte forma: Tomando como 70% a humidade relativa padrão, foi-se encontrar a extensão de retracção correspondente a essa percentagem para cada modelo. Sabendo esse valor, o que se seguiu foi encontrar o quociente entre o valor da extensão a 70% com os outros valores de extensão para diferentes humidades relativas e assim se construiu-se a figura 4.12.

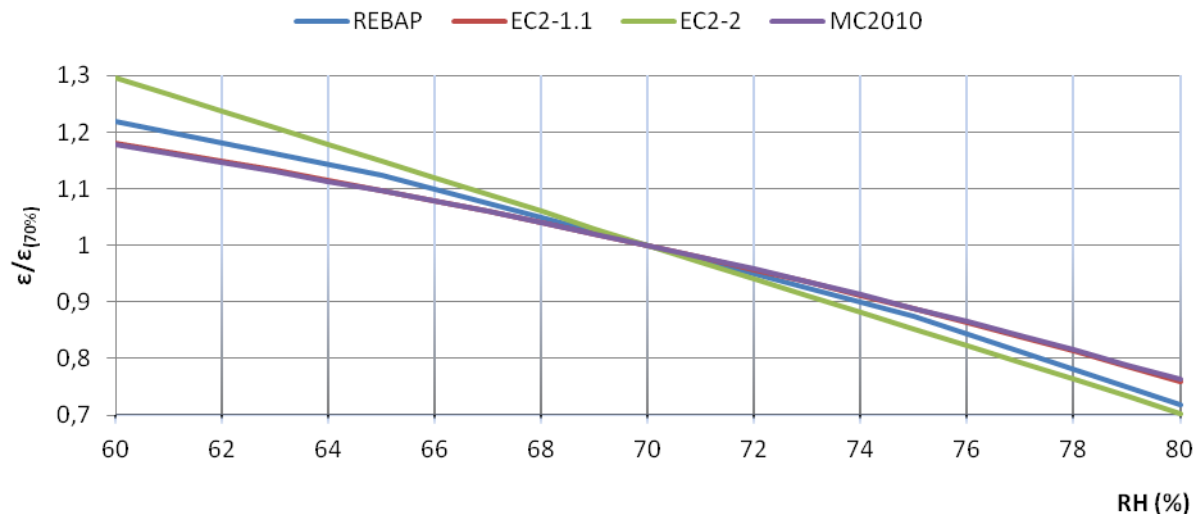


Figura 4.12 – Representação comparativa do andamento das curvas de extensão por retracção segundo o REBAP, EC2 e MC2010

Na figura 4.12 é bem visível que o andamento das rectas correspondentes ao MC2010 e ao EC2-1.1 é idêntico o que confirma que o paralelismo observado entre essas duas curvas na figura 4.11 não era apenas uma ilusão de óptica. A curva respectiva do modelo do EC2-2 é aquela que porventura mais se distancia dos outros modelos.

4.2.4. Efeito da variação do valor da espessura equivalente

O efeito da variação do valor da espessura equivalente é também merecedor de alguma ponderação. É possível encontrar diversas geometrias de peças em betão armado, a figura 4.13 mostra como a variação deste factor afecta nos modelos.

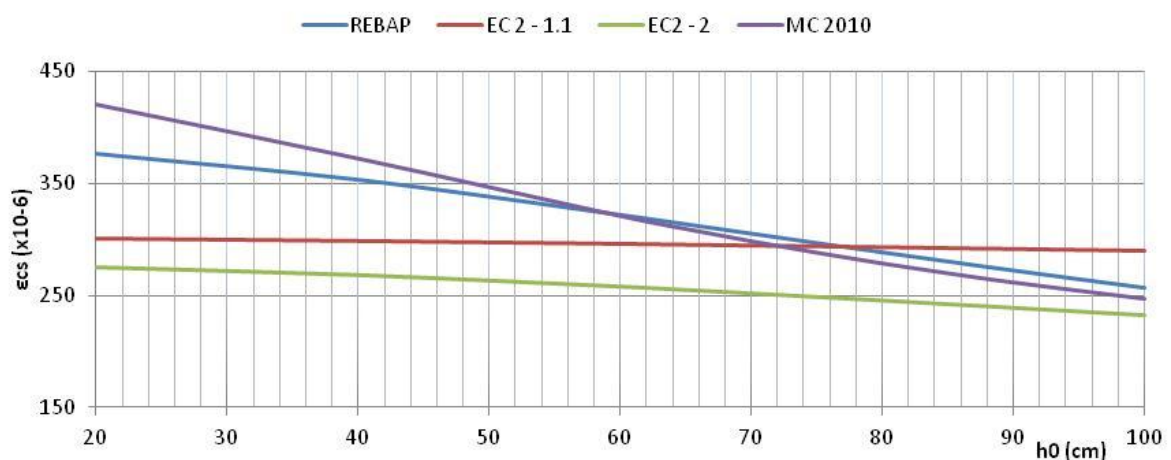


Figura 4.13 – Retracção no betão a tempo infinito, variando valores de h_0 (cm) segundo o REBAP, EC2 e MC2010

A tendência geral de todos os modelos é descendente, embora nuns essa tendência seja mais vincada do que noutros.

O modelo do MC2010 e do REBAP são o que mais se deixam afectar pela variação deste factor, sendo aquele que apresenta valores mais elevados para espessuras menores e valores mais reduzidos para espessuras superiores.

Em contrapartida os dois modelos que derivam do EC2 são menos sensíveis a essa variação.

Para valores de espessura mais reduzidos é o modelo do MC2010 que estima os valores mais elevados, seguido do REBAP, do EC2 – 1.1 e finalmente pelo EC2 – 2, este cenário é diferente para valores de espessuras mais elevadas, para espessuras de 100cm os valores previstos pelos modelos são mais próximos situando-se todos numa gama entre 250×10^{-6} e 290×10^{-6} .

4.3. Considerações Finais

De uma forma geral os valores estimados pelos modelos são semelhantes, no entanto pode-se verificar que os modelos do REBAP e do EC2 parte 2 são os que para tempo infinito prevêem os valores inferiores, no caso do MC2010 o valor previsto é o mais elevado comparativamente com os outros modelos. O EC2 parte 1.1 estima valores intermédios entre o MC2010 e os outros dois.

Segundo a análise feita nos capítulos anteriores, foi possível comprovar que o fenómeno em si depende, de facto, de inúmeras variáveis, das quais nem todas se podem controlar quando o ambiente é em obra, é o caso da humidade relativa ou da temperatura, existem ainda outras variáveis que podem ser, estas sim, controladas tais como o tipo de cimento ou a classe de resistência do betão a aplicar.

No que toca à humidade relativa, esta faz variar todos os modelos de uma forma semelhante, a extensão de retracção é inversamente proporcional ao valor da humidade relativa, no entanto é possível observar-se diferenças. A parte 2 do Eurocódigo 2 relativo a pontes é bastante sensível à mudança deste parâmetro e é o modelo do MC2010 que prevê o fenómeno com valores mais elevados em dissonância com o REBAP e o EC2 parte 1.1 onde os valores previstos são menores.

A temperatura não influencia os modelos de forma directa e apenas o REBAP e o MC2010 fazem alusão a esta variável.

Como foi dito anteriormente a classe de resistência e o tipo de cimento são variáveis que podem ser controladas/escolhidas, todos os modelos com excepção do REBAP são sensíveis à classe de cimento, o REBAP é de todos o único que não lhe faz alusão.

Quanto à classe de resistência, esta é importante para o comportamento do fenómeno, a partir da classe de resistência pode-se inferir relativamente à porosidade ou à relação água/cimento e isso são variáveis que influenciam bastante a extensão final de retracção.

A espessura equivalente faz variar os valores de extensão de uma forma inversa. Para modelos como o MC2010 ou o REBAP a espessura equivalente faz variar bastante o valor da extensão de retracção por outro lado os modelos preconizados pelo EC2 são menos sensíveis a essa variação.

Capítulo 5

COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS**5.1. Considerações Gerais**

A actividade do Núcleo de Observação de Estruturas (NOE) do LNEC, prende-se essencialmente com a instrumentação, observação e controlo da segurança estrutural durante e após a construção de obras de grande importância e complexidade. Incluindo a realização de ensaios de pontes e estruturas especiais, e ainda com estudos de apoio à gestão e conservação de pontes e estruturas especiais.

Foi em 1948 o primeiro grande trabalho de observação de pontes em que o LNEC teve intervenção. Tratou-se da vigilância e acompanhamento estrutural bem como o ensaio de carga da ponte do Sousa, cuja estrutura se baseia num arco de betão com 115m de vão. Diversas obras foram posteriormente instrumentadas pelo LNEC, com a finalidade de serem observadas durante a sua construção e a longo prazo, destacando-se algumas delas tais como:

- Ponte da Arrábida (1961-63);
- Ponte 25 de Abril (1963-66);
- Ponte Rio-Niterói no Brasil (1971-73);
- Ponte São João (1986-91);
- Ponte Internacional do Guadiana (1986-91);
- Ponte do Arade (1988-91);
- Ponte Miguel Torga da Régua (1996-98);
- Ponte Salgueiro Maia (1998-2000);
- Ampliação da pista do Aeroporto Internacional da Madeira (1997-2000);
- Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela em Angola (2006-2009);
- Ponte ferroviária sobre o rio Sado na Variante de Alcácer (2007-2010);
- Ponte sobre o rio Kwanza em Angola (2008-2010).

O grande número de obras observadas pelo NOE nos últimos sessenta anos, tem permitido reunir uma importante base de dados experimentais. Estes dados, grande parte dos quais directamente recolhidos *in situ*, têm não só assegurado o controlo e a verificação da

segurança estrutural dessas obras, como também contribuem, através da sua adequada exploração e análise, para a realização no LNEC de actividades de investigação.

Os primeiros estudos realizados envolviam a execução de provetes compensadores colocados em janelas específicas para alojar o provete que fica na estrutura. Com o passar do tempo as estruturas tornaram-se cada vez mais esbeltas, o que entrou em conflito com a colocação embutida dos provetes nas próprias almas, assim sendo os compensadores de retracção passaram a ser colocados no interior do caixão e sobre o tabuleiro.

5.2. Procedimento Experimental

5.2.1. Noções gerais

Os instrumentos utilizados para adquirir os dados necessários à investigação do fenómeno da retracção são aqueles que o NOE habitualmente utiliza em estruturas de betão armado e pré-esforçado.

Os instrumentos a utilizar têm que satisfazer alguns parâmetros tais como:

- Tecnologia simples e simultaneamente sólida;
- Facilidade e rapidez de instalação em obra;
- Alguma portabilidade, leveza e facilmente transportável;
- Robustez;
- Estabilidade das medições realizadas *in situ*.

5.2.2. Extensómetros

As medições realizadas no interior dos provetes por intermédio de extensómetros são com o objectivo de se obter o conhecimento das extensões. Os extensómetros são aparelhos utilizados experimentalmente, para avaliar as extensões ocorridas num dado ponto e numa dada direcção de um provete. Na realidade, os extensómetros apenas medem a variação de distância (ΔL) de dois pontos inicialmente afastados de (L), distância essa que se designa por base de medida.

Podem classificar-se os extensómetros de acordo com o fenómeno em que se baseia o seu princípio de funcionamento. Os tipos de extensómetros mais utilizados pelo NOE são os de corda vibrante que funcionam por intermédio de um electro-íman que excita uma corda de

aço e mede a frequência com que a corda fica a vibrar, tendo o conhecimento que o quadrado da frequência é proporcional à tensão instalada e sabendo o módulo de elasticidade do aço fica-se a conhecer a deformação da corda. É de referir que o extensómetro é fixado com braçadeiras ou arames, e coloca-se uma rede por cima para protecção aquando da betonagem, este procedimento não se aplica aos provetes.

É importante referir que hoje em dia os extensómetros trazem incorporados um termistor que são controladores térmicos, cuja função principal é exibir uma mudança precisa em resistência eléctrica quando o corpo sofrer uma mudança de temperatura. A característica mais relevante de um termistor é, sem dúvida, o seu coeficiente de temperatura de resistência alta.

Além de extensómetros de corda vibrante, representados na figura 5.1, são também utilizados extensómetros eléctricos de resistência - que se baseiam na variação da resistência eléctrica de um condutor (circuito) quando submetido a uma deformação.

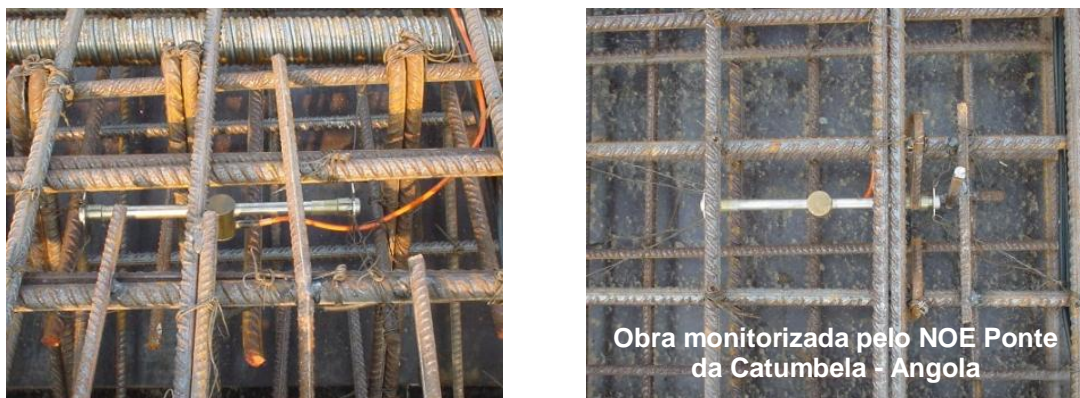


Figura 5.1 – Extensómetros de corda Vibrante

5.2.3. Pares Termo-Eléctricos

São aplicados no interior de betão e baseiam-se no efeito termoeléctrico (Seebeck), ou seja, quando se ligam pelas extremidades dois fios de metais diferentes e essas extremidades são mantidas a temperaturas diferentes, gera-se uma força electromotriz de origem térmica, o que é evidenciado por um fluxo de corrente através dos fios.

A sensibilidade e a precisão são variáveis consoante o tipo de termopar e do potenciómetro utilizado.

O principal inconveniente da utilização de termopares prende-se com o facto dos valores da força electromotriz serem muito pequenos, por exemplo, para um par cobre-constantan uma variação de 1°C corresponde a 0,04mV o que impossibilita leituras a grandes distâncias.

5.2.4. Termómetros de resistência eléctrica

A medição da temperatura com termómetros de resistência (fig. 5.2) assenta na propriedade de todos os condutores e semicondutores alterarem a sua resistência eléctrica em função da temperatura. Esta característica é mais ou menos pronunciada para diferentes materiais. O aumento da temperatura aumenta a resistência do material.

Este tipo de equipamento possui diversas vantagens, tais como:

- Elevadas amplitudes de temperatura
- Resistência à vibração
- Elevada imunidade às interferências eléctricas
- Estabilidade mecânica e térmica
- Elevada robustez
- Elevada precisão e sensibilidade



Figura 5.2 – Termómetro
Obra monitorizada pelo NOE - Ponte da Catumbela – Angola

5.2.5. Processo construtivo dos provetes de retracção

A forma actualmente utilizada para efectuar estudos de extensão de retracção no betão *in situ* envolve a execução de provetes que não ficam sujeitos a nenhum carregamento, sendo

assim possível afirmar que as deformações são devidas apenas aos efeitos termo-higrométricos. Relativamente às espessuras equivalentes, estas são simuladas recorrendo à aplicação de isolamento higrométrico, nas faces de topo e em duas faces opostas, onde é aplicada uma membrana betuminosa auto-protegida com alumínio. Para avaliar a retracção do betão o NOE utiliza provetes compensadores de retracção, ou simplesmente provetes de retracção. As deformações deste provetes são devidas exclusivamente a efeitos termo-higrométricos, estes não se encontram carregados e os provetes são isolados, por intermédio de uma membrana betuminosa protegida com alumínio, segundo um dos seus perímetros de modo a ficarem apenas com duas faces opostas em contacto directo com o ambiente, sendo que as trocas de humidade e temperatura são feitas exclusivamente por duas faces opostas entre si.

A figura 5.3 ilustra as diversas fases de execução de provetes de retracção: Extensómetros no interior dos moldes, betonagem dos provetes, cura dos provetes e isolamento dos provetes.



Figura 5.3 – Execução de provetes de retracção
Obra monitorizada pelo NOE Ponte da Catumbela - Angola

5.2.6. Sistemas de aquisição e transmissão de dados

Os sistemas de aquisição automática constituídos por *data loggers* (fig. 5.4) permitem o acesso mais simples à informação e simultaneamente reduzem os custos de exploração. Cada *logger* pode ser programado para fazer recolha de dados para diferentes cadências e esses dados podem ser armazenados nos respectivos *loggers* ou em cartões de memórias que lhes poderão ser incorporados.

Os sistemas de aquisição de dados que estão implementados às estruturas monitorizadas pelo NOE/DE permitem a aquisição de dados sem ser necessário uma deslocação ao local, esse facto permite uma economia não só de recursos materiais como de recursos humanos, além disso este tipo de sistema é capaz de recolher dados no *timing* programado e possui um router que funciona como uma unidade de transmissão, *fatbox* (fig. 5.5), capaz de enviar esses dados para o destino desejado.



Figura 5.4 – Data logger e expansor de canais
Obra monitorizada pelo NOE



Figura 5.5 – Router *Fatbox*
Obra monitorizada pelo NOE

5.3. Tratamento dos resultados

O estudo deste fenómeno é elaborado por intermédio da medição de extensões em provetes compensadores de retracção que não estão sujeitos a quaisquer tipos de forças exteriores, devendo-se a sua deformação exclusivamente a variações de temperatura e ao efeito da retracção.

Tal como esperado, os valores refletem duas componentes, a componente sazonal, aliada à temperatura (ΔT) e a componente da tendência da retracção (ϵ_{cs}) e para permitir o ajustamento da curva proposta pelos diferentes modelos foi necessário introduzir-se dois coeficientes no caso do REBAP, um valor C1 destinado a afectar o valor a tempo infinito e outro valor C2 a corrigir o valor do desenvolvimento no tempo.

Desta forma, a curva inicial composta pelas suas componentes de tendência e sazonalidade poderá ser desassociada da componente sazonal obtendo assim uma curva com a única componente da tendência e por sua vez mais simples de comparar com o que os modelos preconizam.

No que diz respeito aos modelos do EC2 e do MC2010, são necessários quatro coeficientes. Com efeito, estes modelos tal como foi dito anteriormente, possuem uma parcela relativa à secagem e outra relativa à retracção autogénea, desta forma é necessário trabalhar matematicamente cada parcela destes modelos de forma independente e assim tem-se os valores de C1 e C3 associados às parcelas do valor infinito e os valores C2 e C4 ao desenvolvimento ao longo do tempo.

Os valores de C1, C2, C3 e C4 são calculados com o auxílio de uma regressão não linear aos valores experimentais, de forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre estes valores e os valores estimados (Santos, L.O. 2001).

Em todos estes modelos a acção da temperatura deve ser considerada. O estudo dos registos contínuos da temperatura em diversos locais de Portugal permitiu concluir que a sua caracterização analítica poderá ser efectuada por intermédio de funções harmónicas de período diário e de período anual, associadas a uma variação sazonal (Silveira, 1961).

Com o objectivo de minimizar os efeitos das variações térmicas diárias, sempre que possível foram utilizados os valores medidos às 6 horas da manhã. Desta forma é possível dizer que os valores da temperatura variam essencialmente devido à variação térmica sazonal, podendo ser representadas através de uma expressão sinusoidal de período anual. Aquilo que se pretende identificar tem origem nas diferenças de temperatura no betão quando as diversas medições foram efectuadas e a temperatura do betão aquando da primeira medição. Desta forma a temperatura de referência deverá ser a temperatura registada ao instante t_s (primeira leitura), assim pode-se dizer que as extensões retiradas da leitura dos provetes compensadores de retracção podem ser estimadas através da expressão de cada modelo somado a uma expressão sinusoidal de período anual, tal como:

$$A1 \times \cos\left(\left(\frac{2\pi \times (t - t_s)}{365}\right) - 1\right) + A2 \times \text{sen}\left(\frac{2\pi \times (t - t_s)}{365}\right) \quad (5.1)$$

É visível a aproximação que cada modelo faz à curva dos valores experimentais, no entanto e com o objectivo de dotar a comparação de algum valor estatístico, calculou-se o valor do coeficiente de Pearson, este coeficiente mede o grau da correlação entre duas variáveis. Este é um coeficiente normalmente apresentado por ρ e assume valores compreendidos entre -1 e 1, quanto mais próximo de um for o valor do coeficiente mais forte é a correlação,

sendo que no caso do valor tender para -1 estamos perante uma correlação negativa, ou seja, enquanto uma variável diminui a outra aumenta.

O coeficiente de correlação de Pearson é calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{var}(x) \times \text{var}(y)}} \quad (5.2)$$

5.4. Retracção observada na ponte Miguel Torga

5.4.1. Descrição da estrutura

A ponte Miguel Torga, cujo projecto é da autoria do Eng^o. Armando Rito [RITO, 1994] atravessa o vale do rio Douro a 90 m de altura numa zona francamente acidentada, com grandes afloramentos rochosos.

A obra cruza a linha férrea do Douro e ainda duas estradas nacionais. O comprimento total é de 900 m e é curva em planta. A solução estrutural passa por um tabuleiro único contínuo com, em caixão monocelular, de secção variável em altura, com 11 tramos, dos quais o principal é o referido anteriormente com 180 m de vão.

A secção do tabuleiro é constituída por um caixão monocelular em betão armado e pré-esforçado cuja largura é de 25,7 m. O tabuleiro foi construído pelo método dos avanços sucessivos e é contínuo em toda a sua extensão, a ligação aos pilares P7 e P10 é monolítica existindo aparelhos de apoio do tipo pot-bearing na ligação com os outros pilares e sobre os encontros.

Transversalmente o tabuleiro é constituído por duas almas com 0,60 m de espessura (0,70 m no tramo de 180 m e adjacentes) ligadas por lajes e por travessas espaçadas de 5 m entre si. O tabuleiro é pré-esforçado longitudinalmente e transversalmente nas lajes e travessas superiores, com pré-esforço aderente. Dispõe já de dispositivos para a realização de eventuais reforços através da utilização de pré-esforço quer exterior (não aderente) quer interior (aderente).

O tabuleiro foi construído por avanços sucessivos em consola por aduelas de 5 m, tendo a obra sido integralmente betonada “*in situ*”.

O fuste tubular dos pilares é de secção constante, sendo o necessário acréscimo de secção na zona da base dos pilares principais conferido por quatro nervuras de dimensão variável.

O tabuleiro apoia através de aparelhos do tipo “pot-bearing” nos encontros e nos pilares P1 a P6 estando monilíticamente ligado aos restantes.

Dado que as formações rochosas locais são praticamente aflorantes, adoptaram-se fundações directas quase superficiais.

É ainda importante de referir que esta obra foi concluída em 1997 é dotada de uma extrema beleza, tal como se pode ver pela figura 5.6, e recebeu o prémio de engenharia da primeira Bienal Ibero-Americana de Engenharia e Arquitectura no ano de 1998, pela sua inovação e dificuldade tecnológica. [Rito, 1996]



Figura 5.6 – Vista Geral da Ponte Miguel Torga

5.4.2. Descrição da Instrumentação

Os resultados obtidos relativos à retracção do betão foram obtidos por intermédio de extensómetros de corda vibrante instalados em cinco secções do tabuleiro e em quatro secções dos pilares.

Durante a betonagem das secções instrumentadas do tabuleiro (S3 a S7), procedeu-se à execução de provetes compensadores termo-higrométricos, no interior dos quais foram

inseridos extensómetros. Estes provetes foram mais tarde colocados sobre o tabuleiro e também no interior do caixão.

Todos os provetes compensadores possuem uma base quadrada com 30 cm de aresta. Com o objectivo de aumentar a sua espessura equivalente, os provetes foram impermeabilizados em duas faces laterais opostas.

Existe uma curiosidade que vale a pena referir, é esta obra que marca um ponto de viragem na forma como o LNEC ate aqui elaborava as suas observações em outras estruturas de betão armado e pré-esforçado, nomeadamente:

- Foi na ponte Miguel Torga que se deu início à instalação de sistemas digitais de recolha automática de dados como os *data loggers* descritos anteriormente no subcapítulo 6.2.3.;
- É de notar o elevado número de provetes compensadores de retracção existentes em cada secção;
- O facto de se manterem provetes em laboratório consistiu por si só uma inovação;
- O registo da temperatura, pluviosidade e humidade exterior e interior começou a ser efectuado.

Várias foram as secções instrumentadas da S1 à S8, sendo que será a secção 4 que servirá de base de apoio a este trabalho, esta é a secção com maior carga informativa e além disso trata-se de uma secção junto ao pilar do maior vão da ponte, conforme a imagem 5.7 exemplifica.

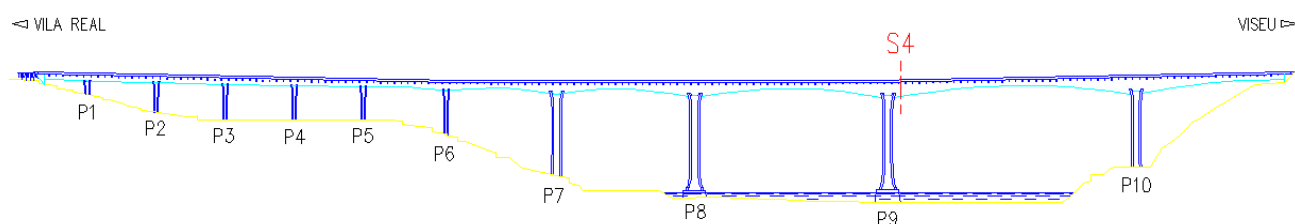


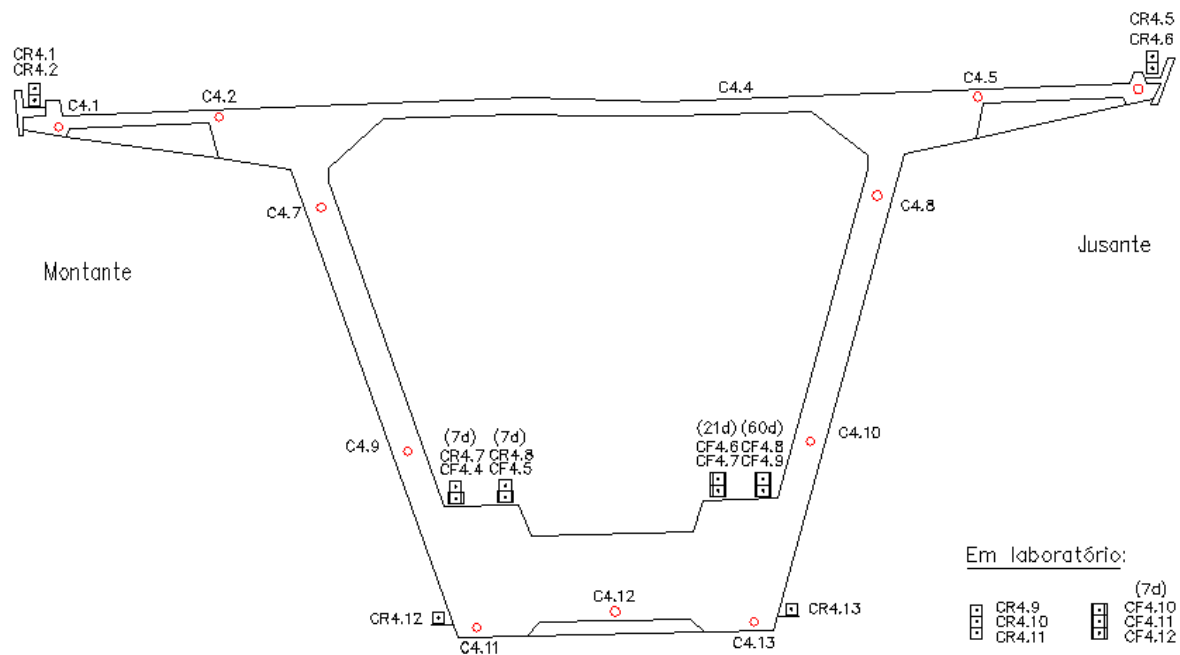
Figura 5.7 – Ponte Miguel Torga. Localização da secção instrumentada
[NEVES, *et al*, 2010]

A secção S4 foi de todas as secções a mais instrumentada, tal como se pode ver pela imagem 5.8, num total de treze provetes compensadores de retracção, dos quais oito foram

colocados no exterior, dois no interior e três em laboratório, dos oito provetes colocados no exterior, seis foram colocados no tabuleiro e dois foram abrigados nas consolas.

Cada provete compensador termo-higrométrico têm uma espessura equivalente de 300 mm.

Secção S4:



CONVENÇÕES:

- C – Extensômetro activo
- ▣ CR – Compensador termo-higrométrico
- ▣ CF – Compensador de fluência

Figura 5.8 – Ponte Miguel Torga. Secção instrumentada S4
[NEVES, *et al*, 2010]

5.4.3. Comparação dos resultados experimentais com os modelos de previsão

A figura 5.9 mostra as extensões de retração obtidas nos diferentes compensadores de retração. Esta secção dispõe de treze provetes compensadores de retração, oito são provetes exteriores, dos quais 2, CR12 e CR13 são abrigados, dois são interiores e três estão em laboratório.

Os provetes CR4.6, CR4.3 e CR4.2, mostraram valores irregulares, provavelmente por falhas do equipamento, e por esse motivo não serão tomados em conta na seguinte análise.

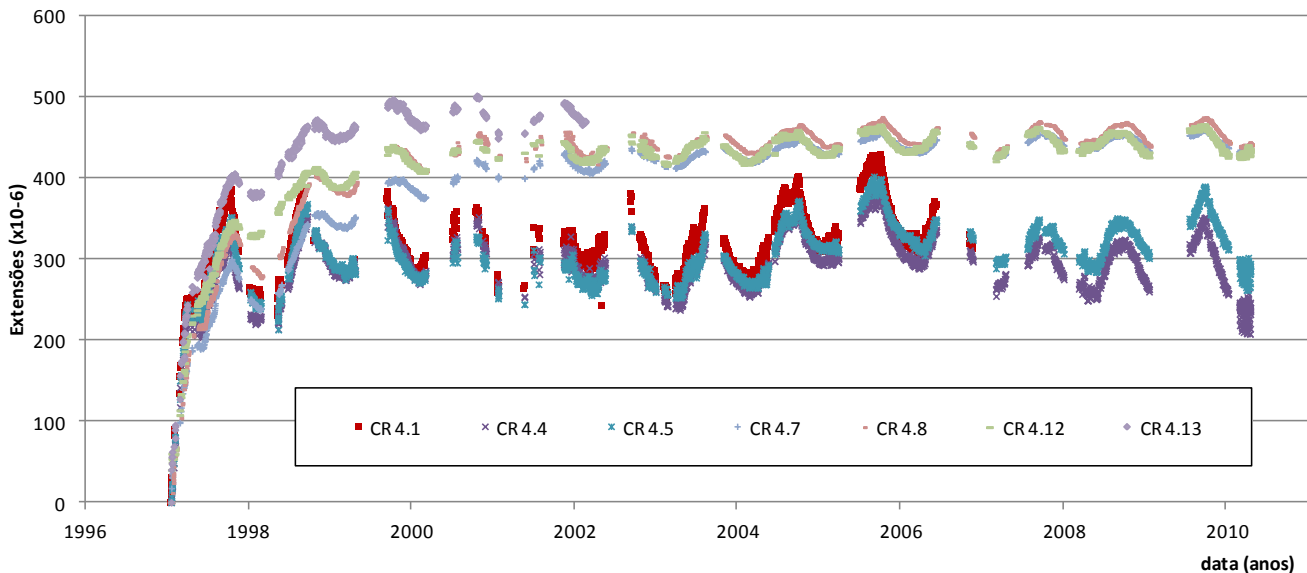


Figura 5.9 – Extensões de retração na secção S4.

No quadro 5.1 apresentam-se os valores dos parâmetros C1, C2, C3 e C4 no caso destes dois últimos tiverem lugar e ainda os parâmetros A1 e A2 para o provete interior CR 4.8, da secção 4 betonada em 19/01/1997. Todos os provetes da secção 4 passaram pelo mesmo método de tratamento, como exemplo foi escolhido o provete CR 4.8, este é um provete colocado no interior, este e o facto de ser este o provete cuja qualidade dos dados era a melhor, foram os principais motivos que levaram à escolha deste provete como provete exemplificativo.

Quadro 5.1 – Coeficientes de ajustamento dos modelos aos valores experimentais da retracção do betão para a ponte Miguel Torga

Modelo de Previsão	C1	C2	C3	C4	A1	A2
REBAP	1,06962	0,48642			19,78254	-15,09080
EC2 – 1.1	1,28175	1,28163	0,96301	0,96374	-3,71917	-6,97532
EC2 – 2	1,57773	1,57771	1,13087	1,11508	-3,01688	-8,39141
MC 2010	1,62959	1,62506	0,88437	0,88436	0,25223	8,57470

Os valores apontados no quadro 5.1 são valores calculados para humidades relativas de 70% e valor de f_{ck} de 50 MPa. No caso do REBAP admitiu-se betão de consistência plástica e cimento de endurecimento lento/normal. Para os modelos do EC2 e do MC2010 admitiu-se classe de cimento 32,5R/42,5N.

Cada modelo apresenta curvas estimadas diferentes e cada um estima os valores medidos de forma particular, embora semelhantes, estes possuem a sua própria forma de estimar os valores medidos, a figura 5.10 apresenta as curvas estimadas para cada modelo em questão nesta dissertação bem como as curvas admitidas por cada modelo de previsão da retracção.

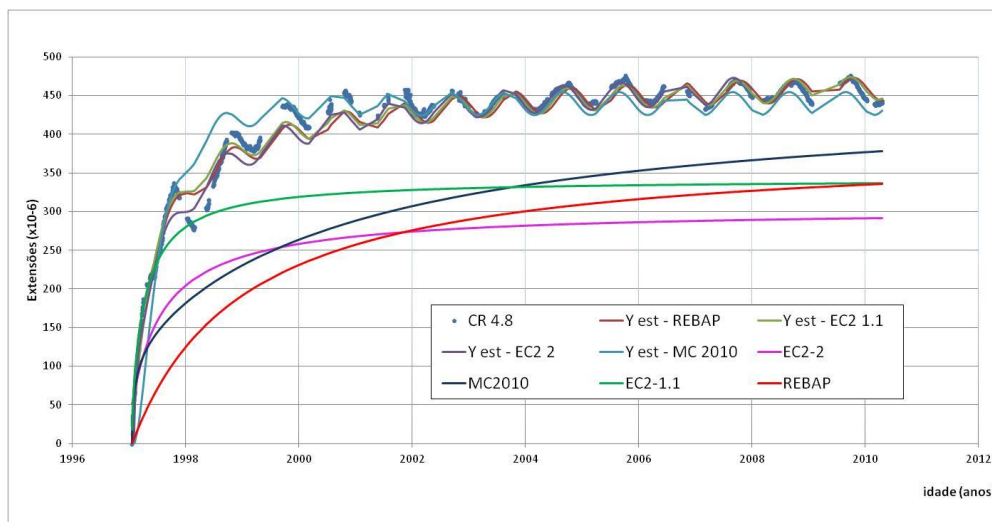


Figura 5.10 – Ponte Miguel Torga. Secção S4. Retracção do provete CR4.8 em obra: curvas ajustadas a esses valores pelo REBAP, EC2 1.1, EC2 2 e MC2010 e curvas dos modelos

5.4.3.1. REBAP

A figura 5.11 representa as curvas ajustadas por regressão não linear para os diferentes provetes de retracção para este modelo.

Os coeficiente A1 e A2, explicados anteriormente, foram anulados com a intenção de anular a componente sazonal e assim ser possível efectuar-se uma comparação mais real com o modelo proposto pelos regulamentos.

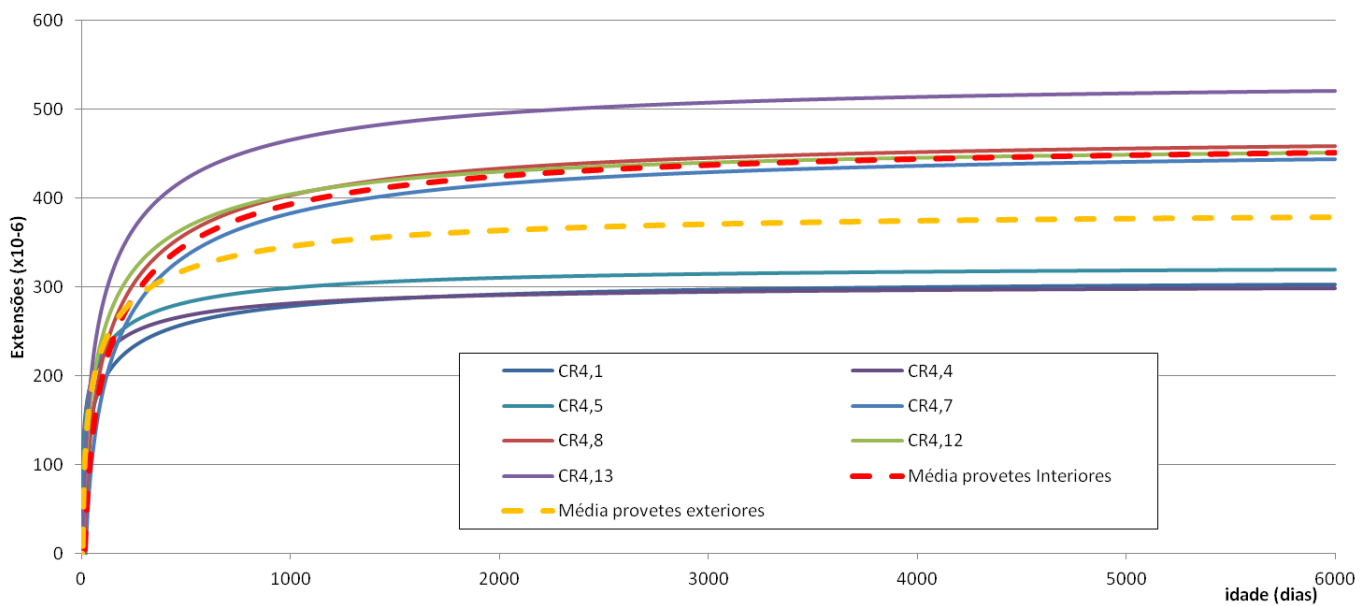


Figura 5.11 – Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o REBAP

Tal como a figura 5.11 mostra, a curva média, que é resultado da média dos valores de extensão de retracção de todos os outros provetes tem o intuito de transparecer o comportamento geral dos provetes desta secção para assim ser possível comparar com a curva proposta pelo modelo.

Desta forma facilmente se compara os valores medidos *in-situ* com os valores teóricos, ora veja-se a figura 5.12:

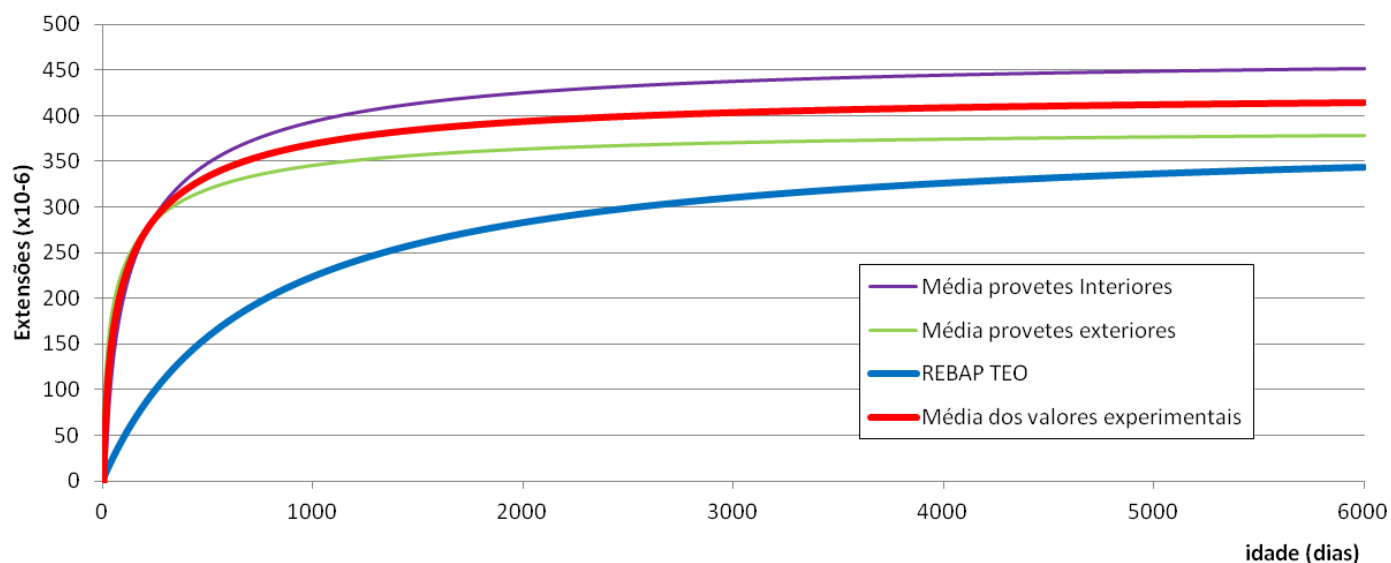


Figura 5.12 – Curva média e curva proposta do REBAP

Com o objectivo de fornecer a esta comparação alguma base estatística para comparar os resultados da extensão de retracção de forma mais eficaz, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de Pearson, retirando-se a componente sazonal às curvas estimadas anulando-se os valores dos coeficiente A1 e A2 demonstrados anteriormente.

Além do coeficiente de Pearson foi também calculado a média do erro que tem origem na diferença entre a curva estimada, que deriva dos valores medidos, e a curva teórica, desta forma apresenta-se o quadro 5.2.

Modelo de Previsão	ρ	Média do Erro ($\times 10^{-6}$)
REBAP	0,851	63

Quadro 5.2 – Valor do coeficiente de correlação de Pearson e média do erro

A curva da média dos valores experimentais apresenta extensões estáveis a partir dos 2500 dias após a betonagem, ou seja aproximadamente seis anos e meio de idade do betão. Com efeito, a partir desta data as extensões medidas no compensador de retracção são sensivelmente as mesmas, variando apenas com a parcela sazonal, pois nesta altura o equipamento deixa de transparecer as extensões relativas ao fenómeno, em estudo passando a ser sensível apenas às variações das condições ambientais de cada época do ano.

No entanto esse princípio não corresponde à curva proposta pelo modelo do REBAP pois para as extensões teóricas é possível ver que só mais tarde é que se pode observar a criação de uma assíntota, ou seja, foram necessários cerca de 4000 dias, aproximadamente 11 anos.

Algo interessante a ser tomado em conta é o facto do valor máximo apontado pelo REBAP não ultrapassar extensões na ordem dos 335×10^{-6} enquanto os valores experimentais apontam para uma gama de valores um pouco superiores entre os 350×10^{-6} e os 400×10^{-6} .

Tal como quadro 5.2 mostra, o valor do coeficiente de regressão de Pearson para este modelo teórico do REBAP e os valores da curva estimada é de 0,851, o que constitui uma forte correlação. A média do erro foi igualmente calculada e o valor obtido foi de $63,754 \times 10^{-6}$, sendo que o erro é a diferença entre a curva estimada e a curva proposta pelo modelo do REBAP.

5.4.3.2. EC2 - Parte 1.1 - Regras gerais e regras para edifícios

A figura 5.13 representa as curvas ajustadas por regressão não linear para os diferentes provetes de retracção para este modelo.

Comparativamente com a figura 5.11 a que se segue é ligeiramente diferente pois a regressão possui diferentes coeficientes por se tratar de um outro modelo de previsão.

Uma vez mais os coeficiente A1 e A2, foram novamente anulados com a intenção de anular a componente sazonal e assim ser possível efectuar-se uma comparação mais real com o modelo proposto pelos regulamentos.

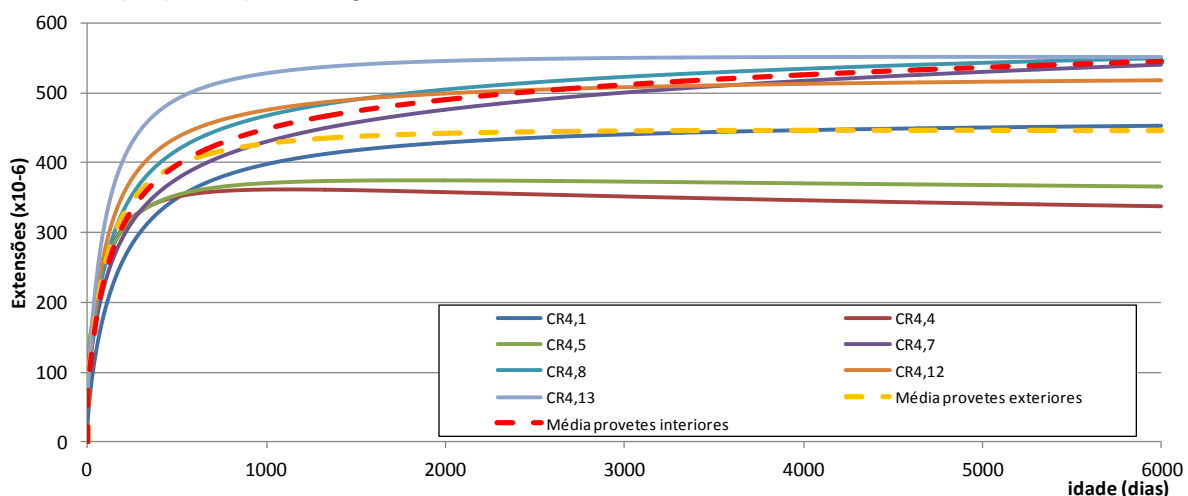


Figura 5.13 – Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 1.1

A figura 5.13 mostra a curva média, que é resultado da média dos valores de extensão de retracção de todos os outros provetes e tem o objectivo de mostrar o comportamento geral dos provetes desta secção para assim ser possível comparar com a curva proposta pelo modelo.

Desta forma facilmente se compara os valores medidos *in-situ* com os valores teóricos, ora veja-se a figura 5.14:

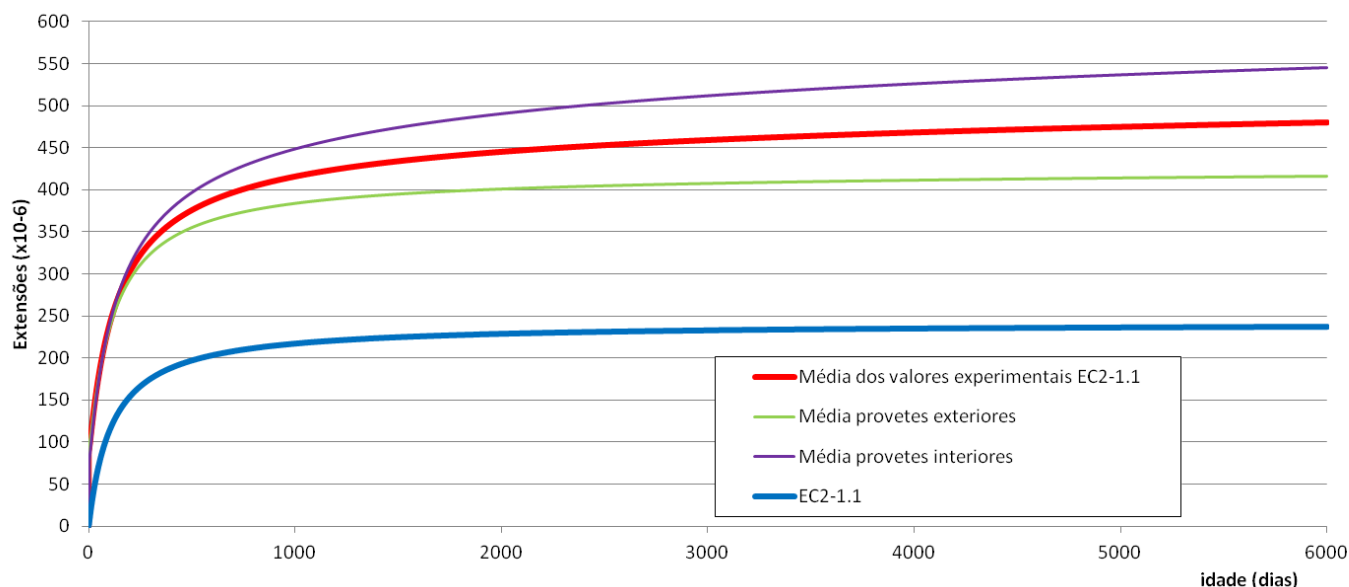


Figura 5.14 – Curva média e curva proposta do EC2 – 1.1

Com o mesmo objectivo enunciado no modelo anterior procedeu-se ao cálculo do coeficiente de Pearson e da média do erro retirando-se a componente sazonal às curvas estimadas anulando-se os valores dos coeficiente A1 e A2.

Desta forma apresenta-se o quadro 5.3.

Modelo de Previsão	ρ	Média do Erro ($\times 10^{-6}$)
EC2 – 1.1	0,982	155

Quadro 5.3 – Valor do coeficiente de correlação de Pearson e média do erro

Na figura 5.14 estão igualmente representados os valores da curva estimada por regressão não linear segundo o EC2 – 1.1, e a curva resultante da aplicação do mesmo modelo.

Comparativamente ao modelo do REBAP o qual foi referido no subcapítulo anterior, esta parte do modelo do EC2 apresenta um crescimento muito rápido para um curto período de tempo após a betonagem e os valores obtidos experimentalmente apontam um crescimento igualmente rápido que apenas atinge a estabilidade cerca de 3 anos (1000 dias) após a betonagem um pouco à semelhança do modelo proposto pelo regulamento cuja estabilidade é atingida igualmente cerca de 3 anos após a betonagem.

Para as condições introduzidas este modelo do EC2 – parte 1.1 – Regras gerais e para edifícios, apresenta valores abaixo dos valores realmente obtidos. O modelo proposto preconiza valores máximos estáveis na ordem dos 240×10^{-6} enquanto que os valores experimentalmente obtidos, já em fase estável, são na ordem dos 390×10^{-6} , valores estes que são obtidos por volta do ano 2000 e que se propagam de forma mais ou menos estável ao longo do tempo.

Tal como o modelo anterior, neste modelo, e com o mesmo objectivo, procedeu-se, ao cálculo do coeficiente de Pearson. Para isso retirou-se a componente da sazonalidade às curvas estimadas, ou seja, anulou-se os valores de A1 e A2 para de seguida se efectuar a comparação entre os valores da curva de regressão e os valores teóricos, ambos desprovidos da componente sazonal, como mostra a figura 5.14, o coeficiente de correlação de Pearson foi neste caso de 0,982, o que constitui uma correlação forte, no entanto o valor da média do erro obtido foi de $155,073 \times 10^{-6}$, quadro 5.3.

5.4.3.3. EC2 - Parte 2 - Pontes

A figura 5.15 é representativa das curvas ajustadas por regressão não linear para os diferentes provetes de retração para o EC2-2.

Comparativamente com a figura 5.11 e 5.13 a que se segue é ligeiramente diferente pois a regressão possui diferentes coeficientes por se tratar de um outro modelo de previsão.

Os coeficiente A1 e A2, foram novamente anulados com a intenção de anular a componente sazonal e assim ser possível efectuar-se uma comparação mais real com o modelo proposto pelos regulamentos.

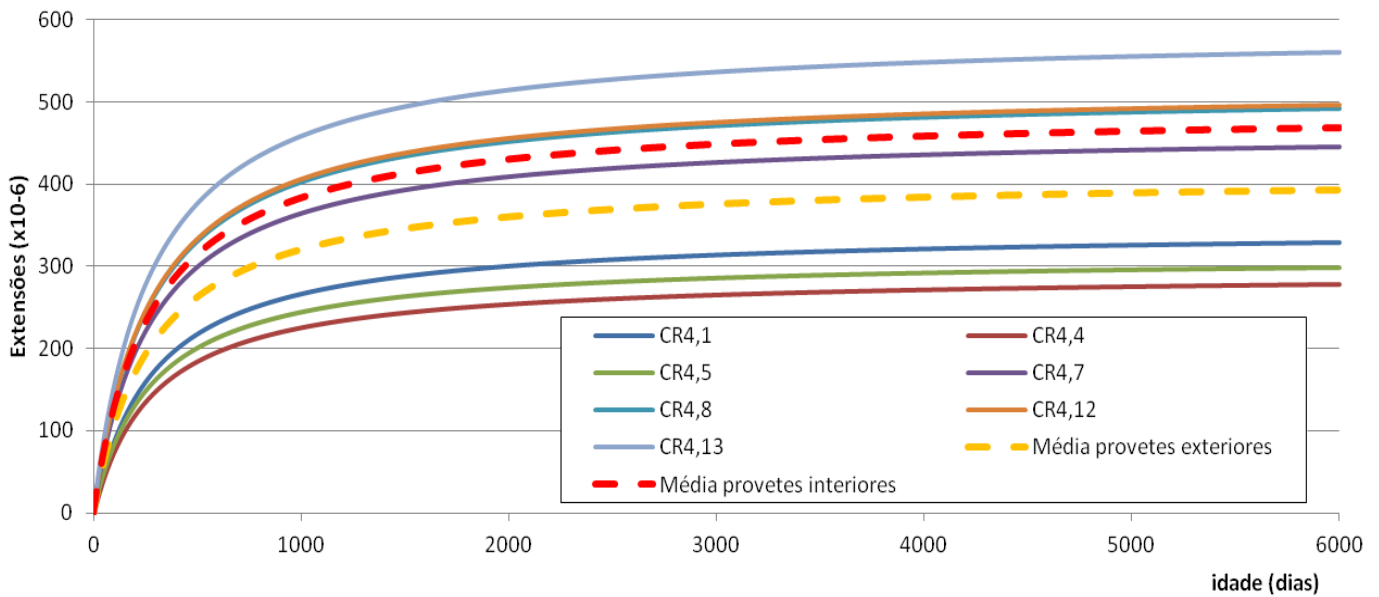


Figura 5.15 – Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 2

Utilizando o mesmo método utilizado anteriormente é possível fazer uma comparação com a curva do modelo. Na figura 5.16 está presente a curva do modelo e a curva média para ser possível efectuar uma comparação.

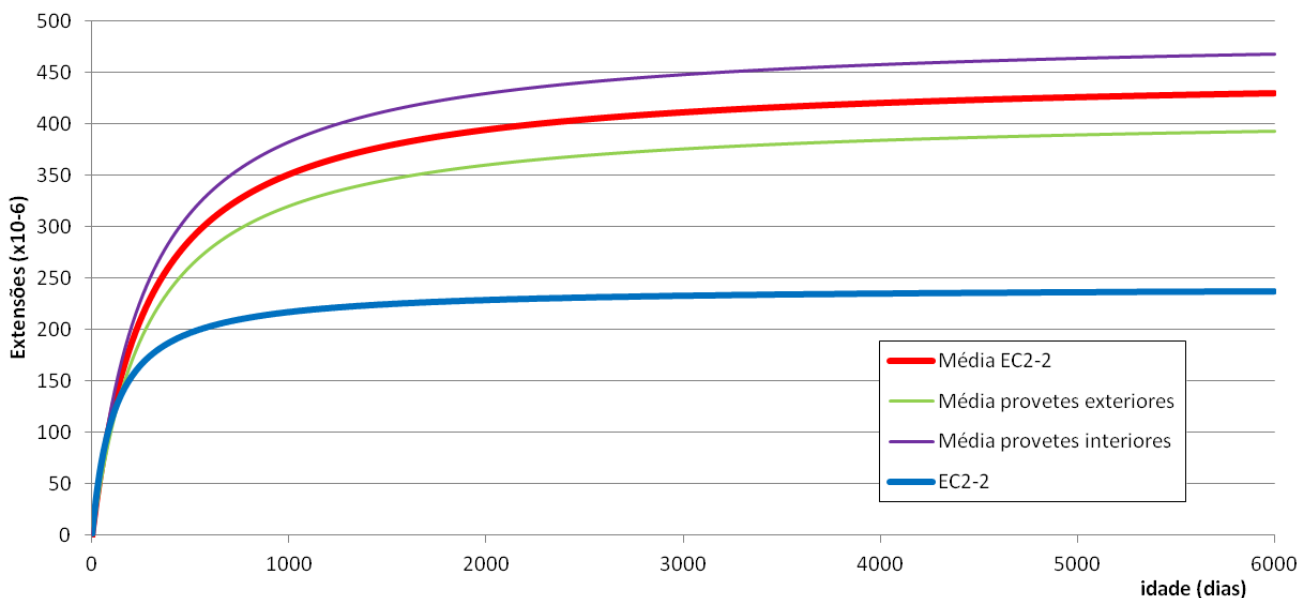


Figura 5.16 – Curva média e curva proposta do EC2 - 2

Procedeu-se ao cálculo do coeficiente de Pearson e da média do erro retirando-se a componente sazonal às curvas estimadas anulando-se os valores dos coeficiente A1 e A2.

Desta forma apresenta-se o quadro 5.4.

Modelo de Previsão	ρ	Média do Erro ($\times 10^{-6}$)
EC2 – 2	0,978	111

Quadro 5.4 – Valor do coeficiente de correlação de Pearson e média do erro

O modelo descrito na parte 2 do EC2 é um modelo que foi elaborado a pensar especialmente em pontes. Desta forma seria de pensar que este modelo faria um bom ajuste para o caso em estudo, pois a estrutura em questão também se trata de uma ponte.

As figuras 5.15 e 5.16 são representativas dos valores experimentais medidos nos provetes compensadores de retracção e as respectivas curvas ajustadas, para ser mais fácil identificar as semelhanças com o modelo teórico, está igualmente presente a curva teórica preconizada pela segunda parte do Eurocódigo 2. É facilmente perceptível que os valores medidos são superiores aos valores apontados pelo modelo assumido pelo EC2 - 2. Os valores de extensão medidos, a tempo infinito, apresentam valores numa gama entre 350×10^{-6} e 400×10^{-6} no entanto os valores apontados pela curva teórica apresentam extensões menores na ordem dos 275×10^{-6} . Os valores medidos experimentalmente estabilizam por volta do ano 2004, aproximadamente, em consonância com aquilo que o modelo propõe.

O crescimento inicial dos valores da extensão são igualmente diferentes, o modelo aponta para um crescimento menos rápido àquele que realmente acontece segundo o a média dos valores experimentais.

Uma vez mais procedeu-se, ao cálculo do coeficiente de Pearson, anulando os parâmetros da componente sazonal e desta forma as curvas a apresentar são as presentes na figura 5.16, os valores do coeficiente de correlação e o da média do erro foram respectivamente 0,978 e $111,262 \times 10^{-6}$.

5.4.3.4. MC 2010

À semelhança com o que aconteceu com os modelos anteriores a figura 5.17 é representativa das curvas ajustadas dos valores experimentais medidos nos provetes compensadores de retracção e a sua consequente média.

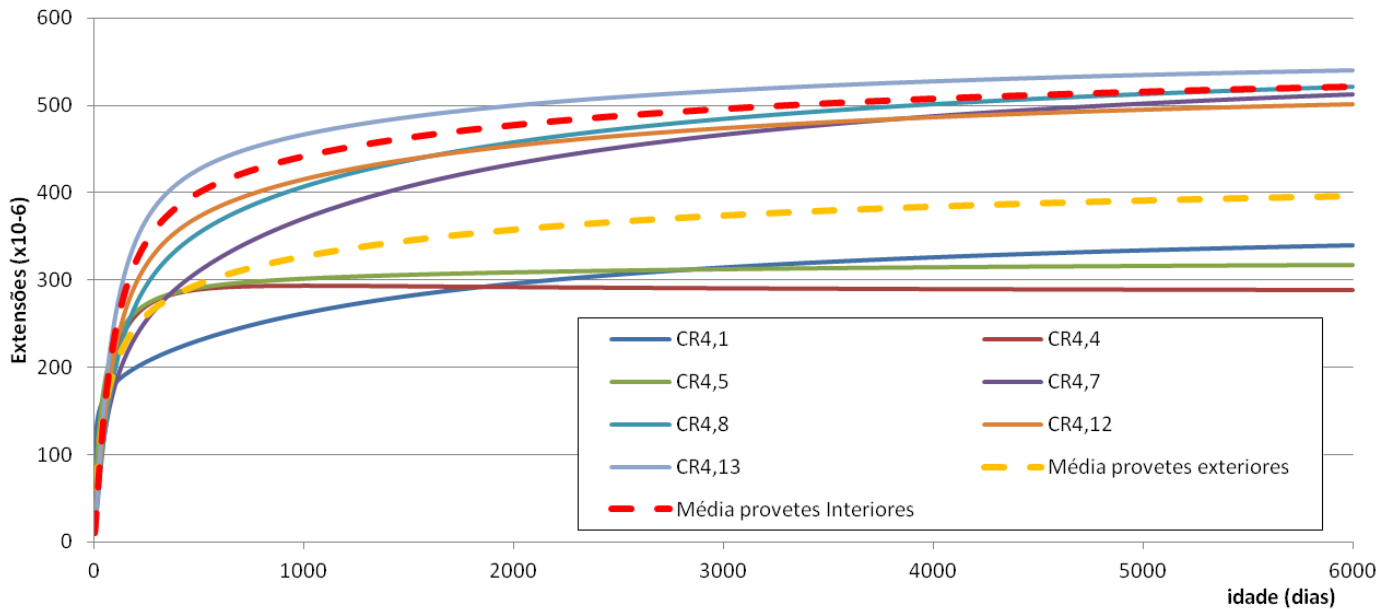


Figura 5.17 – Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 2

Uma vez mais a curva média apresentada na figura 5.17 espelha o comportamento global dos provetes da secção 4.

Utilizando o mesmo método utilizado anteriormente é possível fazer uma comparação com a curva do modelo que deriva do preconizado do MC2010.

Na figura 5.18 está presente a curva proposta pelo modelo e a curva média, que foi apresentada anteriormente, para se ser possível efectuar uma comparação.

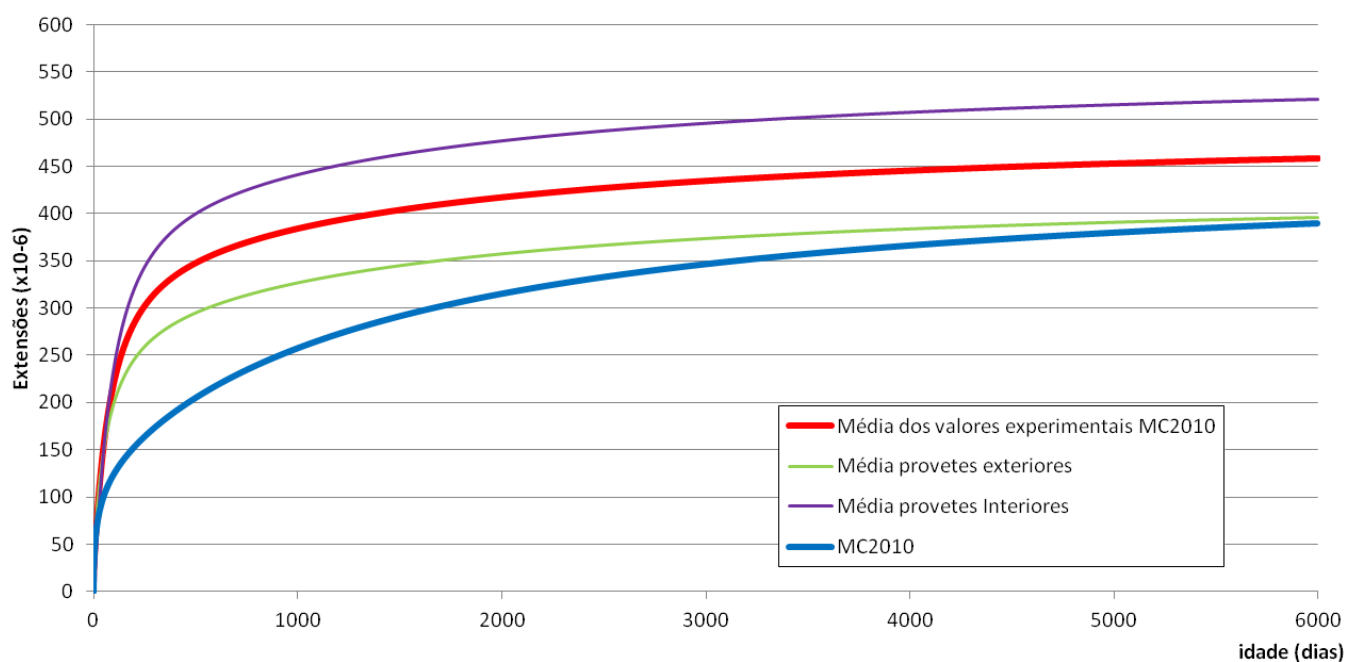


Figura 5.18 – Curva média e curva proposta do MC2010

Foi calculado o coeficiente de Pearson e da média do erro retirando-se a componente sazonal às curvas estimadas anulando-se os valores dos coeficiente A1 e A2, tal como é visível na figura 5.18.

Desta forma apresenta-se o quadro 5.5.

Modelo de Previsão	ρ	Média do Erro ($\times 10^{-6}$)
MC 2010	0,857	19

Quadro 5.5 – Valor do coeficiente de correlação de Pearson e média do erro

As figuras 5.17 e 5.18 são também representativas das curvas ajustadas ao modelo do MC2010, para ser mais fácil identificar as semelhanças com o modelo teórico, está igualmente presente a curva teórica preconizada pelo Model Code 2010. É visível pelas figuras citadas anteriormente que este modelo consegue uma melhor aproximação aos valores medidos para idades avançadas.

O arranque da curva proposta pelo modelo é menos acelerado comparativamente com a curva experimental e é aqui que reside a maior diferença. No entanto verifica-se também

que, a curva proposta pelo modelo demora mais tempo a estabilizar, comparativamente com os outros modelos. Visualmente podemos dizer que a curva experimental estabiliza após 5 anos, a contar desde a data da betonagem, o que significa que a curva do modelo necessita de mais tempo comparativamente com aquilo que a curva experimental mostra.

Apesar deste modelo ser o mais assertivo para betões adultos, os valores que este prevê para fase inicial do fenómeno não são coincidentes com o que realmente acontece para este caso, o que lhe confere um coeficiente de Pearson de 0,857 e um valor de média de erro de $19,472 \times 10^{-6}$, tal como o quadro 5.5 mostra.

5.4.4. Retracção para betão jovem

O estudo do comportamento de estruturas de betão nas primeiras idades é relevante, devido principalmente à utilização de betões de alto desempenho. (Reinhardt *et al.*, 1982).

Desta forma é importante dispor de ferramentas de modelação matemática que permitam prever o desenvolvimento do fenómeno da retracção para betão nas primeiras idades com o intuito de antecipar e se possível evitar algumas anomalias, tais como a fissuração.

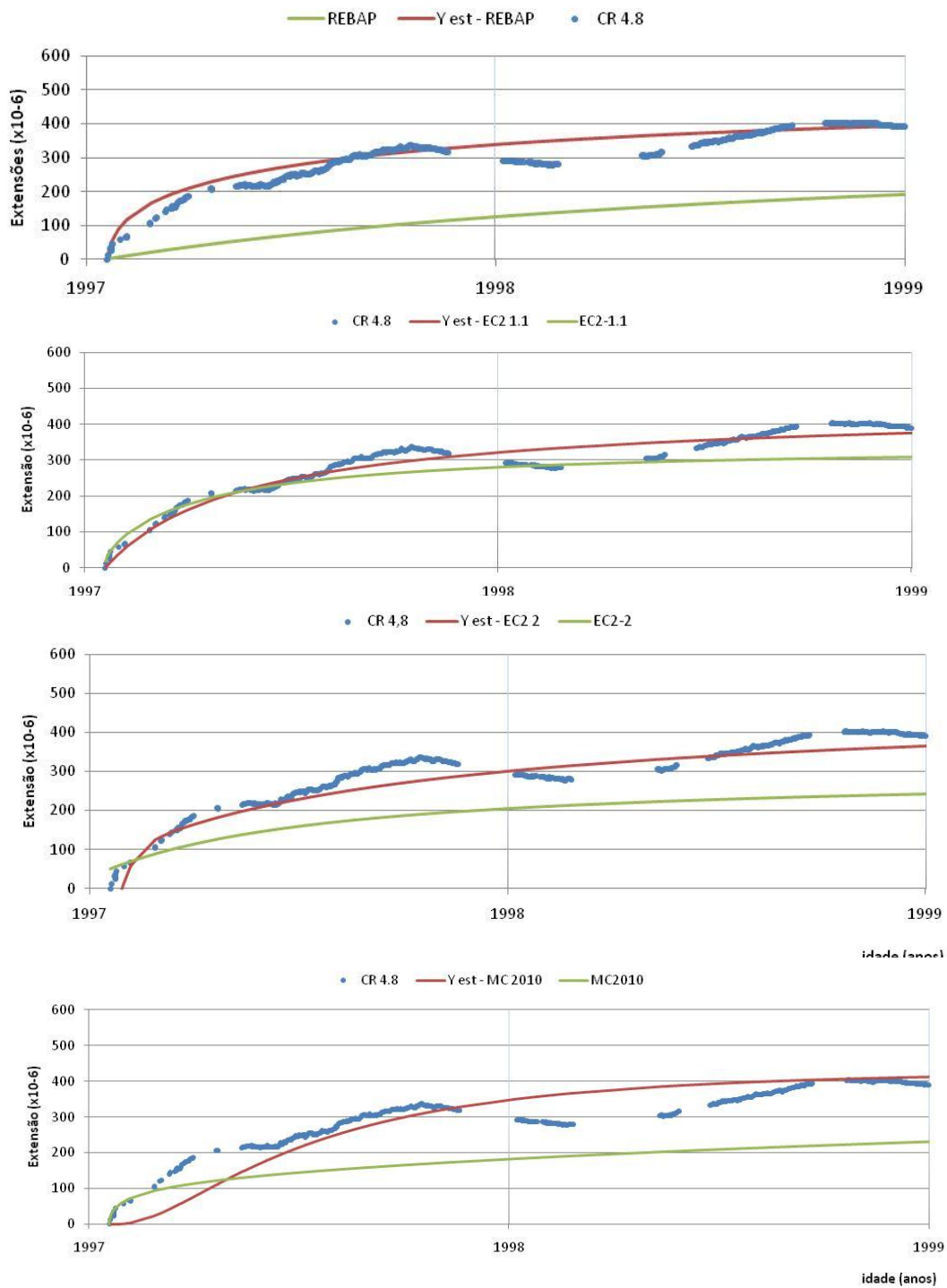
É durante as primeiras idades do betão que as características resistentes e mecânicas se começam a definir. Desta forma este período na vida de uma peça de betão é muito importante pelo que julgou-se útil abordar a temática da retracção nos primeiros anos de vida, neste caso optou-se por fazer a comparação entre os modelos matemáticos e os dois primeiros anos de vida do betão, tal como é visível na figura 5.19.

Foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson com o objectivo de concluir qual dos modelos melhor define o fenómeno para betão jovem.

Os valores obtidos estão presentes no quadro 5.6:

Quadro 5.6 – Valores dos coeficientes de correlação de Pearson para cada modelo para betão jovem

Modelo de Previsão	REBAP	EC2 – 1.1	EC2 – 2	MC 2010
ρ	0,916	0,992	0,965	0,947



Figuras 5.19 – Ponte Miguel Torga. Secção S4. Retracção do provete CR4.8 em obra: valores experimentais, curva ajustada e curvas propostas pelo REBAP, EC2 e MC2010 para betão jovem

O quadro 5.4 mostra um coeficiente de Pearson superior para o modelo do EC2 parte 1.1 e, de facto, visualmente este parece ser o modelo que melhor se aproxima da curva dos valores experimentais, a parte 2 do mesmo modelo consegue ainda assim uma boa aproximação, contudo o mesmo não acontece com os modelos do REBAP e do MC2010 onde as curvas propostas são algo distantes do que na realidade acontece.

5.4.5. Retracção para betão com extensão de retracção estabilizada

A evolução da extensão de retracção é, acentuadamente crescente quando o betão é jovem tendendo a estabilizar após alguns anos, apenas variando de forma sazonal respondendo directamente com a alteração dos factores externos.

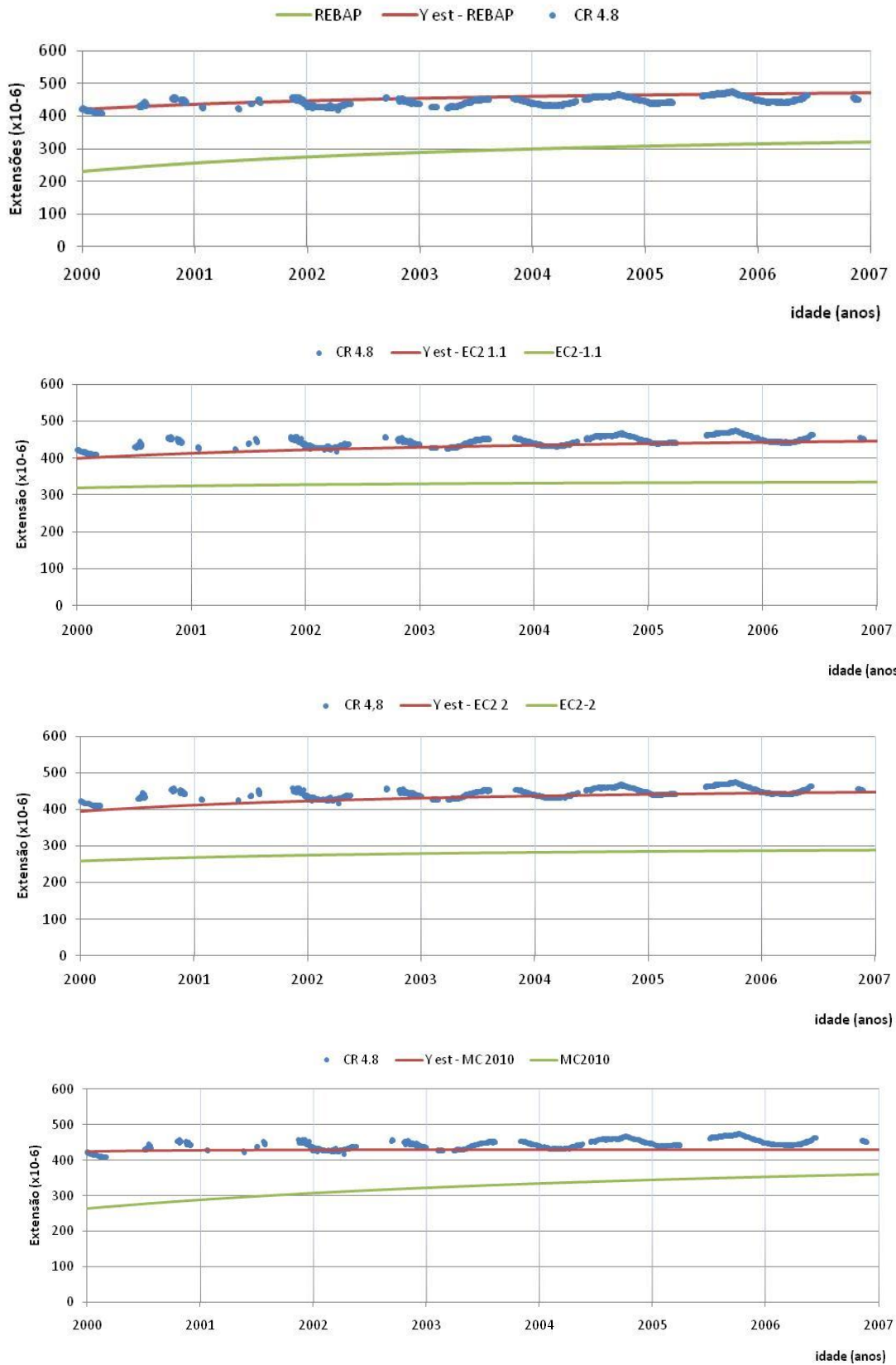
No caso em estudo, a extensão de retracção estabiliza por volta do ano 2002 o que corresponde a 5 anos e será interessante averiguar qual dos modelos é capaz de responder melhor face às extensões medidas, ou seja, qual dos modelos tem a maior capacidade de prever correctamente o fenómeno quando a extensão estabiliza.

Efectuou-se uma análise que consiste na média da diferença dos pontos entre a linha proposta pelo modelo e a linha estimada. O modelo que apresentar o resultado mais inferior será o que melhor consegue antecipar os valores experimentais, é ainda de referir que o valor da curva estimada será desprovido da sua componente sazonal, desta forma a comparação será mais fidedigna.

Assim obteve-se o quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Valores da média das diferenças das extensões entre os pontos da curva teórica e os pontos da curva estimada

Modelo de Previsão	REBAP	EC2 – 1.1	EC2 – 2	MC 2010
Média das Diferenças $\epsilon \times 10^{-6}$	162	102	154	97



Figuras 5.20 – Ponte Miguel Torga. Secção S4. Retracção do provete CR4.8 em obra: valores experimentais, curva ajustada a esses valores e curva teórica do REBAP, EC2 e MC2010 para betão com extensão de retracção estável

Pelos valores apresentados no quadro 5.5 e pelas figuras 5.20, conclui-se que a longo prazo existem dois modelos que melhor conseguem definir a curva experimental, são eles o EC2 – 1.1 e o MC2010, sendo que é o EC2 – 1.1 que mais próximo fica dos valores medidos. Os outros dois, REBAP e EC2 – 2 afastam-se mais dos valores experimentais, facto que se reflecte no valor da média da diferença, exposta no quadro 5.5.

5.5. Retracção observada na ponte de Angueira

A observação do comportamento estrutural da ponte sobre o rio Angueira é também uma das actividades da competência do Núcleo de Observação de Estruturas do LNEC. Desde 1993, através de um protocolo estabelecido entre o LNEC e a Estradas de Portugal.

Aquando do final da construção foram realizados ensaios de recepção em Abril de 1994 e a observação estrutural da obra foi continuada com campanhas de observação trimestrais até 2000, mais tarde, entre 2001 e 2005, essas campanhas passaram a ser semestrais e já após o ano 2006 as campanhas passaram a ser espaçadas de 3 em 3 anos.

5.5.1. Descrição da estrutura

Esta é uma obra de arte situada em Trás-os-Montes, mais precisamente no distrito de Bragança, na estrada nacional 219 ligando os concelhos de Mogadouro e Vimioso.

Estruturalmente trata-se de uma ponte de betão armado pré-esforçado com um comprimento total de 230m dividido por três tramos, um tramo central com 115m e os tramos extremos com 57,5m cada um. A largura total do tabuleiro é de 11,8m dos quais 9 são ocupados para a faixa de rodagem. A secção transversal do tabuleiro é composta por um caixão monocelular com almas verticais com altura variável entre 7m sobre os pilares e 2,5m no meio vão central e nas zonas contíguas aos encontros. A espessura da laje varia conforme se está nas secções junto aos pilares, 1,10m, ou nas secções de menor altura, 0,2m.

As fundações, são directas e os pilares possuem uma secção rectangular oca de 5,50m por 4,60m. A altura dos pilares, medida desde a face inferior do tabuleiro até à face superior das sapatas é de 42m.

Todo o tabuleiro foi construído pelo método dos avanços sucessivos em consola, partindo do coroamento dos pilares, tendo o fecho do tramo central sido efectuado no princípio de 1994.

A figura 5.21 representa a obra em questão.



Figura 5.21 – Vista geral da ponte sobre o rio Angueira.

5.5.2. Descrição da instrumentação

A instrumentação da ponte foi efectuada de acordo com o plano de observação previamente elaborado. Os instrumentos, extensómetros de corda vibrante e termómetros, estão localizados em quatro secções da ponte, junto ao pilar P2, tanto do lado de Vimioso como do lado de Mogadouro, no meio vão central e a um quarto do meio vão central do lado de Vimioso. Nestas secções realizaram-se, também, provetes compensadores termo-higrométricos e de fluência que permitam caracterizar o comportamento do betão ao longo do tempo. Foram ainda instaladas bases de nivelamento ao longo do tabuleiro, bases de telescópio nos encontros para medição da abertura das juntas de dilatação e também bases de clinómetro nos encontros, na base e no topo dos pilares.

Na figura 5.22 é possível visualizar a localização das secções instrumentadas.

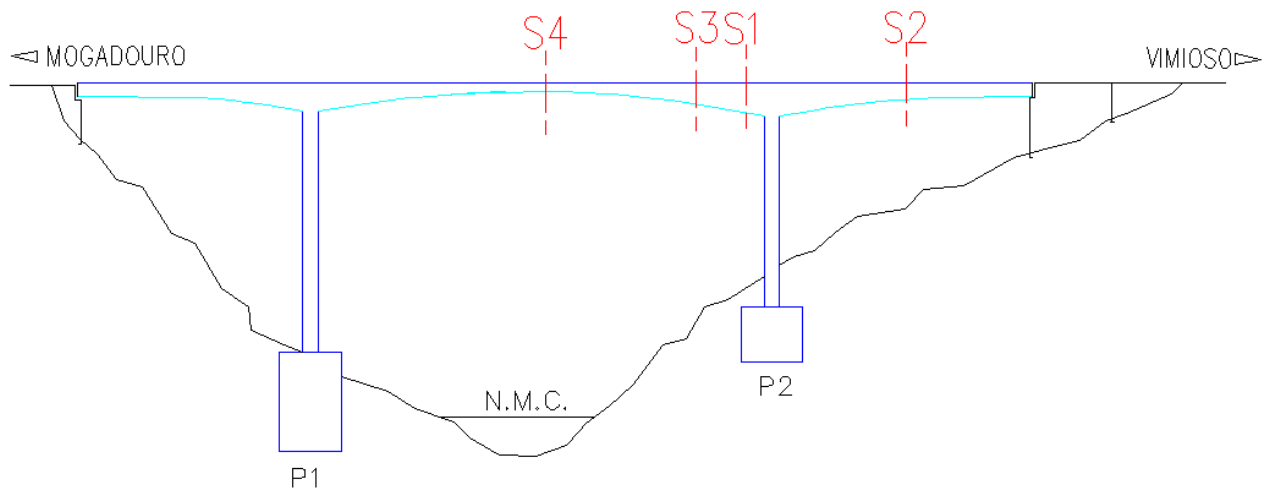


Figura 5.22 – Ponte sobre o rio Angueira. Localização das secções instrumentadas

5.5.3. Comparação dos resultados experimentais com os modelos de previsão

O estudo deste fenómeno é elaborado por intermédio da medição de extensões em provetes compensadores de retracção que não estão sujeitos a quaisquer tipos de forças exteriores, devendo-se a sua deformação exclusivamente a variações de temperatura e ao efeito da retracção.

Os valores medidos foram processados de acordo com o procedimento anteriormente descrito. Contudo nesta obra optou-se por utilizar todas as secções instrumentadas da ponte, fazendo para cada modelo uma curva capaz de expressar o comportamento global da estrutura que tem origem na média das extensões nas diferentes secções.

Para a elaboração dessas curvas médias foi necessário ter em atenção as datas de betonagem. Como seria de esperar as secções não foram betonadas à mesma data e desta forma, tomando em linha de conta um referencial de data seria impossível fazer uma comparação, assim, o referencial utilizado foi a idade do betão em dias.

A figura 5.23 mostra as extensões de retracção obtidas nos diferentes compensadores de retracção.

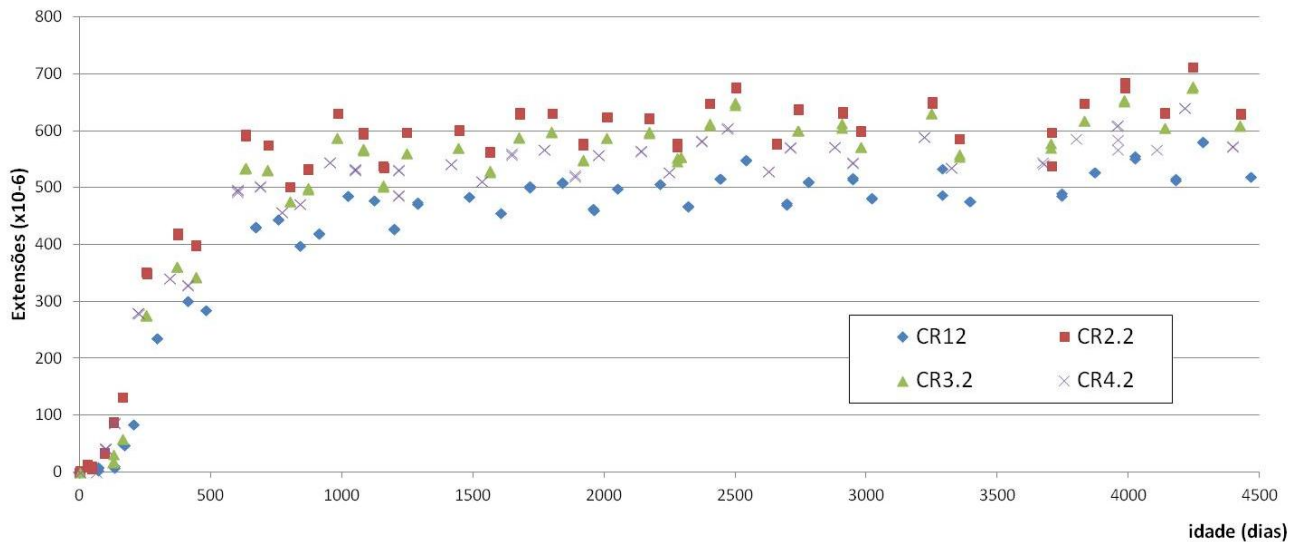


Figura 5.23 – Extensões de retracção nas secções S1, S2, S3 e S4.

O tratamento dos pontos da figura 5.23 é semelhante ao que aconteceu no exemplo anterior relativo à ponte da Régua, ou seja, por intermédio de uma regressão não linear foi possível obter as curvas representativas dos pontos anteriores para cada modelo.

5.5.3.1. REBAP

A figura 5.24 representa as curvas ajustadas por regressão não linear para os diferentes provetes de retracção para este modelo do REBAP.

Com o intuito de obter uma melhor comparação, os valores dos coeficiente A1 e A2, explicados anteriormente, foram anulados com a intenção de anular a componente sazonal e assim ser possível efectuar-se uma comparação mais real com o modelo proposto pelos regulamentos.

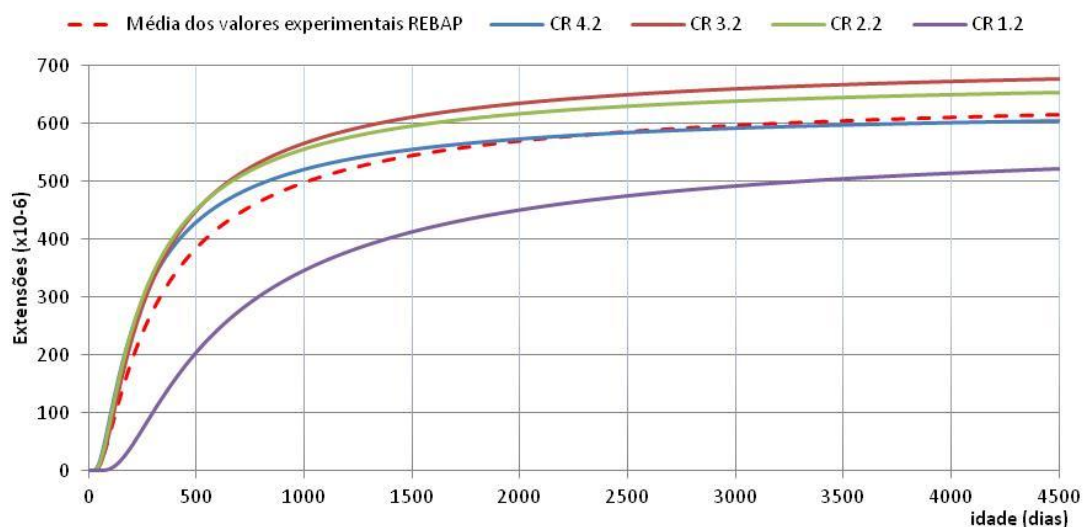


Figura 5.24 – Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o REBAP

Tal como a figura 5.24 mostra é possível observar a curva média, que é resultado da média dos valores de extensão de retracção de todos os outros provetes e tem o intuito de transparecer o comportamento geral dos provetes da obra para assim ser possível comparar com a curva proposta pelo modelo.

Esta forma é uma forma muito expedita de comparar os valores medidos *in-situ* com os valores teóricos, ora veja-se a figura 5.25:

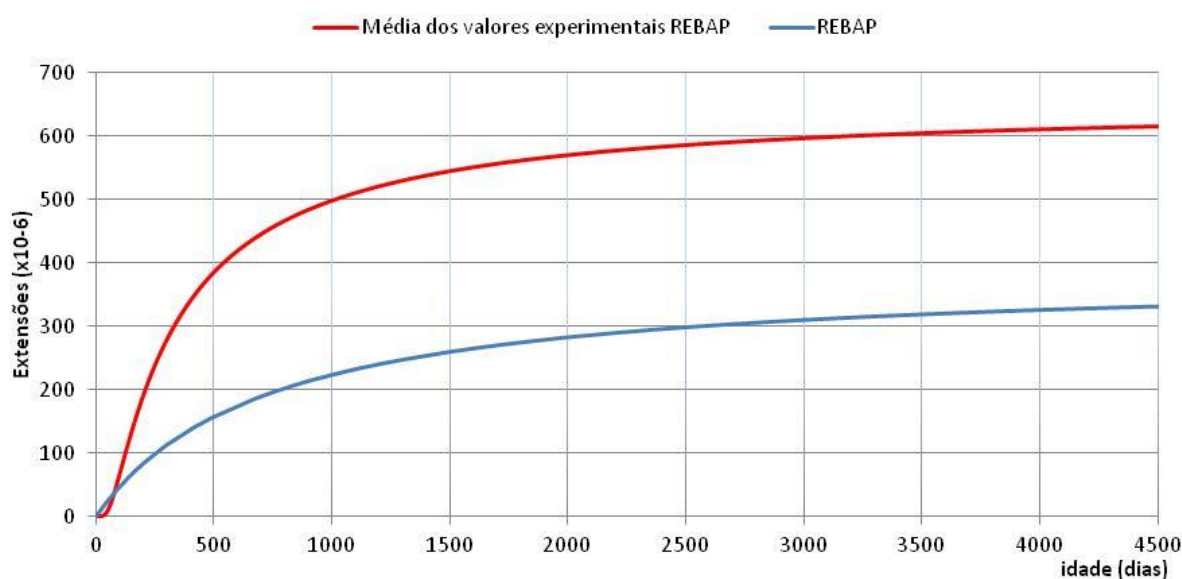


Figura 5.25 – Curva média e curva proposta do REBAP

O modelo do REBAP apresenta, para os valores medidos, um crescimento muito rápido para um curto período de tempo após a betonagem e os valores obtidos teoricamente apontam um crescimento menos rápido que atinge a estabilidade cerca de 2500 dias após a betonagem um pouco à semelhança dos valores medidos cuja estabilidade é atingida igualmente cerca de 2500 dias após a betonagem.

Para as condições introduzidas este modelo apresenta valores abaixo dos valores realmente obtidos. O modelo teórico preconiza valores máximos estáveis na ordem dos 336×10^{-6} , no entanto, os valores experimentalmente obtidos, já em fase estável, são pouco superiores a 600×10^{-6} , valores estes que se propagam de forma mais ou menos estável ao longo do tempo.

Nestas condições o coeficiente de Pearson assumiu o valor de 0,974 e o valor da média do erro entre o valor médio e o valor teórico que neste caso foi de $262,58 \times 10^{-6}$.

EC2 - Parte 1.1 - Regras gerais e regras para edifícios

A figura 5.18 é representativa da curva ajustada por regressão não linear dos valores medidos experimentalmente nos diferentes provetes compensadores de retracção.

Comparativamente com a figura 5.25 a que se segue, figura 5.26. é ligeiramente diferente pois a regressão possui diferentes coeficientes por se tratar de um outro modelo de previsão, nomeadamente o Eurocódigo2.

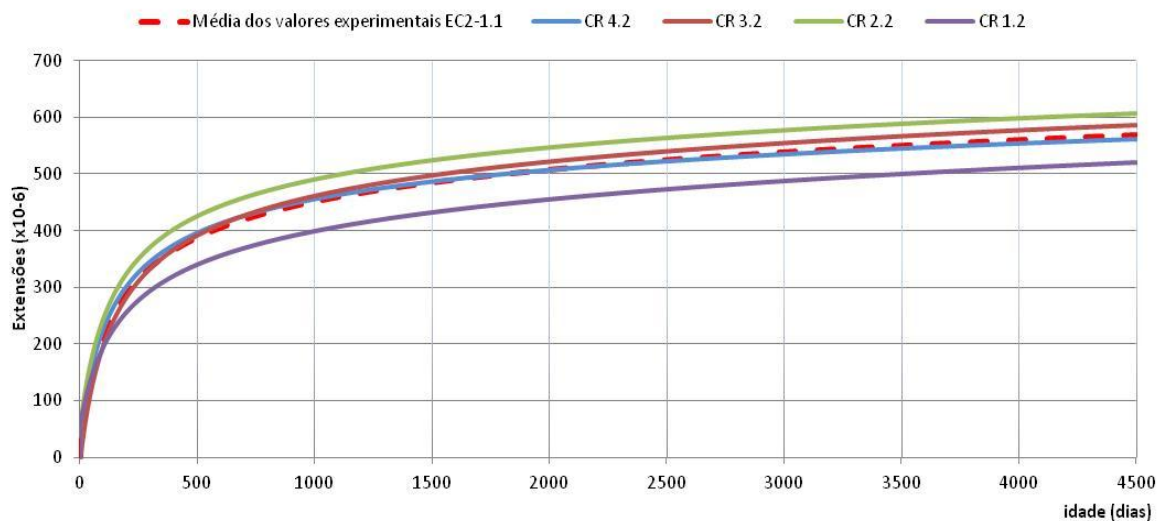


Figura 5.26 – Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 1.1

A curva média apresentada na figura 5.25 é, à imagem da figura 5.26, bastante ilustrativa do comportamento geral dos provetes da estrutura.

Utilizando o mesmo método utilizado anteriormente é possível fazer uma comparação com a curva teórica. Na figura 5.27 está presente a curva teórica e a curva média para ser possível efectuar-se uma comparação.

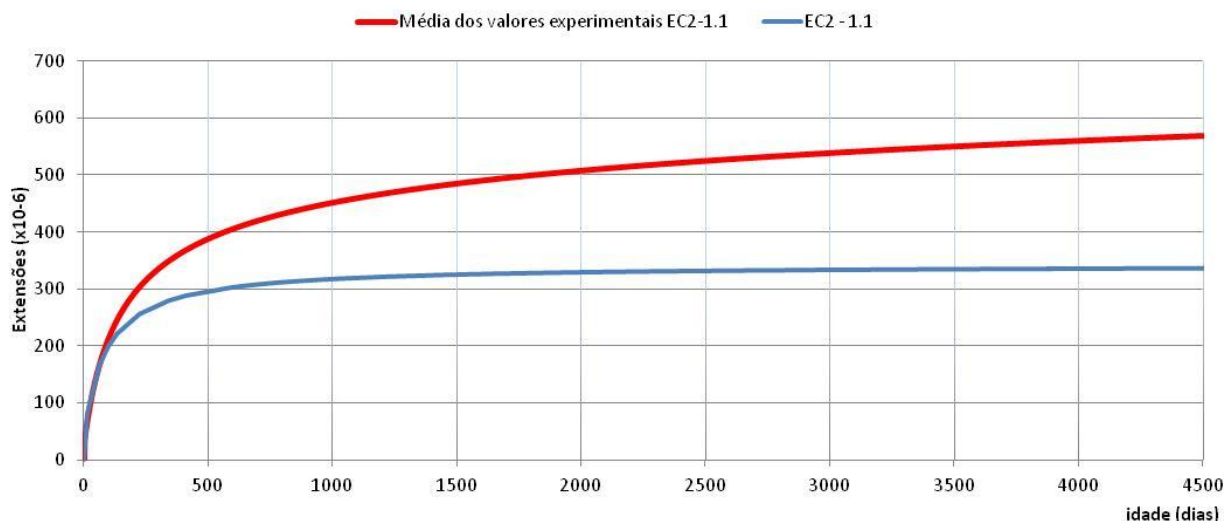


Figura 5.27 – Curva média e curva proposta do EC2 – 1.1

Através da figura 5.27 facilmente se percebe que os valores medidos experimentalmente representados pela linha vermelha mostram-se muito semelhantes ao que a curva teórica nos primeiros dias após a betonagem.

A curva experimental evidencia um crescimento acentuado na fase inicial que vai, progressivamente, diminuindo. A curva proposta pelo modelo apresenta um crescimento igualmente acentuado nos primeiros dias após a betonagem, estabilizando a partir dos 1500 dias.

O valor máximo apontado pelo modelo não é de cerca de 335×10^{-6} enquanto que os valores experimentais apontam para de valores superiores a 500×10^{-6} .

Com o objectivo de fornecer a esta comparação alguma base estatística para comparar os resultados da extensão de retracção de forma mais eficaz, procedeu-se, uma vez mais, ao cálculo do coeficiente de Pearson e ao valor da média do erro entre o valor médio e o valor teórico. Os valores obtidos foram respectivamente 0,937 e $169,98 \times 10^{-6}$.

5.5.3.2. EC2 – Parte 2 - Pontes

Uma vez mais e sabendo que o modelo descrito na parte 2 do EC2 é um modelo que foi elaborado a pensar especialmente em pontes, esperava-se que os resultados para este modelo fossem bastante superiores aos apresentados nos outros modelos.

Tal como algumas das figuras anteriores a figura 5.28 representa as curvas ajustadas dos valores experimentais medidos nos provetes compensadores de retracção e a sua consequente média.

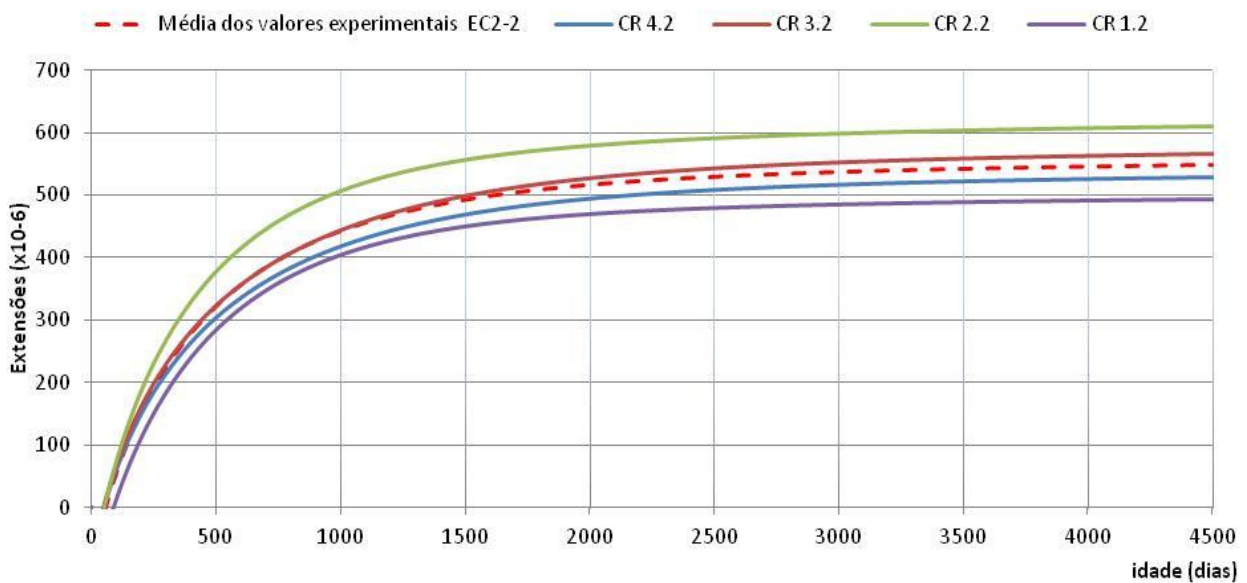


Figura 5.28 – Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o EC2 – 2

Utilizando o mesmo método utilizado anteriormente é possível fazer uma comparação com a curva do modelo. Na figura 5.29 está presente a curva do modelo e a curva média para ser possível efectuar uma comparação.

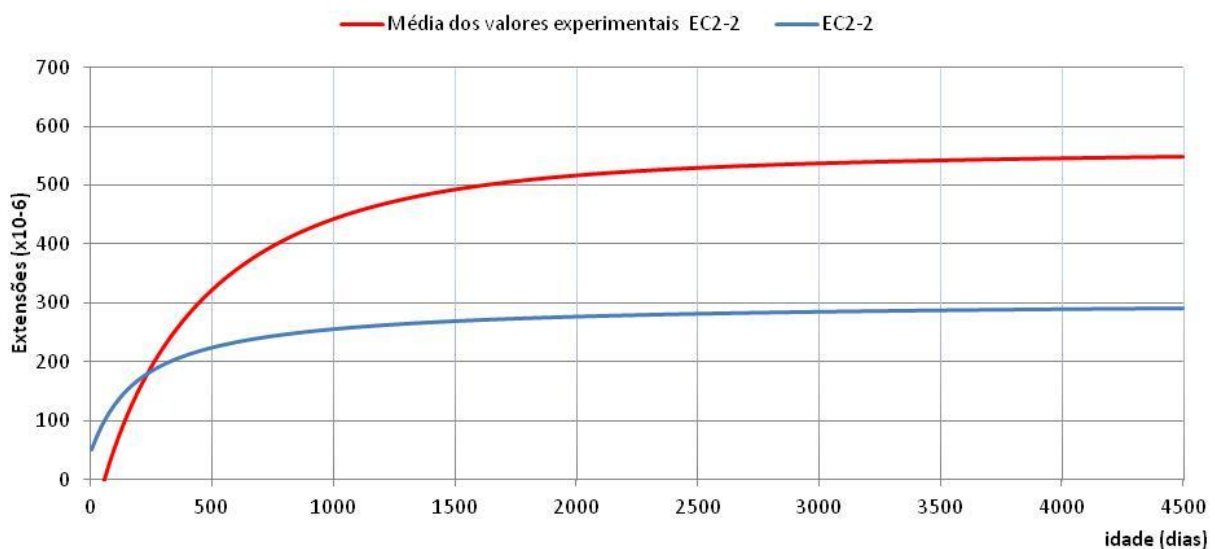


Figura 5.29 – Curva média e curva proposta do EC2 – 2

É evidente que os valores medidos são superiores aos valores previstos pelo modelo de retracção do EC2 - 2. Com efeito os valores de extensão medidos tendem para valores

superiores a 500×10^{-6} enquanto que os valores apontados pela curva do modelo apresentam extensões inferiores a 250×10^{-6} .

É visível a estabilização dos valores medidos experimentalmente por volta dos 2000 dias em consonância com aquilo que a curva do modelo aponta.

O crescimento inicial dos valores da extensão são diferentes, o modelo teórico aponta para um crescimento menos rápido àquele que realmente acontece e que se pode ver pela curva da média.

Procedeu-se, uma vez mais, ao cálculo do coeficiente de Pearson e da média do erro. Tendo-se obtido os valores de 0,995 e $256,53 \times 10^{-6}$, respectivamente.

5.5.3.3. MC 2010

À semelhança com o que aconteceu com os modelos anteriores a figura 5.30 é representativa das curvas ajustadas dos valores experimentais medidos nos provetes compensadores de retracção e a sua consequente média.

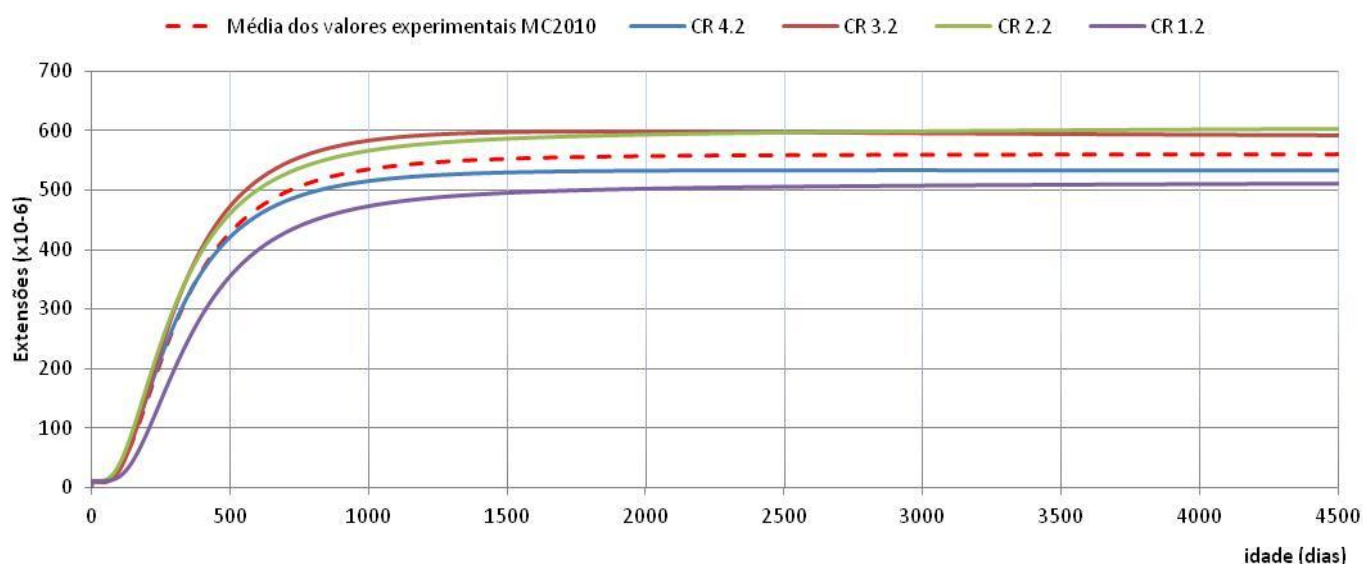


Figura 5.30 – Curvas ajustadas às extensões de retracção segundo o MC2010

Uma vez mais a curva média apresentada na figura 5.30 espelha o comportamento global dos provetes.

Utilizando o mesmo método utilizado anteriormente é possível fazer uma comparação com a curva do modelo que deriva do preconizado do MC2010.

Na figura 5.31 está presente a curva proposta pelo modelo e a curva média, que foi apresentada anteriormente, para se ser possível efectuar uma comparação.

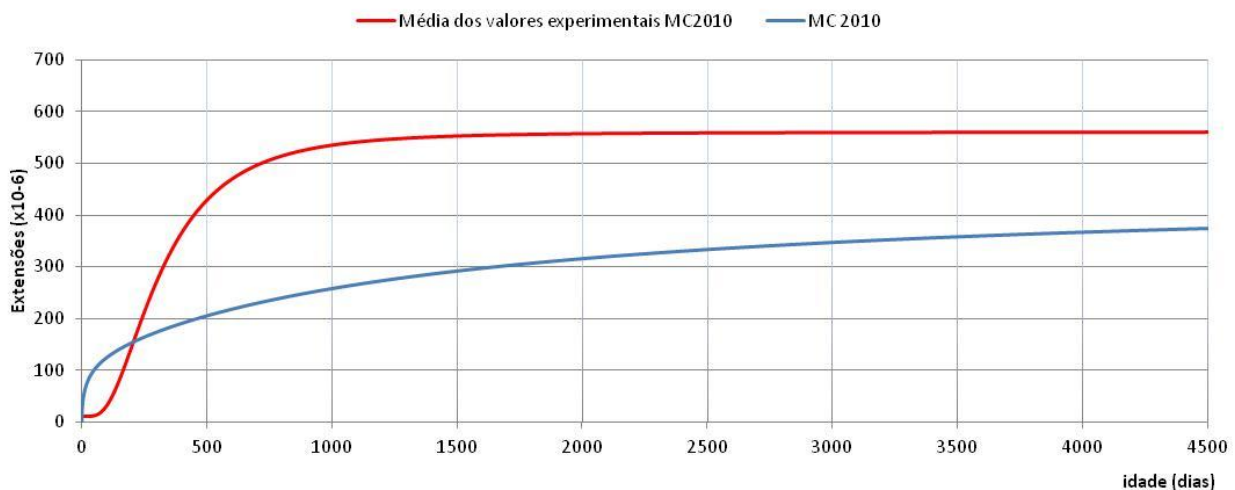


Figura 5.31 – Curva média e curva proposta do MC2010

Tal como nos modelos anteriores os valores medidos são superiores aos valores propostos pelo modelo.

Com efeito os valores de extensão medidos apresentam, para betões adultos, valores entre 500×10^{-6} e 600×10^{-6} no entanto os valores apontados pela curva teórica apresentam extensões menores próximas dos 400×10^{-6} .

A estabilização dos valores medidos experimentalmente ocorre por volta dos 2000 dias em contrapartida teoricamente acontece e que a curva teórica aponta, os valores têm uma tendência crescente contínua, apesar de menos acentuada para betões mais adultos.

O crescimento inicial dos valores da extensão são diferentes, o modelo teórico aponta para um crescimento mais rápido àquele que realmente acontece representado pela curva da média.

O valor do coeficiente de Pearson obtido para este modelo foi de 0,844, menor relativamente aos modelos apresentados anteriormente e o valor da média dos erros obtido foi de $208,72 \times 10^{-6}$.

5.6. Considerações Finais

Os resultados que foram utilizados nesta dissertação são dados obtidos pela observação da secção 4 da ponte Miguel Torga na Régua e do comportamento global dos provetes compensadores de retracção da ponte sobre o rio Angueira, tal como foi referido anteriormente.

É difícil generalizar as conclusões obtidas neste trabalho para qualquer tipo de estrutura e para qualquer secção. As conclusões que se obtiveram dizem apenas respeito à secções em estudo para o tipo de condições presentes naquele determinado local e período de tempo.

5.6.1. Ponte Miguel Torga

De uma forma geral para a situação em estudo, relativa à secção 4 da ponte Miguel Torga na Régua pode-se dizer que é o modelo do EC2 – 1.1 que define com maior precisão o fenómeno da retracção. Apesar de não ser o modelo cuja média do erro é a menor ($155,073 \times 10^{-6}$), este modelo apresenta o coeficiente mais próximo da unidade (0,982) e como se pode ver nas figuras 5.13 e 5.14 este modelo é bastante representativo da realidade. O modelo do REBAP é aquele que apresenta o valor de coeficiente de Pearson mais reduzido (0,851) e no caso do modelo do Eurocódigo2 - 2 é igualmente notório que o valor do coeficiente de Pearson é bem mais reduzido em comparação com os modelos do EC2, 0,857, o que significa que o andamento da curva teórica do MC2010 e do REBAP face aos valores medidos é bastante diferente em comparação com os outros modelos do EC2, apesar de apresentar um valor de média do erro bastante razoável.

Aparentemente o modelo do MC2010 mostra uma pobre precisão relativamente ao andamento da sua curva proposta, figura 5.18, e não representa uma mais-valia ao anterior modelo do EC2-1.1, excepto para tempo infinito.

É portanto o modelo do EC2-1.1 que melhor define o fenómeno da retracção para o caso em estudo, é ainda importante referir que para betões jovens a diferença entre os modelos não é significativa, para betões cuja idade é a suficiente para se identificar uma estabilização do valor da extensão é francamente notório que para a secção e provete em estudo é o modelo do Model Code 2010 que melhor expressa o valor real da extensão por retracção.

5.6.2. Ponte sobre o rio Angueira

Uma vez mais com o objectivo de fornecer à comparação alguma base estatística, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de Pearson e da média do erro.

Elaborou-se o quadro 5.8 que demonstra para cada modelo o valor do coeficiente de Pearson bem como a média do erro.

Quadro 5.8 – Valores do coeficiente de Pearson (ρ) e média do erro para REBAP, EC2 – 1.1, EC2 – 2, MC 2010 para a ponte sobre o rio Angueira

Modelo de Previsão	ρ	Média do Erro ($\times 10^{-6}$)
REBAP	0,974	262
EC2 – 1.1	0,937	169
EC2 - 2	0,995	256
MC 2010	0,844	208

Para a situação em estudo, relativa às secções instrumentadas da ponte sobre o rio Angueira no Distrito de Bragança pode-se dizer que é o modelo do EC2 – 1.1, uma vez mais à semelhança com a ponte da Régua, que define com maior precisão o fenómeno da retracção. Apesar de não ser o modelo cujo coeficiente é o mais próximo da unidade (0,937) apresenta a média do erro mais reduzida e como se pode ver na figura 5.19 este modelo em teoria é bastante representativo da realidade. O modelo do REBAP é aquele que apresenta uma diferença entre valores medidos e teóricos maior ($262,58 \times 10^{-6}$), e no caso do modelo do Eurocódigo2 - 2 é notório que o valor do coeficiente de Pearson é mais elevado em comparação com os outros modelos o que significa que o andamento da curva teórica do MC2010 face aos valores medidos é bastante semelhante em comparação com os outros modelos, contudo este modelo apresenta uma média de erro bastante elevada de $256,53 \times 10^{-6}$.

De uma forma generalizada pode-se dizer que é o modelo do EC2-1.1 que melhor prevê o fenómeno da retracção para o caso em estudo da ponte sobre o rio Angueira.

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1. Considerações finais

A retracção do betão depende de diversos factores intrínsecos e extrínsecos que dificultam a sua previsão. Entre esses factores incluem-se, por um lado, as propriedades do cimento, dos inertes e da própria água, a dosagem de cimento, o teor em água da amassadura e o período de cura, e, por outro lado, a geometria da peça e as condições ambientais.

À incerteza associada a cada factor acresce a significativa evolução tecnológica que se tem vindo a verificar, nomeadamente no desempenho dos betões e nos processos construtivos, tornando necessária a continuação do estudo deste fenómeno, nas suas diversas vertentes, assumindo particular relevo a experimental. Os avanços do conhecimento neste domínio reflectem-se na evolução da regulamentação, estando-se actualmente numa fase crítica neste domínio, uma vez que está iminente a passagem de uma regulamentação nacional, o REBAP de 1983, para uma regulamentação europeia, o EC2, tendo a fib publicado muito recentemente uma nova proposta de código, o MC2010, que se perspectiva como base de uma futura revisão deste mesmo EC2.

Neste contexto, pareceu oportuno realizar um estudo visando a percepção do impacto que estas alterações regulamentares terão na previsão da retracção. Com este objectivo, após uma revisão da forma como se desenvolve a retracção, bem como dos factores que a influenciam e de uma breve descrição dos modelos propostos nos documentos referidos, procedeu-se a uma comparação entre eles com o objectivo de perceber como e de que forma cada modelo reage a uma variação de cada factor. Posteriormente foi feita uma comparação com os resultados experimentais, utilizando os dados de duas pontes observadas pelo NOE, a ponte Miguel Torga na Régua e a ponte sobre o rio Angueira no distrito de Bragança.

A comparação entre os modelos de retracção considerados permitiu constatar que, a longo prazo, o modelo do MC2010 que é o que estima as maiores extensões. Verifica-se que,

nestas circunstâncias, os valores previstos pelo EC2-1.1 são superiores aos estimados pelos restantes modelos.

Constatou-se também que os modelos do EC2 e do MC2010 estabilizam a partir dos 2,5 anos de idade, enquanto o modelo do REBAP estabiliza apenas a partir dos 10 anos.

Quanto à forma como se processa o fenómeno, verificou-se que os modelos do EC2-2 e do EC2-1.1 são os que evidenciam uma maior velocidade inicial, sendo o modelo do REBAP o que apresenta um desenvolvimento mais lento.

A partir da análise paramétrica que avaliou a sensibilidade dos modelos de previsão de retracção em relação aos diversos parâmetros pode ser observado que:

- Entre os vários modelos regulamentares analisados a humidade relativa é dos factores mais importantes. O andamento das curvas dos diversos modelos, é semelhante, contudo é possível observar que o modelo mais sensível ao aumento da humidade é o preconizado pela parte 2 do EC2, referente a pontes. Com efeito, este modelo estima valores de extensão superiores para humidades relativas situadas acima dos 60%. No que diz respeito aos modelos em estudo, o andamento das curvas é semelhante e é o modelo do EC2 – 2 que prevê valores superiores face aos restantes que antecipam valores menores.
- Relativamente à temperatura, os modelos não consideram a influência deste factor, embora a variação da temperatura influencie as extensões obtidas em obra ou de forma experimental. Apenas o modelo do REBAP considera a influência da temperatura, através da função $\beta_s(t)$, figura 3.2, cujos valores representados no gráfico exprimem a evolução da função para uma temperatura ambiente de cerca de 20°C.
- Alterando a classe de resistência, todos os modelos demonstram mudanças com excepção do REBAP, que é insensível à variação do valor de f_{ck} . É possível observar na figura 4.6 o comportamento que cada modelo tem perante a variação do valor de f_{cm} . O modelo do MC2010 é aquele que apresenta valores mais elevados, seguido por ordem decrescente pelos EC2 – 1.1, EC2 – 2 e REBAP. Para betões de f_{cm} igual a 48 MPa ($f_{ck}=40\text{MPa}$) os valores de extensão dos modelos referentes à parte 1.1 e parte 2 do EC2 são coincidentes. Este parâmetro é importante para o fenómeno da retracção pois classes de resistência distintas, são um factor importante para as

relações de água/cimento e assim influenciam directamente os valores finais de retracção.

A comparação com os resultados experimentais revelou-se bastante útil na medida em que foi possível perceber de que forma e com que precisão cada modelo é capaz de prever o fenómeno.

Para a ponte Miguel Torga na Régua, o modelo da parte 1.1 do EC2 é o que melhor prevê os resultados do fenómeno da retracção. Para o caso de betões jovens a diferença entre os modelos não é muito significativa, no entanto, para betões cuja idade é a suficiente para se identificar uma estabilização do valor da extensão é francamente notório que para a secção e provete em estudo é o modelo do Model Code 2010 que melhor expressa o valor real da extensão por retracção.

Para a ponte de Angueira, é uma vez mais, o modelo do EC2 -1.1 que melhor antecipa os valores da extensão de retracção. É este modelo do que apresenta uma melhor aproximação aos valores medidos, apesar do valor do coeficiente de Pearson não ser o maior, a média do erro é bastante reduzida comparativamente com os outros modelos.

6.2. Perspectivas futuras

Na sequência do trabalho realizado surgiram algumas questões cujo esclarecimento se afigura interessante e que poderão ser objecto de estudos futuros:

- A realização de um maior número de ensaios com compensadores de retracção, tanto para betões correntes como para betões especiais, contribuindo, assim, para uma caracterização mais completa do fenómeno da retracção;
- Seria igualmente interessante estender este tipo de tratamento de dados a mais pontes e a mais provetes em diversos locais e tentar encontrar alguma relação entre a informação tratada. Ao se abranger este tipo de tratamento de dados a outras obras, procura-se tornar o fenómeno mais claro e com isso permitir uma melhor caracterização dos diversos factores que condicionam o fenómeno reforçando tendências de comportamento que foram encontradas neste trabalho.

- Uma vez mais seria interessante estender este tipo de metodologia ao estudo de um outro fenómeno, a fluência, que apesar de independente da retracção, este também partilha princípios comuns aos estudados anteriormente.

BIBLIOGRAFIA

- **ACI** (1992) – *Prediction of creep, shrinkage and temperature in concrete structures*, ACI Committee Report ACI 209R-92, ACI Publication SP-76;
- **Bazant, Z. P.** (Edt.) (1988) – *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*, John Wiley & Sons, Inc;
- **Coutinho, A. Sousa** (1974) – *Fabrico e propriedades do betão*, Vol. I-II, LNEC;
- **Coutinho, A. Sousa** (1988) – *Fabrico e propriedades do betão*, Vol. I-II, LNEC;
- **Coutinho, A. Sousa; Gonçalves, Arlindo** (1994) – *Fabrico e propriedades do betão*, Vol. III, LNEC;
- **EC2-1** (1998) – *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios*, NP ENV 1992-1-1:1991, IPQ;
- **EC2-2** (1998) - *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão – Parte 2: Pontes*, NP ENV 1992-2:1998, IPQ;
- **EC2-1** (2005) – *Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1: general rules and rules for buildings, EN 1992-1, CEN*;
- **EC2-2** (2004) – *Eurocode 2: Projecto de estruturas de betão – Parte 2: Pontes*, EN 1992-2, IPQ;
- **Favre, Renaud; Jaccoud, J.-P.; Koprna, M.; Radojicic, A.** (1990) – *Dimensionnement des structures en béton*, Vol. 8, Presses Polytechniques Universitaires Romandes ;
- **Fernandes, J. Almeida ; Santos, Teresa O.** (1995) – *Plano geral de observação da ponte rodoviária da Régua sobre o rio Douro. Relatório 311/95 – NOE, LNEC ;*
- **Garcia, Teresa O.** (2006) – *Retracção do betão em pontes*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, FCT/UNL.
- **Gaspar, M.** – “Projecto de execução da ponte sobre o rio Angueira – EN 219”, 1996;
- **ISO 1920-8**: “Testing of Concrete – Parte 9: Determination of drying shrinkage for samples prepared in the field or in the laboratory”;
- **Muller, H. S.; Pristl, M.** (1993) – “Creep and shrinkage of concrete at variable ambient conditions”, *Fifth RILEM International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete*, Barcelona, pp. 15-26;
- **MC 90** (1991) - *CEB-FIB Model Code 1990 Design Code*, Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford, 1991;

- **MC 2010** (2010) – CEB-FIB Model Code 2010;
- **NP EN 197-1** (2001) – Cimento. Parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. IPQ;
- **NP EN 206-1** (2005) – Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ;
- **REBAP** (1983) – *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*, Decreto-Lei nº 349-C/83, INCM;
- **RILEM TC 107-CSP**: Creep and shrinkage prediction models: Principles of their formation. Recommendation for “Measurement of time-dependent strains of concrete”. In: *Materials and Structures*, Vol. 31, October 1998, pag’s 507-512;
- **Rito, Armando** (1994) – “Ponte rodoviária sobre o rio Douro na Régua – Projecto e Execução”, Lisboa;
- **Rito, Armando** (1995) – “As pontes da Régua e do Varosa e Balsemão no lanço Régua-Reconcos no IP3”, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Nº39, pp. 35-39;
- **Santos, L. Oliveira Santos** – Observação da ponte sobre o rio Angueira, *Betão Estrutural*, 1996, LNEC;
- **Santos, L. Oliveira Santos** (2001) – *Observação e Análise do Comportamento Diferido de Pontes de Betão*, Dissertação de doutoramento, IST;
- **Santos, L. Oliveira Santos; Virtuoso, Francisco; Fernandes, J. Almeida** (2000) – “A variabilidade do comportamento diferido do betão observado in situ”, *Betão Estrutural* 2000, FEUP;
- **Santos, L. Oliveira Santos; Virtuoso, Francisco; Fernandes, J. Almeida** (2001) – “In situ measured creep and shrinkage of concrete bridges”, *6th International Conference on Creep, Shrinkage & Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials - ConCreep 6*, MIT, Cambridge, USA;
- **Santos, L. Oliveira Santos; Virtuoso, Francisco; Fernandes, J. Almeida** (2002) – “Extrapolation of creep and shrinkage of concrete bridges measured in situ”, *Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability, Information Technology*, IABSE Symposium, Melbourne, Australia, 2002;
- **Santos, L. Oliveira Santos; Virtuoso, Francisco; Fernandes, J. Almeida** (2002) – “A variabilidade do comportamento diferido de pontes de betão”, *Encontro Nacional Betão Estrutural 2002*, pp. 425-434, LNEC;

- **Santos, L. Oliveira Santos; Virtuoso, Francisco; Fernandes, J. Almeida** (2004) – “Análise probabilística do comportamento diferido de pontes de betão”, *Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia*, LNEC, 2004;
- **Santos, Teresa O.** (1995) – *Retracção e fluência do betão observadas in situ*, Dissertação de mestrado, IST;
- **Silveira, Paulo** (1993) – A influência das acções térmicas no comportamento de pontes de betão armado e pré-esforçado, Dissertação de doutoramento (elaborada no LNEC), IST.
- **Tsubaki, T.; Nakamura, M.** (2001) – “Evaluation method for data of creep and shrinkage of concrete”, creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials, Proceedings of the 6th International Conference ConCreep 6;
- **Van Beek, A.; Schlangen, E.** (2000) – Simulating the effect of shrinkage on concrete structures, Shrinkage of concrete. Shrinkage 2000, Proceedings of the international RILEM Workshop, Paris.

- ANEXOS -

Anexo A - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP)

Anexo B - Eurocódigo 2 – 1.1 (NP EN 1992-1-1)

Anexo C - Eurocódigo 2 – 2 (NP EN 1992-2)

Anexo D – Model Code 2010 (MC2010)

- Anexo A -

***Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado* (REBAP)**

ANEXO I

Retracção e fluência do betão

1 – Introdução

O presente anexo trata fundamentalmente da quantificação da retracção e da fluência do betão para efeitos do dimensionamento das estruturas. Os valores apresentados são, em princípio, referidos a situações em que as condições termo-higrométricas ambientes são sensivelmente constantes no tempo e as tensões aplicadas ao betão são compressões de valor inferior a 0,4 do valor característico da tensão de rotura por compressão na idade de carregamento. Estes valores podem, porém, ser também aplicados ao caso de tensões de tracção e, tratando-se de compressões, também aos casos em que seja excedido aquele limite de 0,4 da tensão de rotura, desde que o seja durante pouco tempo (por exemplo, em operações de aplicação do pré-esforço).

Os valores indicados devem ser encarados como valores médios, que podem ser utilizados na generalidade das situações previstas no Regulamento. No entanto, caso haja necessidade de efectuar uma análise mais segura, é conveniente aumentar ou diminuir aqueles valores em 20%, conforme for mais desfavorável.

Observe-se, por outro lado, que a retracção e a fluência têm em geral efeitos extremamente reduzidos sobre os estados limites últimos e, conseqüentemente, podem não ser tidos em conta na verificação da segurança em relação àqueles estados limites. Exceptuam-se, naturalmente, certas situações, como, por exemplo, o efeito da fluência sobre a excentricidade do esforço normal, a considerar na encurvadura de pilares. Pelo contrário, os efeitos da fluência e da retracção condicionam significativamente o comportamento das estruturas nas condições de serviço e, portanto, devem ser considerados na verificação da segurança em relação aos estados limites de utilização (deformação e fendilhação).

2 – Retracção

2.1 – Generalidades

A extensão devida à retracção, que se verifica entre as idades t_1 e t_0 do betão, $\hat{\epsilon}_{cs}$ (t_1 , t_0), pode ser determinada pela expressão:

$$\epsilon_{cs}(t, t_0) = \epsilon_{cs0} \times (\beta_s(t) - \beta_s(t_0))$$

em que:

ϵ_{cs0} – valor de referência, que depende das condições higrométricas do ambiente, da consistência do betão fresco e da espessura fictícia do elemento;

$\beta_s(t) - \beta_s(t_0)$ – valores particulares da função $\beta_s(t)$, que exprime a variação do valor da retracção com a idade do betão, e que depende da espessura fictícia do elemento.

Apresentam-se seguidamente dados para a quantificação destes parâmetros.

2.2 – Valor de referência, ϵ_{cs0}

O valor de referência da retracção, ϵ_{cs0} é dado pelo produto:

$$\epsilon_{cs0} = \epsilon_{cs1} \times \eta$$

em que estes factores tornam os valores a seguir indicados.

2.2.1 – Extensão ϵ_{cs1}

Os valores da extensão, ϵ_{cs1} , são definidos no quadro I-I e referem-se a betões de consistência média; devem ser reduzidos de 25% para betões de consistência alta e aumentados de 25% para betões de consistência baixa.

QUADRO I-I	
Retracção do betão	
Valores da Extensão ϵ_{cs1}	
Humidade Relativa do Ambiente	$\epsilon_{cs1} (10^{-6})$
Imersão em água	+100
Alta (90%)	-130
Média (70%)	-320
Baixa (40%)	-520

As consistências do betão são definidas do modo seguinte:

Consistência alta – 40 a 10 graus Vêbê;

Consistência média – 9 a 3 graus Vêbê ou até 4 cm de abaixamento;

Consistência baixa – abaixamento superior a 4 cm.

2.2.2 – Coeficiente η

Os valores do coeficiente η são definidos no quadro I-II em função da espessura fictícia do elemento, h_o .

QUADRO I-II						
Retracção do betão						
Valores do coeficiente η						
Espessura fictícia, h_o (cm)	≤ 5	10	20	40	80	≥ 160
η	1.20	1.05	0.90	0.80	0.75	0.70

Os valores da espessura fictícia são determinados pela expressão:

$$h_0 = \lambda \times \frac{2Ac}{u}$$

em que:

Ac – área da secção transversal do elemento;

u – parte do perímetro da secção transversal do elemento em contacto com o ambiente;

λ – coeficiente dependente das condições higrométricas do ambiente e que toma os seguintes valores:

Imersão em água $\lambda = 30$

Humidade relativa alta (90%) $\lambda = 5$

Humidade relativa média (70%) $\lambda = 1,5$

Humidade relativa baixa (40%)..... $\lambda = 1,0$

O termo $\frac{2Ac}{u}$ designa-se habitualmente por espessura equivalente, h_e .

2.3 – Função $\beta_s(t)$

A função $\beta_s(t)$, que exprime a evolução da retracção com a idade do betão, é representada na figura I-1 para vários valores da espessura fictícia, h_0 .

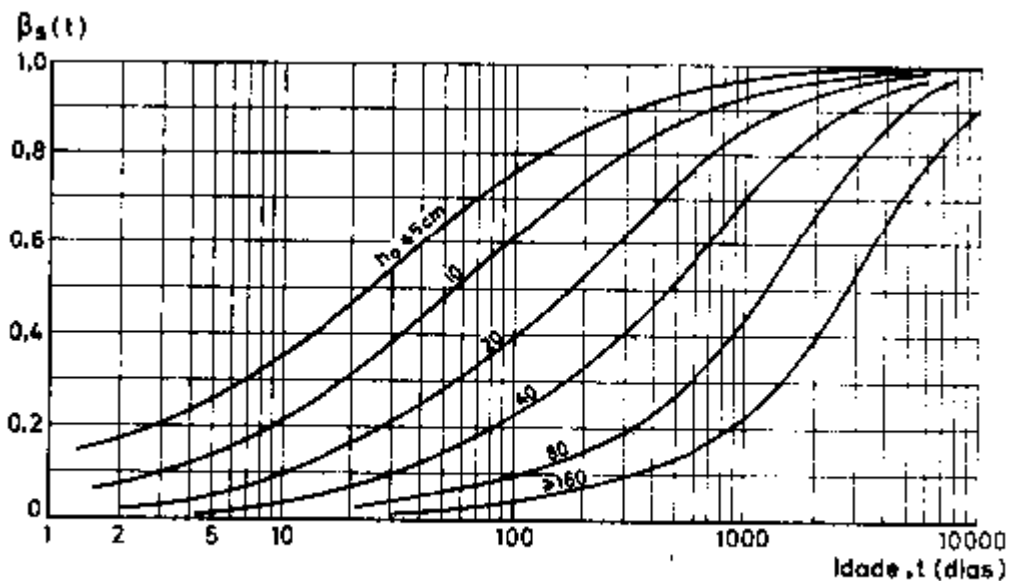


Fig. I-1

Estes elementos estão referidos a uma temperatura ambiente de cerca de 20°C. Para ter em conta as variações de temperatura deve considerar-se, para operar sobre diagramas da figura I-1, em vez da idade real do betão, t , uma idade corrigida, t' , calculada pela expressão:

$$t' = \alpha \frac{\sum_{i=1}^{i=t} (T_i + 10)}{30}$$

em que T_i representa, em graus Celsius, a temperatura média do dia i , e α é um coeficiente que toma os seguintes valores:

- Cimentos de endurecimento corrente ou lento $\alpha = 1$
- Cimentos de endurecimento rápido $\alpha = 2$
- Cimentos de endurecimento rápido e de alta resistência $\alpha = 3$

2.4 – Exemplificação

A fim de permitir apreciar globalmente a evolução da retracção no tempo em face dos elementos anteriormente indicados, apresentam-se na figura I-2 as curvas que traduzem esta variação para alguns valores particulares dos parâmetros considerados: betão de consistência normal, temperatura ambiente de 20°C, humidade relativa ambiente de 75% e de 55% e espessura equivalente a 10 cm, 20 cm e 40 cm.

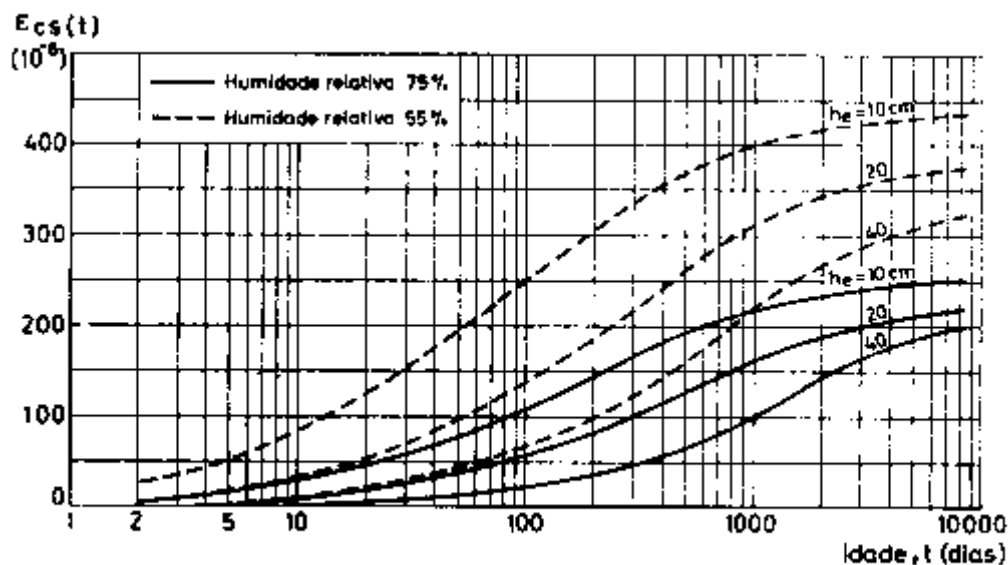


Fig. I-2

- Anexo B -

Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão

Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios

(NP EN 1992-1-1)

3.1.4 Fluência e retracção

(1) P A fluência e a retracção do betão dependem da humidade ambiente, das dimensões do elemento e da composição do betão. A fluência também depende da idade do betão no primeiro carregamento assim como da duração e da intensidade da carga.

(2) O coeficiente de fluência, $\phi(t, t_0)$, é função de E_c , o módulo tangente, que pode ser considerado igual a $1,05 E_{cm}$. Nos casos em que não seja necessária grande precisão, o valor obtido através da Figura 3.1 pode ser considerado como o coeficiente de fluência, desde que o betão não esteja submetido a uma tensão de compressão superior a $0,45f_{ck}$ (t_0) na idade t_0 , idade do betão à data do primeiro carregamento

Nota: Para mais informações, incluindo a evolução da fluência com o tempo, pode utilizar-se o Anexo B.

(3) A deformação do betão por fluência, $\epsilon_{cc}(\infty, t_0)$, na idade $t = \infty$ para uma tensão de compressão constante, σ_c , aplicada na idade do betão t_0 , é dada por:

$$\epsilon_{cc}(\infty, t_0) = \phi(\infty, t_0) \cdot (\sigma_c / E_c) \quad (3.6)$$

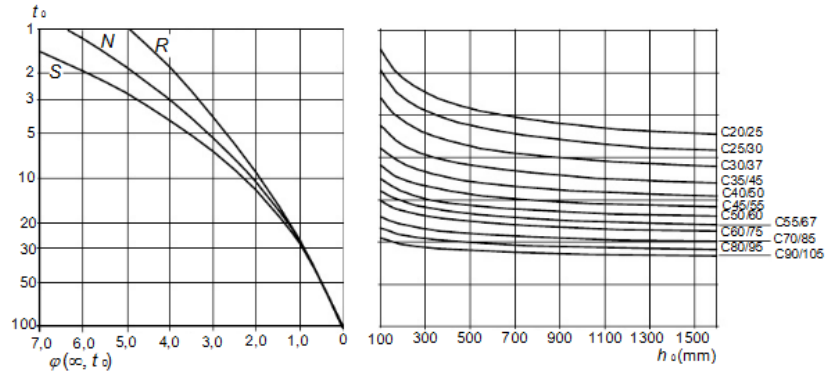
(4) Quando a tensão de compressão do betão na idade t_0 excede o valor $0,45f_{ck}(t_0)$, deve considerar-se a não linearidade da fluência. Uma tensão tão elevada pode ocorrer em resultado de pré-tensão, por exemplo, ao nível dos cabos nos elementos de betão pré-fabricado. Neste caso, o coeficiente teórico de fluência não linear deve ser obtido por:

$$\phi_k(\infty, t_0) = \phi(\infty, t_0) \exp(1,5(k\sigma - 0,45)) \quad (3.7)$$

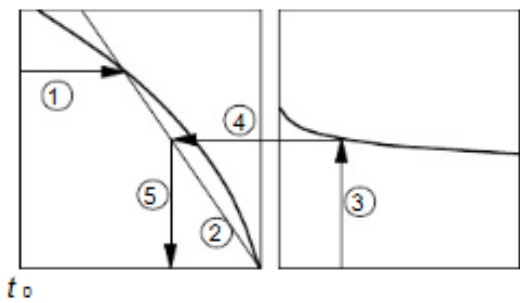
em que:

$\phi_k(\infty, t_0)$ - coeficiente teórico de fluência não linear, que substitui $\phi(\infty, t_0)$

σ - razão tensões-resistências $\sigma_c/f_{cm}(t_0)$, em que σ_c é a tensão de compressão e $f_{cm}(t_0)$ - é a resistência média à compressão do betão à data do carregamento.

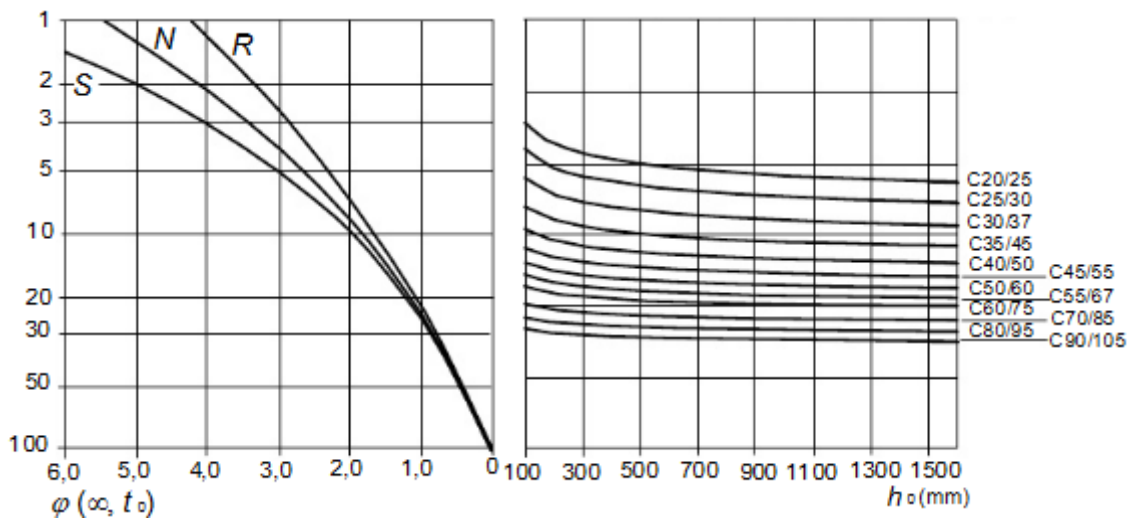


a) ambiente interior - RH = 50%



Nota:

- o ponto de intersecção entre as linhas 4 e 5 também pode estar acima do ponto 1
- para $t_0 > 100$ é suficientemente rigoroso considerar $t_0 = 100$ (e utilizar a linha tangente)



b) ambiente exterior - RH = 80%

Figura 3.1: Método para a determinação do coeficiente de fluência, $\phi(\infty, t_0)$ para betão em condições ambientais normais

5) Os valores indicados na Figura 3.1 são válidos para temperaturas ambientes compreendidas entre -40°C e $+40^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa média compreendida entre $\text{RH} = 40\%$ e $\text{RH} = 100\%$. Utilizam-se os seguintes símbolos:

$\phi (\infty, t_0)$ valor final do coeficiente de fluência

t_0 idade do betão na data do carregamento, em dias

h_0 espessura equivalente = $2A_c / u$, em que A_c é a área da secção transversal do betão e u é o perímetro da parte exposta à secagem

- S - Classe S, de acordo com 3.1.2 (6)
- N - Classe N, de acordo com 3.1.2 (6)
- R - Classe R, de acordo com 3.1.2 (6)

(6) A extensão total de retracção é constituída por duas componentes, a extensão de retracção de secagem e a extensão de retracção autogénea. A extensão de retracção por secagem evolui lentamente, uma vez que é em função da migração da água através do betão endurecido. A extensão de retracção autogénea desenvolve-se durante o endurecimento do betão: desenvolve-se, portanto, na sua maior parte nos primeiros dias após a betonagem. A retracção autogénea é uma função linear da resistência do betão. Deve ser considerada de modo específico quando se coloca betão novo sobre betão endurecido. Assim, o valor da extensão total de retracção ϵ_{cs} é igual a

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad (3.8)$$

em que:

- ϵ_{cs} extensão total de retracção
- ϵ_{cd} extensão de retracção por secagem
- ϵ_{ca} extensão de retracção autogénea

O valor final da extensão de retracção por secagem, $\epsilon_{cd, \infty}$, é igual a $k_h \cdot \epsilon_{cd, 0} \cdot \epsilon_{cd, 0}$. pode obter-se no Quadro 3.2 (valores médios prováveis, com um coeficiente de variação da ordem de 30%).

Nota: A fórmula para $\epsilon_{cd, 0}$ é dada no Anexo B.

Quadro 3.2 Valores nominais da retracção livre por secagem $\epsilon_{cd,0}$ (em ‰) para o betão com cimentos CEM da Classe N

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Humidade Relativa (em %)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0.62	0.58	0.49	0.30	0.17	0.00
40/50	0.48	0.46	0.38	0.24	0.13	0.00
60/75	0.38	0.36	0.30	0.19	0.10	0.00
80/95	0.30	0.28	0.24	0.15	0.08	0.00
90/105	0.27	0.25	0.21	0.13	0.07	0.00

A evolução com o tempo da extensão de retracção por secagem é dada por:

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0} \quad (3.9)$$

em que

k_h - coeficiente que depende da espessura equivalente, h_0 , de acordo com o Quadro 3.3

Quadro 3.3 Valores de k_h na expressão (3.9)

h_0	k_h
100	1.0
200	0.85
300	0.75
≥ 500	0.70

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 \sqrt{h_0^3}} \quad (3.10)$$

em que:

t - idade do betão na data considerada, em dias

t_s - idade do betão (dias) no início da retracção por secagem (ou expansão).

Normalmente corresponde ao fim da cura.

h₀ - espessura equivalente (mm) da secção transversal

= 2 A_c/u

em que:

- A_c - área da secção transversal do betão
- u – perímetro da parte da secção transversal exposta à secagem

A extensão de retracção autogénea é dada por:

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \epsilon_{ca}(\infty) \quad (3.11)$$

em que:

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5 (f_{ck} - 10) 10^{-6} \quad (3.12)$$

$$\text{e } \beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) \quad (3.13)$$

em que t é expresso em dias.

- Anexo C -

Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão

Parte 2: Pontes

(NP EN 1992-2)

A Retracção Autogénea (ε_{ca}) pode ser calculada utilizando as seguintes fórmulas:

- Para $t < 28$ dias tem-se

- Quando: $\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} < 0.1$ então:

$$\varepsilon_{ca}(t, f_{ck}) = 0$$

- Quando: $\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} \geq 0.1$ então:

$$\varepsilon_{ca}(t, f_{ck}) = (f_{ck} - 20) \left(2.2 \frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} - 0.2 \right) 10^{-6}$$

- Para $t \geq 28$ dias

$$\varepsilon_{ca}(t, f_{ck}) = (f_{ck} - 20) \left(2.8 - 1.1 \exp\left(\frac{-t}{96}\right) \right) 10^{-6}$$

A Retracção de Secagem (ε_{cds}) pode ser calculada utilizando as seguintes fórmulas:

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s, f_{ck}, h_0, RH) = \frac{K(f_{ck})(72 \exp(-0.046 f_{ck}) + 75 - RH)(t - t_s) 10^{-6}}{(t - t_s) + \beta_{cd} h_0^2}$$

- Com $K(f_{ck})=18$ com $f_{ck} \leq 55$ MPa
- Com $K(f_{ck})=30-0.21$ para $f_{ck} > 55$ MPa

- Anexo D -

Model Code 2010

(MC 2010)

5.1.9.4.4 Shrinkage

The total shrinkage or swelling strains $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ may be calculated from Eq. (5.1-75):

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (5.1-75)$$

Where shrinkage is subdivided into the autogenous shrinkage $\varepsilon_{cas}(t)$:

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) \times \beta_{as}(t) \quad (5.1-76)$$

and the drying shrinkage $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$:

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \times \beta_{RH}(RH) \times \beta_{ds}(t - t_s) \quad (5.1-77)$$

Where:

t - concrete age in days;

t_s - concrete age at the beginning of drying in [days]

$(t - t_s)$ - is the duration of drying in [days]

The autogenous shrinkage component $\varepsilon_{cas}(t)$ may be estimated by means of the notional autogenous shrinkage coefficient $\varepsilon_{cas0}(f_{cm})$ and the time function $\beta_{as}(t)$:

$$\varepsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \times \left(\frac{f_{cm}/10}{6 + f_{cm}/10} \right)^{2,5} \times 10^{-6} \quad (5.1-78)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \times \sqrt{t}) \quad (5.1-79)$$

Where:

f_{cm} is the mean compressive strength at the age of 28 days in [MPa] according to Eq. (5.1-1)

α_{as} is a coefficient, dependent on the type of cement (see Table 5.1-13)

Table 5.1-13: Coefficients α_i used in Eqs. 5.1-78 and 5.1-80

Strength class of cement	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
32,5N	800	3	0,013
32,5R; 42,5N	700	4	0,012
42,5R; 52,5N; 52,5R	600	6	0,012

The drying shrinkage $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ is calculated by means of the notional drying shrinkage coefficient $\varepsilon_{cds0}(f_{cm})$, the coefficient $\beta_{RH}(RH)$, taking into account the effect of the ambient relative humidity and the function $\beta_{ds}(t-t_s)$ describing the time development:

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times \exp(-\alpha_{ds2} \times f_{cm})] \times 10^{-6} \quad (5.1-80)$$

$$\beta_{RH}(RH) = \begin{cases} -1,55 \times \left[1 - \frac{RH^3}{100}\right]; \text{ para } 40 \leq RH \leq 99\% \times \beta_{s1} \\ 0,25; \text{ para } RH \geq 99\% \times \beta_{s1} \end{cases} \quad (5.1-81)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{0,035 \times h^2 + (t - t_s)} \right)^{0,5} \quad (5.1-82)$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,1} \leq 1 \quad (5.1-83)$$

where

- α_{ds1} , α_{ds2} are coefficients, dependent on the type of cement (see Table 5.1-13)
- f_{cm} is the mean compressive strength at the age of 28 days in [MPa] according to Eq. (5.1-1)
- RH is the relative humidity of the ambient atmosphere in [%]

- $h = 2A_c/u$ is the notional size of member in [mm], with A_c as the cross-section in [mm²] and u as the perimeter of the member in contact with the atmosphere in [mm]
- t is the concrete age in [days]
- t_s is the concrete age at the beginning of drying in [days]
- $(t-t_s)$ is the duration of drying in [days]

The shrinkage of lightweight aggregate concrete $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ may be roughly estimated by Eq. (5.1 84)

$$\varepsilon_{lcs}(t, t_s) = \eta \times \varepsilon_{cs}(t, t_s) \quad (5.1-84)$$

Where

$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ is calculated according to Eq. (5.1-75)

$\eta = 1.5$ for LC8, LC12, LC16

$= 1.2$ for LC20 and higher

