CAPÍTULO 7 – AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE

7.1. Introdução

O American Concrete Institute (ACI) define durabilidade como a resistência ao ataque químico, à abrasão meteórica e a outros processos de degradação. Esta definição é, salvo melhor opinião, algo incompleta porque lhe falta a componente temporal. Parece mais correcto definir durabilidade como o conjunto de propriedades do betão que lhe confere resistência continuada aos factores agressivos exteriores de ordem física e química, durante um intervalo de tempo projectado tão longo quanto possível, que depende da intensidade desses mesmos factores e da resistência própria de cada componente isolado do betão.

Em termos práticos, o tempo tem de ser considerado em qualquer estudo que envolva a estabilidade dos materiais, porquanto a vida útil da obra em que eles possam ser incorporados, mormente com funções estruturais, vai depender da capacidade que eles apresentem de manter inalteráveis no tempo a sua integridade e as suas características mecânicas.

A durabilidade do betão está essencialmente ligada com três factores principais:

- a sua constituição/composição
- as condições de colocação em obra
- a cura

Não é possível, senão de um modo subjectivo ou perante um caso concreto bem definido, estabelecer qual dos factores assume maior importância no condicionamento do comportamento do betão, embora a constituição química

pareça ter uma importância central. Poderá dizer-se que todos os aspectos considerados são complementares uns dos outros e a menor atenção prestada a um deles imediatamente se traduz na perda de qualidade do material, que mais ou menos rapidamente, consoante o grau de agressividade a que o material está sujeito, pode configurar uma situação de deficiente desempenho estrutural e mesmo o eventual colapso. Por essa razão, e embora um betão com elevada resistência mecânica reflicta de alguma forma qualidades que podem garantir a esse mesmo betão um bom comportamento em termos de durabilidade, é necessário alargar o modo como usualmente se determina e controla a capacidade resistente de um betão face a um conjunto de factores múltiplos e complexos que tendem a desgastar, degradar e alterar a durabilidade que inicialmente se reconhece ao material.

Num trabalho recente [82], Pihlajavaara propôs a seguinte expressão para avaliar a velocidade de desintegração **R** dos betões de cimento Portland em função da sua resistência característica à compressão:

$$\mathbf{R = C_{amb}.\ C_{cura}.\ f_{ck}^{\ -3.3}}$$

onde C_{amb} e C_{cura} são parâmetros empíricos que dependem da agressividade ambiental e do tempo de cura dos provetes. Pode ver-se, devido ao expoente negativo, que a velocidade de desintegração do betão varia na razão inversa da resistência característica, sendo de registar que se esta variar para o dobro, a velocidade **R** diminui para um décimo. Embora esta expressão tenha sido formulada para os betões de cimento Portland, e portanto nada permite que possa ser aplicável aos geobetões, ela põe em evidência a relação que se pode estabelecer entre o comportamento mecânico e a durabilidade do material.

Por outro lado, a ENV-206 estabelece, tendo em conta uma experiência acumulada de muitos anos de observações, vários conceitos de composição, de

obtenção de trabalhabilidade, de utilização de adições nos cimentos e ainda procedimentos de fabrico, colocação e cura que tendem a estabelecer um limiar mínimo de garantia da manutenção das propriedades do betão durante um prazo que se deseja no mínimo idêntico àquele que é, em termos económicos, considerado como o prazo de duração ou vida útil da obra. São assim indicadas dosagens mínimas de cimento, razões máximas A/C, recobrimento mínimo das armaduras, diâmetro máximo dos agregados, condições de colocação em obra, e outros procedimentos vários, como forma de garantir o comportamento pretendido.

Compreende-se muito facilmente as preocupações havidas no estudo, fabrico e manutenção do betão, porquanto ele está presente em praticamente todas as realizações do Homem, colocando-se sem grande dificuldade a par do aço, e à frente da pedra ou da madeira, que assumem ou assumiram isoladamente um papel também fundamental na estabilidade da generalidade das construções.

Por estas razões, é indispensável apurar qual o tipo de comportamento que é possível esperar dos materiais geopoliméricos, como por exemplo o das argamassas e do geobetão, sob a acção dos mesmos agentes agressivos, debaixo do mesmo tipo de solicitações e estados de tensão, ou seja, em idênticas condições de serviço às quais o betão de cimento Portland se encontra usualmente exposto. Será interessante, por isso, recorrer à comparação com o desempenho de um betão de cimento Portland com a mesma dosagem de ligante, para se poder aferir o comportamento daquele em comparação com um material que se conhece razoavelmente bem, situando o conjunto dos resultados obtidos no quadro dos valores que são correntes no comportamento dos betões e se podem por isso tomar como base de referência.

Os elevados níveis de desempenho mecânico por parte dos geobetões referidos no Cap. 6 deste trabalho se, por um lado, permitem augurar uma boa

capacidade de resistência aos meios agressivos, não bastam nem são suficientes, tanto mais quando se tem de recordar a estrutura mais aberta que estes materiais apresentam (portanto com maior permeabilidade) e que se traduz numa mais fácil penetração dos agentes agressivos.

Os mecanismos de degradação nas estruturas de betão incluem, genericamente, efeitos químicos, físicos e biológicos, sendo agravados pela possibilidade de processos expansivos ligados com a formação de gelo nos poros intersticiais, pelas acções de combinação e reacção com sulfatos ou reacções do tipo álcalis-silica, pela corrosão das armaduras e consequente expansão na sequência de fenómenos de carbonatação ou de migração de iões de cloro, de redução gradual da quantidade de hidróxido de cálcio que gera instabilidade nos silicatos e aluminatos cálcicos, conduzindo à descalcificação e portanto alteração das condições que permitem garantir durabilidade aos betões.

Genericamente, os mecanismos de degradação dos betões incluem:

- acção do gelo-desgelo (efeitos físicos e desgaste);
- efeito da molhagem – secagem;
- acção de choque térmico;
- ataque dos sulfatos (efeitos químicos);
- ataques microbiológicos induzidos (com marcados efeitos químicos);
- reacções do tipo álcalis-agregados;
- corrosão das armaduras de aço embebidas no betão (efeitos electroquímicos e físicos): (a) por carbonatação do betão (b) por acção dos cloretos;
- abrasão (avaliação do desgaste físico);
- acção de cargas mecânicas (efeitos físicos);
- e outros.

Na prática, estes mecanismos podem actuar simultaneamente, sendo por isso admissíveis efeitos sinergéticos de reforço das acções degradativas. A prática laboratorial, todavia, apenas contempla a possibilidade da actuação isolada de cada um dos factores de degradação, não sendo por isso possível apreciar em que medida é que a acção conjunta de mais do que um factor acelera o processo degenerativo e reduz a vida útil do elemento estrutural em causa.

Os ensaios que permitem avaliar o desempenho do geobetão dentro do quadro de mecanismos acima referido implicam a determinação de certas propriedades do material e apoiam-se tanto quanto possível nas normas e especificações regulamentares disponíveis. Na falta destas ou na sua eventual inadaptação ao material geopolimérico, propõe-se, em casos muito pontuais, um procedimento de ensaio específico, que assim tem pelo menos a virtude de permitir a comparação de comportamento entre os dois materiais em análise. Por exemplo, não é possível determinar os tempos de presa com o Ensaio de Vicat como é habitual nos betões de cimento Portland.

No Capítulo 5 foram já abordados alguns aspectos e comportamentos que estão ligados com as condições de fabrico e cura dos geopolímeros e que não serão novamente aqui referidos. O que importa enfatizar é a necessidade de adequar as práticas de ensaio a um tipo de material em que predominam, enquanto fresco, características de viscosidade que não são habituais e cujos processos de reacção química pouco têm a ver com os que se desenvolvem no betão corrente .

Se aqui se sublinha o interesse da análise comparada de desempenho dos materiais geopoliméricos com o betão de cimento Portland, material com uma história de comportamento conhecida e bem caracterizada ao longo de mais de 100 anos, tem de se referir que não se pretende com tal comparação salientar a eventual superioridade deste ou daquele aspecto ou propriedade, mas tão

somente procurar situar o nível de comportamento do material em relação ao betão de cimento Portland que constitui, seguramente, a referência mais indicada.

Neste trabalho foi realizado um conjunto de ensaios de durabilidade suficiente para abarcar os aspectos mais relevantes que permitam uma caracterização adequada dos materiais. Assim, realizaram-se ensaios de:

- absorção de água por vácuo e por imersão;
- absorção de água por capilaridade;
- permeabilidade à água;
- permeabilidade ao oxigénio;
- ataque químico pelos ácidos;
- migração do ião cloro Cl^-;
- desgaste na Câmara de Los Angeles;
- simulação do gelo-desgelo pelo sulfato de magnésio;
- molhagem-secagem;
- choque térmico;
- resistência às altas temperaturas.

Não relacionados directamente com a durabilidade, mas importantes também para a caracterização do comportamento global dos geopolímeros, foram os ensaios de retracção e de determinação do módulo de elasticidade por compressão que se executaram.

7.2. Preparação dos Provetes. Retracção e Módulo Elástico

Em todos os ensaios realizados no âmbito dos estudos de durabilidade foram usados provetes de argamassa da composição CBD e de geobetão com a composição GB. Esta última composição foi determinada pelo Método de Faury.

Com o objectivo de estabelecer um padrão de comparação dos resultados dos ensaios de durabilidade dos provetes de argamassa geopolimérica e de geobetão, foi fabricado um betão de cimento Portland que se pretendeu de composição equivalente ao geobetão. A composição do betão foi, por isso, também estudada pelo Método de Faury, sendo usada a mesma quantidade de ligante (350kg/m³), metacaulino no geobetão e cimento Portland no betão. Dado que a massa volúmica do metacaulino é inferior à massa volúmica do cimento Portland e que a razão ACT/MC no geobetão é superior à razão A/C do betão, as duas composições não são exactamente iguais, mas são formalmente idênticas.

Procurou também garantir-se, em reforço da segurança com que devem ser retiradas as pertinentes conclusões, um betão com resistência mecânica semelhante, pelo que se empregou um cimento da classe 42,5 o que permitiu obter resistências da ordem dos 49 MPa aos 28 dias. Daqui para a frente designar-se-á apenas por betão CPN, ou simplesmente betão o material obtido com cimento Portland, ficando a designação de geobetão destinada ao material obtido por activação alcalina do metacaulino.

Os provetes de argamassa, geobetão e de betão CPN foram ensaiados com a idade mínima de 28 dias, embora os primeiros pareçam atingir a plenitude das suas capacidades à volta dos 7 dias.

Os ensaios de durabilidade propriamente ditos foram antecedidos da determinação de algumas características dos constituintes principais das composições, como a massa volúmica e a absorção dos agregados utilizados, a massa volúmica e a superfície específica Blaine do metacaulino, cujos resultados são apresentados no Cap. 2.

Foi também determinado o módulo de elasticidade à compressão do geobetão e de argamassas geopoliméricas, e realizaram-se ensaios de estabilidade

dimensional (retracção) sobre os mesmos materiais. Nestes dois últimos ensaios não se considerou indispensável determinar o comportamento do betão CPN, cujos valores de referência são vulgarmente conhecidos ou determináveis em função de expressões estabelecidas em documentos acreditados (REBAP, por exemplo).

7.2.1. Determinação da Retracção de Provetes de Argamassa Geopolimérica, Geobetão e Betão CPN

A análise da estabilidade dimensional que se verifica nos materiais geopoliméricos após a fase de compactação e até se alcançar o equilíbrio com as condições atmosféricas, a temperatura constante e sem intervenção de qualquer estado de tensão, constitui um aspecto dos mais importantes a estudar, pelos eventuais efeitos que pode ter no comportamento dos materiais.

Como se sabe, a retracção tem várias componentes, cujo efeito isolado pode assumir em certas situações maior ou menor importância. A retracção que foi medida e que se mostra nos gráficos abaixo é a retracção total, na medida em que representa um valor final conjunto em que não é possível destrinçar a comparticipação de cada um dos vectores determinantes. Esta é, de resto, a situação mais comum.

A Fig. 7.1. apresenta o valor da retracção medida em provetes de argamassa geopolimérica, de geobetão e de betão de CPN curados em condições ambientes (22 ± 2ºC e 73 ± 3% de H.R.) sob a protecção de um filme de polietileno (PE).

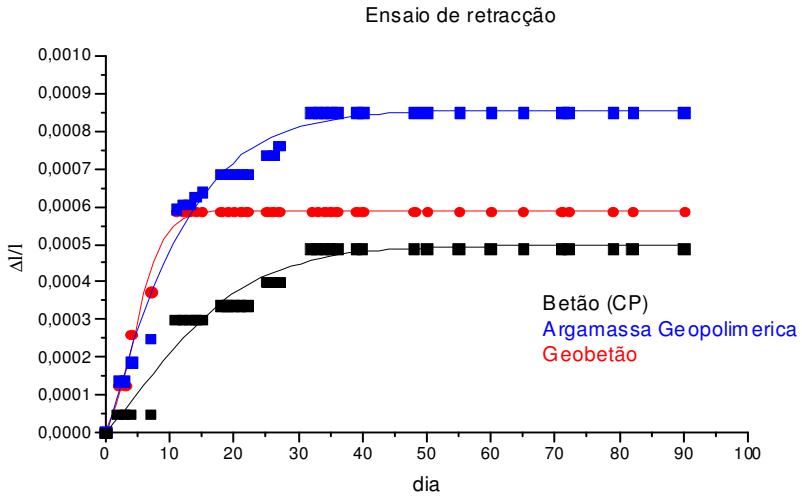

Fig. 7.1.– Retracção de Provetes

Como se verifica, a retracção patente no geobetão é ligeiramente superior à verificada no betão de CPN, tomado como referência, sendo de notar que ela ocorre num lapso de tempo muito mais rápido (pouco mais de 10 dias), ao contrário do betão em que só estabilizou, aparentemente, ao fim de 40 dias. A retracção nas argamassas geopoliméricas, não dispondo do mesmo "travão" pétreo que o esqueleto sólido garante aos betões, é superior à que se verifica nestes, assumindo curiosamente uma evolução muito semelhante à registada no betão de CPN na medida em que estabiliza também a partir dos 40 dias.

Em termos médios, a retracção do geobetão é cerca de 16% superior à do betão de CPN($580x10^{-6}$ contra $500x10^{-6}$), subindo essa percentagem para 68% no caso das argamassas ($840x10^{-6}$).

A humidade atmosférica, sujeita, como se sabe, a variações cíclicas consideráveis, desempenha um papel decisivo neste processo, pelo que os valores acima devem ser referidos às condições de ensaio. Por outro lado, a natureza do material ligante, o metacaulino, tem também uma importância fundamental na retracção, conhecida que é a sua capacidade para fixar água na sequência da

reduzida dimensão das suas partículas. Na medida em que a retracção resulta essencialmente da perda de água, é possível que a retracção de geobetões com outro tipo de ligante (escórias ou cinzas volantes) seja substancialmente diferente. Há autores que apontam para valores de retracção muito baixos, bastante inferiores aos do betão de CPN [83], em geobetões fabricados com cinzas volantes.

Poderão também fazer-se sentir as limitações verificadas na compactação decorrentes do carácter viscoso do activador, pois uma estrutura mais porosa é susceptível de maior retracção.

Fica para já patente o facto de a retracção do geobetão fabricado com metacaulino poder ser ligeiramente superior à que se verifica nos betões de cimento Portland. Por seu turno, a retracção nas argamassas tem um valor bastante superior ao dos betões, como de resto era de esperar.

7.2.2. Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão

Seguidamente abordam-se os resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade em compressão sobre provetes de argamassa geopolimérica e de geobetão.

Os gráficos das Figs. 7.2. e 7.3. ilustram a evolução do andamento da curva tensão-extensão, registando-se no canto superior direito o valor calculado em cada caso do Módulo de Elasticidade. O Quadro 7.1. apresenta os valores obtidos no ensaio.

Quadro 7.1. – Valores de Ensaio

	Idade	*R (flexão)*	*R(compressão)*	*E (Módulo)*
Argamassa	**60 dias**	**6.55 MPa**	**45.20 MPa**	**21.2 GPa**
Geobetão	**60 dias**	**8.74 MPa**	**73.25 MPa**	**20.8 GPa**

E-Modulus test **DIN 1048 Teil 5** **Test body : *Prism*** **40X40X160**

Series designation	: 3		Operator	:	
Manufacture date	: 14-04-2003 / 00:00		Sample age	: 0	Days 11:16
Test date	: 14-04-2003 / 11:16		Probenvorgabealter	:	Days

Designation	Dimensions [mm]			Mass	Bulk		E-Modulus
	l	b	h	[g]	[kg/m³]		[N/mm²]
1	156.0	40.0	40.0	524.0	2099.4		21200

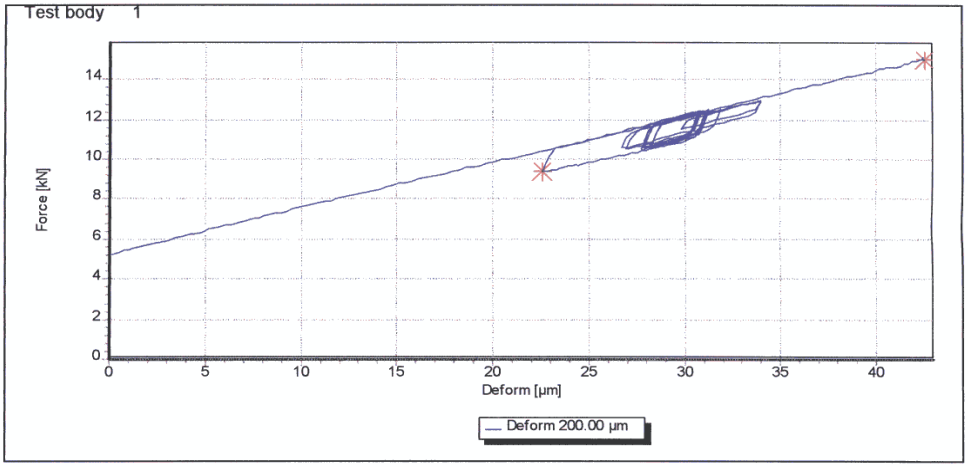

Fig. 7.2. – Curva Tensão-Extensão (Argamassa)

E-Modulus test **DIN 1048 Teil 5** **Test body : *Prism*** **40X40X160**

Series designation	: 1		Operator	:	
Manufacture date	: 14-04-2003 / 00:00		Sample age	: 0	Days 10:17
Test date	: 14-04-2003 / 10:17		Probenvorgabealter	:	Days

Designation	Dimensions [mm]			Mass	Bulk		E-Modulus
	l	b	h	[g]	[kg/m³]		[N/mm²]
1	160.0	40.0	40.0	600.0	2343.8		20800

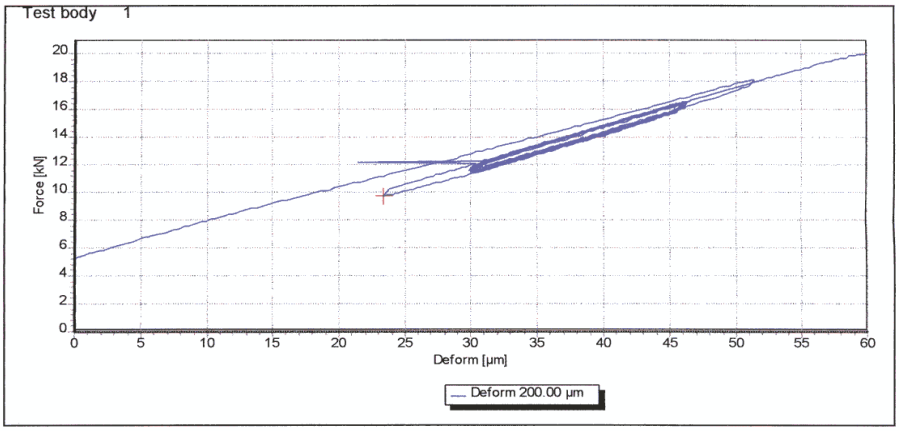

Fig. 7.3. – Curva Tensão-Extensão (Geobetão)

Estes valores do Módulo de Young são bastante baixos quando se tem em atenção o nível de comportamento mecânico que os geobetões e argamassas geopoliméricas alcançam. D'Arga e Lima *et al* [84] referem uma expressão, também usada no REBAP para o cálculo do módulo de elasticidade do betão de CPN em função da tensão característica σ_{ij}:

$$E_a = 19500 \, X \, (\sigma_{ij})^{1/2}$$

onde σ_{ij} vem dada em kgf/cm^2. Em unidades do sistema SI, e usando a terminologia actual, esta expressão transforma-se em

$$E_a = 6000 \, X \, (f_{ck})^{1/2}$$

que permite obter o valor do módulo elástico uma vez conhecida a tensão característica do betão f_{ck} em MPa. Considerando no caso presente e em termos meramente aproximados a tensão característica do geobetão em cerca de 60 MPa, o valor do módulo elástico correspondente, se calculado pela expressão acima, seria de aproximadamente 46.5 GPa. Este pequeno cálculo expedito tem apenas o objectivo de situar o nível dos valores de E que são usuais no betão de CPN para aquele grau de resistência, para que se possa perceber que o comportamento do geobetão é particularmente diferente.

De facto, o geobetão parece evidenciar um comportamento mais dúctil, o que poderá estar de algum modo ligado à natureza zeolítica da estrutura dos geopolímeros, composta por uma série de vazios e intervalos inter-moleculares que permitirão o desenvolvimento de uma certa forma de ductilidade. De resto, os inúmeros ensaios de ruptura por compressão simples sempre deixaram antever um comportamento deste tipo, pois nunca a ruptura se processou de modo brusco ou violento (como acontece nos materiais mais resistentes, em particular nos

betões de elevado desempenho) mas progrediu de uma forma gradual, típica do comportamento dúctil. É necessário referir que o tipo de agregados usados na composição condiciona o módulo de elasticidade final do material endurecido.

A ductilidade dos geopolímeros poderá ter particular interesse perante acções do tipo sísmico, para além da vantagem de constituir, de certo modo, um meio de aviso perante a proximidade de uma situação limite de carregamento ou solicitação.

7.3. Ensaios de Durabilidade

7.3.1. Ensaios de Absorção e Permeabilidade

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO SOB VÁCUO

Os resultados são apresentados nos quadros seguintes, com base no ensaio de 4 provetes de que se determinou depois a média aritmética. Estes resultados da porosidade foram usados mais tarde no ensaio em que se determinou a permeabilidade dos provetes à água (Quadros 7.8. e 7.9. – 10ª coluna).

Provetes de Geobetão

Quadro 7.2. – Ensaios de Absorção (geobetão)

	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	A_{vc}
A	172.983	98.100	166.167	9.10%
B	174.253	98.800	167.501	8.95%
C	171.472	96.500	164.786	8.92%
D	171.122	96.700	164.305	9.16%

Porosidade Aberta, A_{vc} = 9.03%

Provetes de Betão CPN

Quadro 7.3. – Ensaios de Absorção (betão)

	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	A_{vc}
I	161.180	92.286	151.273	14,38
II	160.672	91.381	150.417	14,80
III	160.306	91.719	150.745	13,94
IV	159.255	90.186	148.761	15,20

Porosidade Aberta, A_{vc} = 14.58 %

Os valores da porosidade obtidos no betão parecem algo superiores ao que é normal obter-se em betões correntes, embora em trabalhos recentes [85] apresentem valores de absorção de 9.3 a 15.6% sobre betões bem doseados em cimento (300 até 450kg/m³) com agregados calcários e basálticos. Os resultados dos ensaios de comportamento mecânico dos provetes de betão, que poderiam reflectir de algum modo a existência de porosidade excessiva, conduziram a valores dentro do esperado (valores acima dos 45 MPa) e assim os provetes foram considerados aceites sem mais reservas. Os valores médios de 9% obtidos no geobetão parecem apontar para uma reduzida porosidade aberta, pelo menos a nível macroscópico.

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO À PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Os valores registados nos ensaios estão seriados nos quadros a seguir.

Quadro 7.4. – Ensaios de Absorção (geobetão)

	m1 (g)	m2 (g)	m3 (g)	A_{vc}
A	619,42	363,9	596,43	9.00%
B	620,09	364.3	600,69	7.58%
C	608,13	352,2	586,72	8.37%
D	613,44	357.5	591,97	8.39%

Absorção de Água, A_{vc} = 8.34%

Quadro 7.5. – Ensaios de Absorção (betão)

	m1 (g)	*m2 (g)*	*m3 (g)*	A_{vc}
A	149.365	82.551	160.541	14.33
B	149.739	93.970	159.258	14.58
C	153.204	86.294	164.015	13.91
D	151.974	88.758	162.154	13.87

Absorção de Água, A_{vc} = 14.17 %

Estes valores parecem confirmar os obtidos no ensaio anterior, sendo agora ligeiramente mais reduzidos em qualquer dos materiais, uma vez que não existe o efeito de vácuo que gera um gradiente mais forte entre o meio envolvente e o interior do betão, favorecendo a entrada da água. Como já havia sido verificado, os valores obtidos no geobetão são inferiores aos obtidos no betão de CPN em cerca de 42%, o que é considerável.

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados dos ensaios de permeabilidade conduzidos segundo o procedimento que se descreveu no Cap. 2 estão, para os provetes de geobetão aqui estudados, apresentados no Quadro 7.6. (onde a massa média inicial dos 3 provetes é m_o = 568.39 g e a área de contacto com a água é A_f = 16 cm²).

Quadro 7.6. – Ensaio de Capilaridade (Geobetão)

A	*B*	*C*	*Média*	*Tempo t*	*Raíz t*	$(m_i-m_o)/A_f$
578.68	571.58	576.90	575.72	3	1.73205	0.4581
580.55	573.04	578.64	577.41	6	2.44949	0.5637
585.36	578.58	583.12	582.35	24	4.89898	0.8725
587.42	579.01	586.02	584.15	48	6.92820	0.9850
589.70	581.98	588.05	586.58	72	8.48528	1.1369
589.60	582.02	588.07	586.56	96	9.79796	1.1356
589.50	580.97	587.90	586.12	120	10.9545	1.1081

Os provetes de betão foram submetidos ao mesmo procedimento. A massa média dos provetes secos de betão é 575,92 g, sendo idêntica a área de contacto.

Quadro 7.7. – Ensaio de Capilaridade (Betão)

A	*B*	*C*	*Média*	*Tempo t*	*Raíz t*	$(m_i-m_o)/A_f$
576,71	579,89	574,52	577,04	3	1.73205	0,0700
579,15	580,37	574,97	578,16	6	2.44949	0.1400
581,23	583,66	576,78	580,56	24	4.89898	0.2900
582,31	584,56	578,28	581,72	48	6.92820	0.3625
584,44	586,41	579,43	583,43	72	8.48528	0.4694
586,22	587,03	580,72	584,66	96	9.79796	0.5463
587,34	587,12	582,07	585,51	120	10.9545	0.5994

As Figs. 7.4. e 7.5. apresentam, para o geobetão e para o betão, as curvas que representam a variação da quantidade de água absorvida por unidade de área com a raiz quadrada do tempo em que essa absorção se verificou. A recta de ajustamento às curvas pelo Método dos Menores Quadrados permite obter elevados coeficientes de correlação e o declive de cada uma das rectas dá o valor do Coeficiente de Absorção Capilar em g/cm² [86]. As rectas de ajustamento estão representadas a cor violeta.

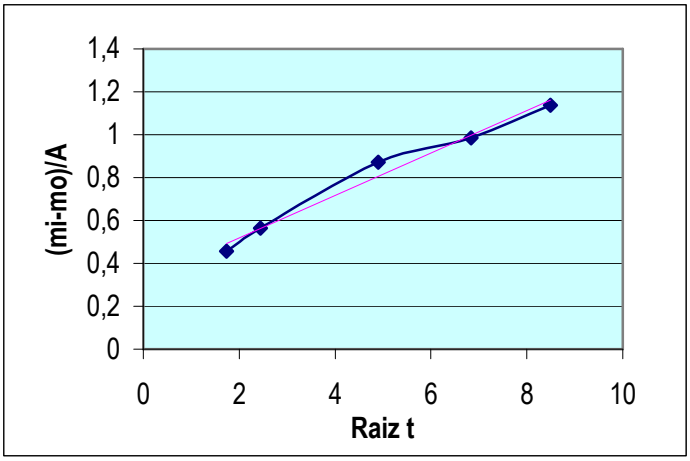

Fig. 7.4. – Absorção por Capilaridade (Geobetão)

O coeficiente de correlação é de 98,06% e a recta de ajustamento tem por equação **y** = 0,0989 **x** + 0,3205. Portanto, o coeficiente de absorção capilar é dado por 0,0989 g/cm² (coeficiente angular da recta de ajustamento).

Quanto ao betão, tem-se

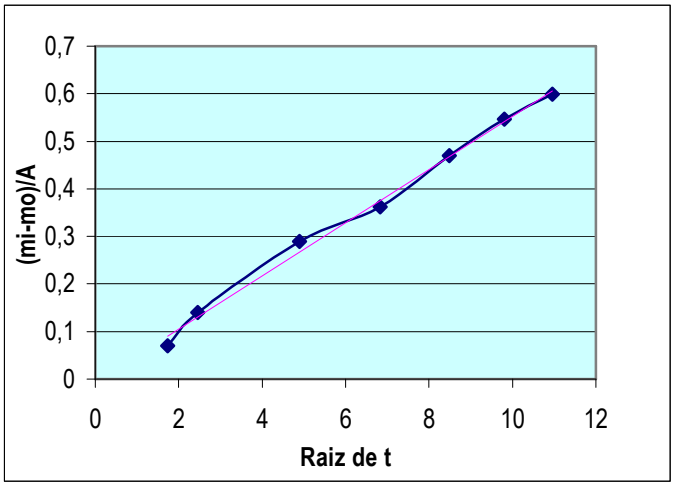

Fig. 7.5. – Absorção por Capilaridade (Betão)

O coeficiente de correlação é agora de 99,48% e a recta tem por equação **y** = 0,056 **x** – 0,0073. O coeficiente de absorção capilar vale neste caso 0,056 g/cm².

Apesar da aparente maior porosidade aberta do betão, que poderia eventualmente significar uma menor qualidade do betão com reflexos também ao nível da microporosidade, o betão tem melhor comportamento que o geobetão, com um coeficiente de absorção capilar mais reduzido. A estrutura zeolítica do geobetão poderá certamente justificar em grande parte este comportamento, pois como é evidente os poros capilares e grande parte dos micro-poros são os responsáveis pelos fenómenos de capilaridade.

ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA

Como se referiu no Cap. 2, o facto de se ter verificado a quase saturação do primeiro provete após as 3 horas de duração do ensaio levou a que se optasse por diminuir então o tempo de ensaio, passando de 180 minutos para apenas 30 minutos, mantendo no entanto a mesma pressão de 3 bar. No betão de CPN

manteve-se a leitura ao fim de 180 minutos, porque aos 30 minutos era difícil definir com clareza os níveis de penetração. Os resultados obtidos foram mais conclusivos, na medida em que foi possível registar a evolução do avanço da linha de saturação no geobetão.

Nos cálculos efectuados e que se apresentam nos Quadros 7.8. e 7.9. considerou-se a viscosidade cinemática da água $\eta = 1.3 \times 10^{-6}$ kN.s/m² e a massa volúmica também da água $\gamma = 10$ kN/m³. As porosidades indicadas na 10ª coluna foram as registadas no ensaio de absorção de água,(ver Quadros 7.2. e 7.3.).

Quadro 7.8. – Ensaio de Permeabilidade à Água (geobetão)

Refª. Geobetão											
Prv.	H (cm)	Diam. (cm)	Área (m²)	Pr. (bar)	t (min)	Penetração (cm)		Pen. Média	Poros. (%)	Perm. á água (m/s)	Perm. Intrín.
A	3,91	4,84	0,0018398	3,1	30	2,40	2,34	1,975	9.10	3,12E-08	4,05E-15
						1,92	2,56				
						1,36	1,94				
						1,85	1,43				
B	3,90	4,83	0,0018322	3,2	30	1,16	2,08	1,673	8.95	2,13E-08	2,77E-15
						2,21	1,31				
						1,30	2,71				
						1,67	0,94				
C	3,91	4,83	0,0018322	3,0	30	2,21	2,18	2,164	8.92	3,79E-08	4,96E-15
						2,42	1,98				
						2,27	2,28				
						2,41	1,56				
D	3.91	4,83	0,0018322	3,1	30	2,18	1,94	1,925	9.16	2,98E-08	3,87E-15
						2,36	1,68				
						1,15	2,38				
						1,86	1,85				

Quadro 7.9. – Ensaios de Permeabilidade à Água (betão)

Refª. Betão											
Prv.	h (cm)	Diam. (cm)	Área (m²)	Pr. (bar)	t (min)	Penetração (cm)		Pen. Média	Poros. (%)	Perm. á água (m/s)	Perm. Intrín.
I	3,97	4,85	0,0018475	3,2	180	2,37	0,92	1,583	15,197	5,57E-09	7,24E-16
						1,24	1,55				
						1,52	1,34				
						1,43	2,29				
II	3,94	4,83	0,0018322	3,1	180	1,60	0,92	1,475	14,804	4,71E-09	6,13E-16
						1,93	1,55				
						1,05	1,34				
						1,12	2,29				
IIII	3,95	4,84	0,0018398	3,1	180	0,84	1,12	1,151	14,383	2,70E-09	3,53E-16
						0,97	1,24				
						1,26	1,32				
						1,31	1,15				
IV	3.96	4,83	0,0018322	3,1	180	0,76	1,03	0,939	13,936	1,80E-09	2,34E-16
						1,26	1,05				
						0,78	1,27				
						0,69	0,67				

Foram usados no ensaio 4 provetes de cada material, fazendo-se 4 leituras de penetração em cada uma das metades que se obtiveram dividindo cada provete ao meio por compressão diametral (Ensaio Brasileiro).

Como se pode observar pelos quadros de resultados, os valores da permeabilidade do geobetão são superiores em quase uma ordem de grandeza aos do betão de CPN, apesar da redução significativa do tempo em que os provetes de geobetão estiveram sujeitos a ensaio. Esta circunstância pode ser explicada em virtude da natureza zeolítica da sua estrutura, como atrás se referiu, embora se esperasse um efeito a uma escala mais reduzida. O problema assumiu certamente particular dimensão devido a ter-se considerado um considerável acréscimo de pressão acima da pressão atmosférica (3 vezes mais), pois dessa forma vence-se a dificuldade que a viscosidade da água oferece ao atravessamento dos canais capilares que configuram a dita estrutura zeolítica do material.

ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO

Os ensaios de permeabilidade ao oxigénio foram conduzidos com o permeâmetro de Leeds, que foi também usado nos ensaios referidos acima, conforme indicado no Cap. 2.

Os resultados deste importante ensaio são apresentados nos Quadros 7.10. e 7.11. Os ensaios de permeabilidade à água, aos gases (oxigénio) e à migração do ião cloro constituem, na tecnologia do betão, uma baliza importante para a obtenção de adequadas condições de durabilidade, principalmente pelo efeito que podem ter na corrosão das armaduras no betão armado [87].

Quadro 7.10. – Ensaios de Permeabilidade ao Oxigénio (geobetão)

Referência Geobetão										K [m²]
ID Provete	L [cm]	D [cm]	A [m²]	P [bar]	D_{pip} [mm]	T_{est} [min]	t_{fluxo} [s]	$t_{méd}$ [s]	v [cm³/s]	
MK – A	3,90	4,83	0,0018322	3,2	10	30	35,01 34,87 34,89	34,92	2,25E-07	2,09E-22
MK – B	3,91	4,83	0,0018322	3,0	10	30	31,02 31,04 32,52	31,53	2,49E-07	2,68E-22
MK – C	3,91	4,83	0,0018322	3,1	10	30	32,06 33,05 32,98	32,70	2,40E-07	2,41E-22

Quadro 7.11. – Ensaios de Permeabilidade ao Oxigénio (betão)

Referência Betão										K [m²]
ID Provete	L [cm]	D [cm]	A [m²]	P [bar]	D_{pip} [mm]	T_{est} [min]	t_{fluxo} [s]	$t_{méd}$ [s]	v [cm³/s]	
B – I	3,94	4,83	0,0018322	3,0	10	30	90,01 89,85 90,04	89,97	0,87E-07	0,95E-22
B – II	3,97	4,85	0,0018475	3,1	10	30	74,10 74,25 74,30	74,22	1,06E-07	1,07E-22
B – III	3,95	4,84	0,0018398	3,1	10	30	81,25 79.86 80.29	80,47	0,98E-07	0,98E-22

Os ensaios de permeabilidade ao oxigénio foram realizados sobre 3 provetes de cada um dos materiais em análise. De novo se regista uma permeabilidade aos gases maior no geobetão, no decurso da microporosidade que apresenta e que se põe em evidência quando, como é o caso, o fluido é submetido a pressão para atravessar o material. A permeabilidade no betão CPN, comparando o valor médio dos provetes, é 2.4 vezes inferior à do geobetão.

Poderá dizer-se que o geobetão tem um comportamento sensível à penetração dos fluidos quando está em jogo uma pressão superior à atmosférica. Nas condições ambientais de pressão atmosférica o geobetão parece exibir melhor comportamento que o correspondente tipo de betão de CPN em virtude de uma menor porosidade macroscópica (chamando macroscópica àquela porosidade para a qual deixam de fazer-se sentir os efeitos da sucção capilar).

7.3.2. Ataques Químicos

ATAQUE PELOS ÁCIDOS

O ensaio normalizado envolve a resistência ao ataque do ácido sulfúrico, que se traduz numa perda de massa mais ou menos pronunciada consoante a intensidade do ataque. Por essa razão, os provetes são pesados inicialmente a seco, com a precisão da centésima da grama, voltando, no fim do ensaio, a ser sujeitos a pesagem, após secagem controlada em estufa e retirada de todo o material solto ou destacável. As massas iniciais dos provetes são as seguintes (Quadro 7.12.):

Quadro 7.12. – Ataque pelo H_2SO_4 (massas iniciais)

Geobetão	*Massa inicial*	*Betão*	*Massa Inicial*
A	557.90 gr	I	566.14 gr
B	564.75 gr	II	565.38 gr
C	554.08 gr	III	564.01 gr

e as massas finais dos provetes as indicados no Quadro 7.13.:

Quadro 7.13. – Ataque pelo H_2SO_4 (massas finais)

Geobetão	*Massa Final*	*Betão*	*Massa Final*
A	545.46 gr	I	419.82 gr
B	552.31 gr	II	483.40 gr
C	540.13 gr	III	441.52 gr

de onde resultam as perdas de massa indicadas nos Quadros 7.14. e 7.15.

- Perda de massa do ***geobetão*** (%)

Quadro 7.14. – Perda de Massa (geobetão)

A	*B*	*C*	*Média*
2.23	2.20	2.52	**2.32**

- Perda de massa do ***betão*** (%)

Quadro 7.15. – Perda de Massa (betão)

I	*II*	*III*	*Média*
25.85	14.50	21.72	**20.69**

As perdas são no geobetão muito ligeiras (2.32% em média) quando comparadas com a perda média do betão (mais de 20%), como se pode ver na Fig. 7.6.

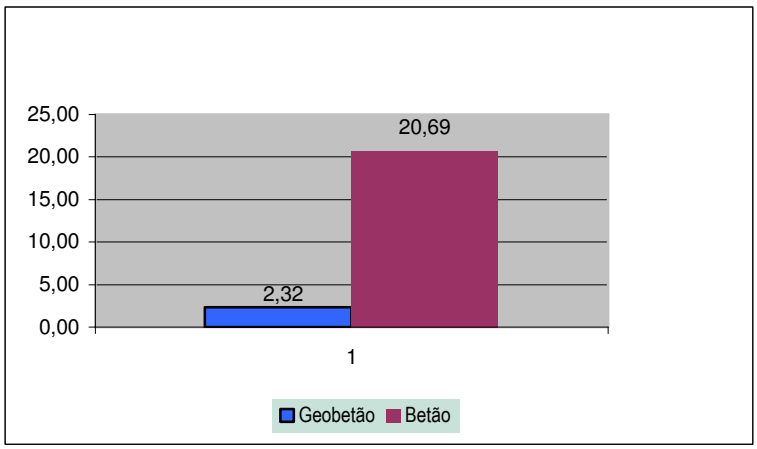

Fig. 7.6. – Perda de Massa

A perda de massa entre geobetão e betão de CPN, numa razão superior a 1 para 8, poderá decorrer da presença de cálcio nos betões de CPN, onde este elemento alcalino-terroso se encontra associado ao silício e ao alumínio sob a forma de silicatos e aluminatos de cálcio, cuja estabilidade se encontra dependente da manutenção de um ambiente fortemente alcalino [22]. O ataque ácido produz uma acção de neutralização do meio básico com redução imediata do pH e logo a criação de condições locais de instabilidade nos silicatos e aluminatos cálcicos que sofrem decomposição e alteração química. Reagindo logo de seguida com os ácidos, formam-se sais mais ou menos solúveis, sendo o processo de corrosão tanto mais forte quanto mais solúvel for o sal de cálcio que vier a formar-se.

Daí o processo degradativo que se verifica no betão, enquanto que o geobetão, praticamente sem cálcio, sofre apenas um desgaste mínimo.

Fig. 7.7 – Provete de Geobetão após Ataque pelo H_2SO_4

As Figs. 7.7. e 7.8. mostram o aspecto dos provetes de geobetão e de betão de CPN após o ensaio de ataque ácido. Também a Fig. 7.9. documenta o conjunto dos provetes ensaiados onde se podem perceber as diferenças entre uns e outros.

Fig. 7.8. – Provete de Betão após Ataque pelo H_2SO_4

Fig. 7.9. – Ataque pelos Ácidos, Vista Conjunta dos Provetes

A análise visual dos provetes é um dos aspectos importantes deste ensaio. O betão, ao longo do tempo de ensaio, demonstrou claramente a sua progressiva fragilidade. As arestas, mais ou menos lentamente, perderam a sua forma rectilínea, tomando um aspecto granulado e disforme. No que se refere ao geobetão, ao longo de todo o ensaio o provete manteve um aspecto bastante similar ao inicial.

As fotografias são ilustrativas do sério desgaste sofrido pelo betão, enquanto o geobetão aparenta manter a sua estabilidade estrutural, ainda que manifeste um ligeiro desgaste superficial. Estas situações podem ocorrer na sequência de derrames de produtos químicos agressivos, ou eventualmente em situações de chuvas ácidas, onde a concentração é obviamente muito menor mas a acção é continuada no tempo.

Após a exposição ao ácido, ambas as séries de provetes (de geobetão e de betão) foram submetidas a ensaios de compressão simples para avaliar o seu comportamento mecânico. Os valores obtidos foram comparados com as resistências obtidas inicialmente.

Quadro 7.16. – Resistências Iniciais e Finais

	$R_{inicial}$ (MPa)	R_{final} (MPa)	Perda em %
Geobetão	64.40	55.80	**13.35%**
Betão CPN	49.31	9.62	**80.40%**

É de assinalar o excelente comportamento do geobetão, que experimenta, em condições agressivas, uma quebra relativamente ligeira na resistência mecânica à compressão simples da ordem dos 13,4%, enquanto nas mesmas condições os provetes de betão sofrem uma perda severa, perdendo mais de 80% da sua resistência inicial (Fig. 7.10.).

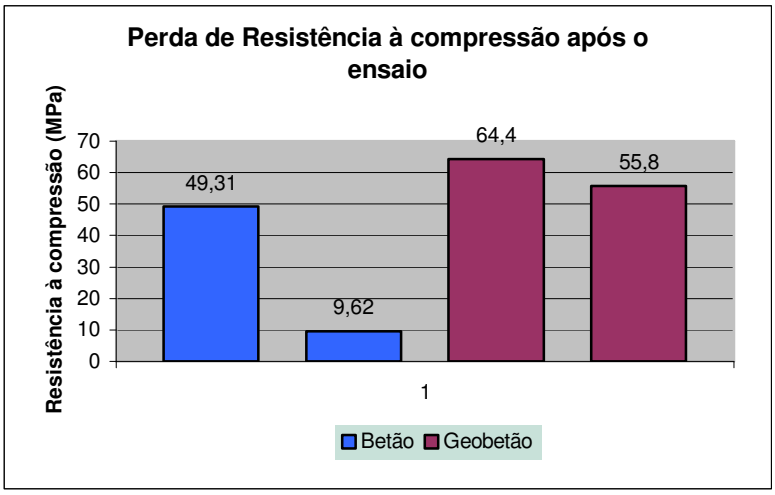

Fig. 7.10. – Perda de Resistência Mecânica

O ensaio de ataque pelos ácidos foi repetido em soluções a 10% de ácido sulfúrico e também de ácido clorídrico e ácido nítrico. O procedimento foi diferente do estabelecido na norma ASTM, tendo-se imergido os provetes nas soluções ácidas durante 30 dias. Os resultados do Quadro 7.17. confirmam o bom comportamento do geobetão em relação aos provetes de betão convencional.

Quadro 7.17. – Ataque Ácido durante 30 dias

	H_2SO_4		HNO_3		HCl	
	Geo	CP	Geo	CP	Geo	CP
Massa inicial	76.594	73.885	75.473	74.233	67.182	74.586
Massa após desgaste	70.938	32.210	66.854	61.767	59.016	60.951
% perda de massa	**7.4**	**56.4**	**11.4**	**16.8**	**12.2**	**18.3**

As duas Figuras seguintes (7.11. e 7.12.) são ilustrativas do comportamento dos dois materiais, sendo particularmente evidente a fragilidade do betão CPN após os ataques dos ácidos sulfúrico e clorídrico.

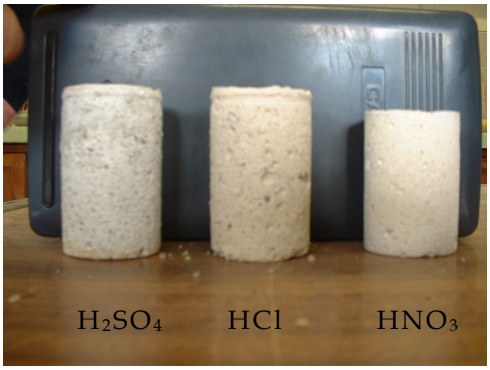

Fig. 7.11. – Ataque Ácido – GB

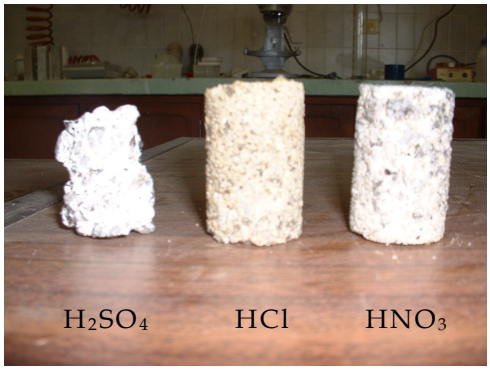

Fig. 7.12. – Ataque Ácido - CPN

O geobetão apresenta um comportamento superior ao do betão, mau grado o agravamento das condições de agressividade, com perdas ligeiras e essencialmente superficiais, enquanto que o betão perde mais de metade da sua massa no ataque pelo ácido sulfúrico.

Em relação ao ataque dos outros ácidos, as perdas do betão são menores, mas marcadas pela profundidade do desgaste: os agregados ficam mais descobertos e verifica-se perda de continuidade superficial da matriz ligante.

MIGRAÇÃO DO IÃO CLORO

Os ensaios foram realizados conjuntamente sobre provetes de argamassa geopolimérica, de geobetão e de betão de CPN. Os Quadros 7.18., 7.19. e 7.20. apresentam o conjunto de resultados para cada um dos diferentes materiais. Relativamente aos geopolímeros (argamassa geopolimérica e geobetão), verificou-se uma dificuldade de leitura da profundidade de penetração dos cloretos após a aplicação do nitrato de prata, pelo que só são considerados dois resultados em vez de três.

Quadro 7.18. –Migração do Ião Cloro – Arg. Geopolimérica

Prv	D [mm]	h [mm]	U [V]	T_i [ºC]	T_f [ºC]	t(h)	Profundidade de Penetração de Cloretos [mm]							$L_{Média}$	D_{NSSM} [m²/s] X10^{-12}
							L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7		
A	105	50	30	13	42	2	29,8	30,2	31,4	31,8	30,1	32,2	31,9	31,06	179,5
B	105	50	30	13	45,5	2	27,8	28,9	29	29,8	32,1	32,2	31,7	30,21	175,3

Quadro 7.19. –Migração do Ião Cloro – Geobetão

Prv	D [mm]	h [mm]	U [V]	T_i [ºC]	T_f [ºC]	t(h)	Profundidade de Penetração de Cloretos [mm]							$L_{Média}$	D_{NSSM} [m²/s] X10^{-12}
							L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7		
B	100,7	49,1	30,0	14,0	40,6	1,5	42,0	38,0	41,0	39,0	38,0	41,0	-	39,83	304,6
C	99,9	48,6	30,0	14,2	41,1	1,5	28,0	25,0	27,0	25,0	29,0	30,0	-	27,33	203,1

Quadro 7.20. – Migração do Ião Cloro – Betão CPN

ID Prv	D [mm]	h [mm]	U [V]	T_i [ºC]	T_f [ºC]	t(h)	Profundidade de Penetração de Cloretos [mm]							$L_{Média}$	D_{NSSM} [m²/s] X10^{-12}
							L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7		
A	99 ,9	48,7	30,0	13,9	41,2	2,0	30,0	17,0	23,0	22,0	17,0	20,0	-	21,50	118,5
B	100,7	49,1	30,0	14,1	41,6	2,0	15,0	13,0	17,0	15,0	12,0	15,0	-	14,50	78,2
C	99,9	48,6	30,0	13,1	41,3	2,5	9,0	12,0	14,0	8,0	13,0	17,0	-	12,17	51,3

Como facilmente se verifica, a migração do cloro é por ordem decrescente de maior valor no geobetão, depois na argamassa geopolimérica e finalmente no betão de CPN. Em termos médios o valor de D_{NSSM} no geobetão é 3.07 vezes maior do que no betão e na argamassa geopolimérica é 2.14 vezes maior do que neste.

Este resultado era de certo modo esperado, principalmente quando os provetes são submetidos à acção de um gradiente (no caso, uma diferença de potencial eléctrico) que actua como agente impulsionador do processo.

7.3.3. Ensaios de Desgaste e Abrasão

ENSAIO DE LOS ANGELES

Os resultados estão indicados no Quadro 7.21. A fotografia da Fig. 7.13. mostra o aspecto final (às 1000 rotações) dos cubos de geobetão. Os cubos de betão ficaram praticamente reduzidos a pó.

O gráfico da Fig. 7.14. apresenta a evolução dos resultados do ensaio de desgaste às diferentes rotações.

Quadro 7.21.– Desgaste Los Angeles (%)

Revoluções→	*100*	*200*	*300*	*400*	*500*	*600*	*700*	*800*	*900*	*1000*
Arg.Geopol.	5,9	10,4	15	18,5	21,8	24,8	27,8	30,7	33,6	36,5
Geobetão	6,1	10,1	14,4	17,8	20,8	23,6	26,5	29,2	31,7	34,1
Betão CPN	8,6	16,8	25,6	36	49,5	61,7	73,4	83,9	91,6	97,2

Fig. 7.13. – Geobetão (Ensaio de Los Angeles)

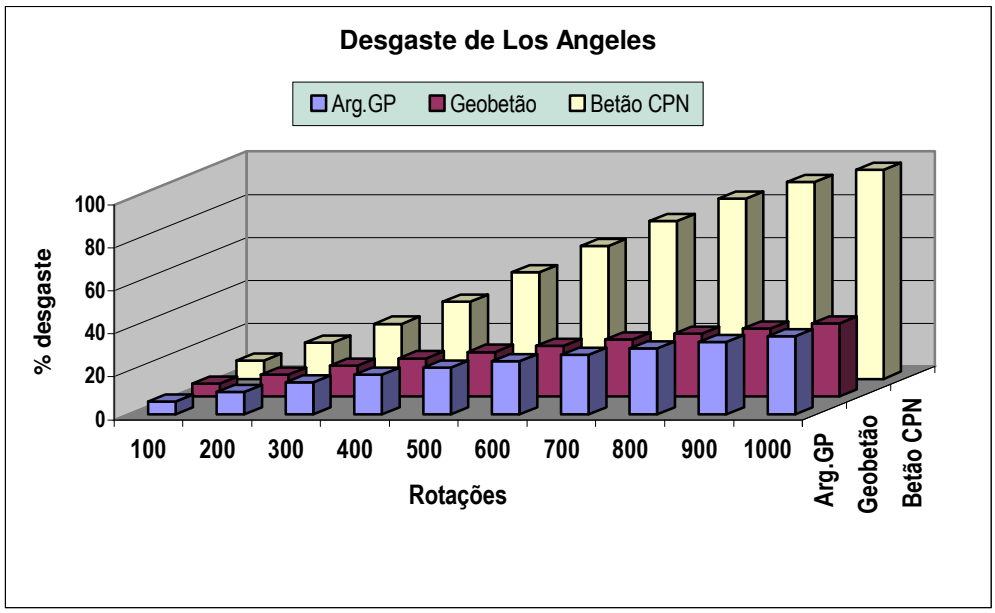

Fig. 7.14. – Percentagem de Desgaste

Enquanto as argamassas geopoliméricas e o geobetão apresentam uma evolução nas condições de desgaste muito semelhante com perdas finais de massa às 1000 rotações da ordem dos 35%, o betão de CPN sofre um desgaste mais acentuado, chegando às 1000 rotações praticamente desfeito em pó. Numa fase

intermédia, ou seja, às 500 rotações, já o betão de CPN tinha perdido quase metade da massa inicial (49.5%) enquanto que os dois materiais geopoliméricos tinham perdido apenas 20% da massa inicial. Desta forma, quer o geobetão como a argamassa geopolimérica parecem apresentar elevada resistência ao desgaste físico continuado, evidenciado características de comportamento que favorecem as aplicações mais exigentes, tais como o desgaste de camadas superficiais de pavimentos, protecção contra a acção mecânica da ondulação, de águas carregadas com partículas sólidas e outras.

ENSAIO DE GELO-DESGELO

Os resultados estão resumidos no Quadro 7.22. e a Fig. 7.15. mostra o aspecto geral dos provetes após a secagem final (último ciclo do ensaio).

Quadro 7.22. – Ensaios de Gelo-Desgelo

	C. Portland			*Geobetão GB*			*CBD*		
	1	2	ref	1	2	ref	1	2	ref
P.Inicial	612.1	620.2	**609.3**	594.5	596.9	**588.9**	541.9	531.4	**534.1**
P.Final	584.1	590.2	**608.5**	587.6	590.1	**587.6**	536.8	527.5	**532.4**
Perda de Massa(%)	-4.57	-4.84	**-0.1**	-1.16	-1.14	**-0.2**	-0.94	-0.73	**-0.3**
Flexão (MPa)	6.10	6.75	**5.96**	6.08	6.29	**8.37**	7.58	8.00	**7.10**
Compressão (MPa)	33.5	31.25	**30.59**	49.5	45.25	**48.78**	43.31	40.19	**34.44**

Os provetes indicados como referência foram provetes não sujeitos ao ensaio. A perda de água ligeira que eles experimentam e que se indica é comum a todos os provetes sujeitos a processos de cura, mesmo nas melhores condições de protecção.

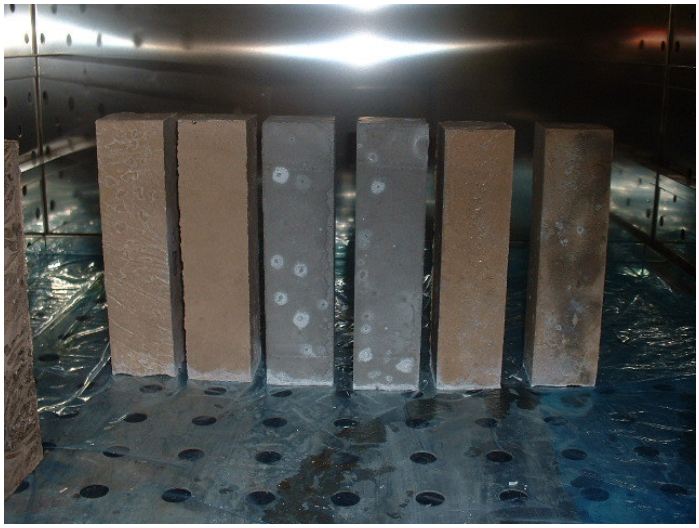

Fig. 7.15. – Provetes de Argamassa, Betão CPN e Geobetão

No betão de CPN regista-se um pequeno aumento (cerca de 6%) das resistências à compressão simples e mesmo em tracção (o que é um pouco surpreendente, pois a possível ocorrência de micro-fissuração interna deveria afectar em primeiro lugar a resistência à tracção). Enquanto na argamassa geopolimérica o efeito é semelhante, sendo mais marcado o aumento da resistência à compressão (cerca de 21% se se tomar a média dos dois provetes ensaiados), o geobetão experimenta uma pequena quebra de perto de 3% na compressão e de 26% na tracção. O comportamento do geobetão segue o modelo previsível em que a expansão provocada pela formação de cristais de sulfato de magnésio gera micro-fissuração interna com afectação das resistências mecânicas.

Em relação aos outros dois materiais, uma explicação que parece plausível é que os cristais de sulfato de magnésio não criaram tensões internas pelo facto de terem espaço para se expandirem. Como se viu atrás, o betão de CPN usado neste ensaio mostrou-se algo poroso e, portanto, é de admitir que se tenha verificado uma situação como a referida. Já nos provetes de argamassa geopolimérica, de que não se determinou a porosidade, é de presumir que se tenha registado um efeito semelhante. Deste modo, e na medida em que vieram a ocupar espaços vazios,

poderá dizer-se que foi benéfica nestes dois materiais a presença de sulfato de magnésio e daí o aumento que se verificou nas resistências mecânicas.

No geobetão, menos poroso do ponto de vista macroscópico, a possível entrada da solução de sulfato de magnésio por poros de menor dimensão, terá dado lugar à diminuição das resistências devido à expansão provocada.

ENSAIO DE MOLHAGEM-SECAGEM

Os resultados dos ensaios relativos a 20 ciclos de molhagem-secagem são apresentados no Quadro 7.23.

Quadro 7.23. – Molhagem-Secagem

	C.Portland			*Geobetão GB*			*CBD*		
	1	2	ref	1	2	ref	1	2	ref
M. Inicial	581,0	575,7	**567,0**	575,7	533,7	**547,9**	496,2	496,3	**499,2**
M. Final	585,4	579,1	**566,7**	529,1	520,6	**547,6**	490,8	490,2	**499,3**
Dif. de Massa (%)	+0,7	+0,6	**~0,0**	-8,1	-2,5	**~0,0**	-1,1	-1,2	**~0,0**
Flexão (MPa)	5,63	5,11	**5,56**	3,02	2,80	**5,31**	7,64	8,12	**11,78**
Compressão (MPa)	42,17	40,99	**27,59**	40,48	40,08	**39,13**	42,76	44,50	**39,75**

A realização de 20 ciclos de ensaio teve apenas em consideração o tempo disponível para a efectivação do ensaio, que é algo demorado. No entanto, como o ensaio apenas visa a comparação entre os diferentes materiais e não a determinação de um padrão absoluto de comportamento, a sua realização é aceitável. Os efeitos do ensaio no comportamento dos materiais não deixam de se revelar de uma forma mais ou menos evidente, sobretudo em termos da resistência à tracção. De facto, as microfissuras que poderão ter ocorrido na sequência do ensaio afectam essencialmente a tracção e não a compressão simples que tende a fechar as fissuras abertas.

Os resultados mostram que o geobetão é sensível a este ensaio, com uma diminuição de cerca de 45% na resistência à tracção, enquanto na compressão simples se regista até uma muito ligeira subida. Na argamassa geopolimérica a quebra na resistência à tracção é ainda significativa (33%), sendo de quase 10% o aumento da resistência à compressão. Finalmente, no betão de CPN a perda de capacidade resistente à tracção é mínima (cerca de 3.5%) e na compressão regista-se um valor muito baixo no provete de referência (a vermelho no Quadro), muito abaixo da média de valores que se obtiveram no mesmo material nos outros ensaios. Não parece aceitável este valor, pelo que, apesar de se apresentar, não é considerado significativo. De todas as formas, os valores à compressão são muito semelhantes aos obtidos nos dois outros materiais.

É de referir que os provetes aumentaram de massa (ainda que de forma mínima), enquanto os materiais geopoliméricos perderam de 0.23 a 1% de massa, com menor desempenho no geobetão.

ENSAIO DE CHOQUE TÉRMICO

Finalmente, dentro do conjunto de ensaios com ciclos repetidos, foram testados provetes dos mesmos materiais, a acções consecutivas de choque térmico (cambiante alternada e brusca de temperatura, sem intervenção da água), conforme está referido no Cap. 2. No Quadro 7.24. são referidos os resultados deste ensaio.

Quadro 7.24. – Choque Térmico

	C.Portland			*Geobetão GB*			*CBD*		
	1	2	ref	1	2	ref	1	2	ref
M. Inicial	600,3	592,8	**567,0**	585,2	578,4	**547,9**	524,4	531,6	**499,2**
M. Final	592,9	585,2	**566,7**	547,6	545,9	**547,6**	501,8	511,5	**499,3**
Dif. de Massa (%)	-1.23	-1,28	**~0,0**	-6,42	-5,79	**~0,0**	-4,31	-3,78	**~0,0**
Flexão (MPa)	6,10	6,02	**5,56**	4.03	3.91	**5.31**	6,23	6,67	**11,78**
Compressão(MPa)	48,89	48,29	**27,59**	55,03	54,53	**39.13**	40,42	39,90	**39,75**

Deve começar por referir-se que todos os provetes perderam massa no processo, uns mais do que outros. O betão de CPN foi o que menos perdeu, enquanto que quem perdeu mais massa foi o geobetão. Todavia, as perdas podem ser consideradas ligeiras (de 5.8% a 6.4%).

No que diz respeito às resistências, verifica-se que o betão CPN apresenta no final do ensaio valores altos da resistência à compressão (o valor de referência, o mesmo que no ensaio anterior, também não é considerado por se considerar muito baixo), acima da média de 45 MPa obtidos nos ensaios anteriores. Em tracção regista-se uma subida razoável em relação ao valor de referência (este parece aceitável) da ordem dos 9%. No geobetão regista-se quebra acentuada da resistência à tracção (mais de 25%) mas na compressão simples obtém-se ganhos importantes (40%). Na argamassa geopolimérica verifica-se uma perda de mais de 45% na resistência à tracção e um ganho muito ligeiro na compressão.

Estes resultados parecem evidenciar que os materiais geopoliméricos são muito sensíveis às variações bruscas de temperatura, perdendo massa e capacidade mecânica de uma forma que ainda não foi possível explicar.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA ÀS ALTAS TEMPERATURAS

A partir de uma determinada temperatura, não muito alta, o betão de CPN começa a experimentar problemas de desidratação, perdendo a água de constituição. Como é sabido, os processos de endurecimento presentes no betão resultam da hidratação dos silicatos e dos aluminatos. A partir sensivelmente dos 400ºC de temperatura [22], porém, começa a verificar-se a desidratação do hidróxido de cálcio, processo que se alarga depois aos silicatos e aluminatos e que culmina com a transformação final do ligante em pó. A 900ºC essa transformação está praticamente concluída.

Os resultados finais, apresentados no Quadro 7.25., mostram que os agregados têm uma importância decisiva na medida em que são eles que condicionam o comportamento do material debaixo da acção da temperatura. Por isso devem ser escolhidos agregados que apresentem um comportamento estável a temperaturas elevadas. O Quadro mostra os resultados conseguidos com agregados correntes.

Quadro 7.25. – Ensaios à Temperatura (900ºC) – Geobetão

	Granito	*Calcário*	*Mat.Cerâmico*	*Mat.Porcelânico*
REFERÊNCIA:				
Massa inicial	586.5 gr	574.6 gr	485.3 gr	532.2 gr
Massa Final	-	-	-	-
Compressão	40.66MPa	40.94MPa	35.13 MPa	48.91 MPa
Tracção	7.14 MPa	8.78 MPa	5.27 MPa	7.63 MPa
ENSAIOS:				
Massa Inicial	599.9 gr	583.4	457.2 gr	530.6 gr
Massa Final	534.6 gr	540.3	382.7 gr	487.0 gr
Compressão	11.04MPa	4.13 MPa	(a)	6.22 MPa
Tracção	2.26 MPa	0.14 MPa	(a)	0.68 MPa

(a) – Sem resistência estrutural

Não se apresentam os resultados relativos ao betão de CPN fabricado com os mesmos tipos de agregados, porque os provetes perderam totalmente a sua integridade estrutural reduzindo-se literalmente a pó, não sendo mesmo possível retirá-los da fornalha.

O quartzo, presente nos agregados graníticos, apresenta duas formas polimorfas, uma de baixa temperatura, o quartzo **α**, e outra de alta temperatura, o quartzo **β**, processando-se a alteração de uma para outra a 573ºC. Essa alteração dá lugar a um aumento de volume de cerca de 0,85%, que provoca fendilhação nos

corpos em que o quartzo está presente. Essa alteração volumétrica soma-se à dilatação que está associada aos corpos aquecidos. Portanto, a utilização dos agregados graníticos fica de alguma forma limitada à partida a temperaturas inferiores ao ponto de viragem referido. Todavia, mesmo apesar desta limitação, regista-se o facto de o geobetão com agregados graníticos ainda possuir alguma resistência à compressão (cerca de 11 MPa) e, o que parece um pouco inesperado, uma apreciável resistência à tracção (2.26 MPa).

Fig. 7.16. – Geobetão com Granito (após ensaio)

A Fig. 7.16. mostra um provete com agregados graníticos após ensaio de flexão. O ligante, que também sofre desidratação pela perda da água de constituição adquirida no processo de geopolimerização, passa a ter uma cor de tijolo mais ou menos carregada, enquanto que os agregados graníticos parecem esfarelar-se facilmente debaixo da pressão dos dedos. A desidratação parcial do ligante poderá explicar a perda de massa registada em todos os tipos de provetes, ainda que possam ter-se verificado perdas mais significativas nos casos em que o próprio agregado continha água no seu interior.

A utilização de agregados calcários põe em causa a ocorrência dos processos de calcinação (transformação do carbonato de cálcio em dióxido de carbono e óxido de cálcio) que começam a verificar-se nos calcários mesmo antes

dos 800ºC. Esta circunstância tem óbvios reflexos no comportamento dos betões, na medida em que provoca diminuições de volume importantes. Por tal motivo, os agregados calcários poderão ser usados até ao início do processo de calcinação, mas a partir daí verifica-se uma quebra assinalável de resistência, ainda mais efectiva do que a registada com os agregados de granito.

O recurso que neste trabalho se fez a materiais de natureza cerâmica teve como ideia mestra o emprego de materiais que, na sequência de processos de formação ou de fabrico em que a temperatura tivesse um papel importante, pudessem assumir um conveniente comportamento refractário. Deste modo, poder-se-ia dispor de boas condições para a sujeição do geobetão à acção da temperatura.

Foram usados dois tipos de materiais cerâmicos - os porosos (tijolos e telhas, com alguma capacidade de retenção de água) e os mais densos, a que se deu o nome de porcelânicos, com uma reduzida capacidade de reter água.

Os resultados obtidos com o material cerâmico mostram extensa fendilhação e afectação quase total da integridade estrutural. Pensa-se que o processo está associado à capacidade de retenção de água por parte do agregado cerâmico, que se liberta em fase posterior, não havendo interesse em submeter os provetes a uma secagem prévia, porque em qualquer momento se poderia verificar a reabsorção.

Os resultados iniciais com os agregados porcelânicos foram muito fracos, face ao esperado, mas uma análise visual mais detalhada deu indicações de que a redução da capacidade mecânica poderia ter ficado a dever-se a um comportamento térmico desigual entre o agregado e a pasta ligante. No sentido de obviar a heterogeneidade provocada pelos agregados de maior dimensão, que ficam sujeitos a dilatação por aquecimento de um modo diferente do que se

verifica na matriz, foi o agregado porcelânico reduzido a pó no moinho de bolas e fabricados provetes em argamassa geopolimérica.

O Quadro 7.26. apresenta os resultados obtidos nos ensaios com os agregados porcelânicos moídos, submetidos a diferentes temperaturas, registando-se a perda de massa e os valores das resistências mecânicas nos provetes de referência e nos provetes ensaiados. A composição de argamassa usada neste ensaio foi a composição CBB.

Quadro 7.26. – Ensaio à Temperatura - Material Porcelânico em Brita e em Pó

Razão Si/Al=1	*Geobetão*				*Argamassa Geopolimérica*			
	500ºC	**750ºC**	**900ºC**	**Refª.**	**500ºC**	**750ºC**	**900ºC**	**Refª.**
Massa Inicial	536.9	530.4	530.6	532.2	510.6	507.5	517.2	517.2
Massa Final	510.9	507	487.0	-	479.3	476.1	499.2	-
Variação (%)	-4.84%	-4.44%	-8.22%	-	-6.13%	-6.19%	-3.48%	-
Tracção (MPa)	-	1.65 *(78.4%)*	0.68 *(91.1%)*	7.63	-	1.86 *(75.7%)*	1.26 *(83.6%)*	7.67
Compr. (MPa)	21.63 *(55.8%)*	14.57 *(70.2%)*	6.22 *(87.3%)*	48.91	43.25 *(18.2%)*	41.78 *(21%)*	32.54 *(38.5%)*	52.88

Entre parêntesis estão indicadas as percentagens de perda de resistência. Verifica-se que o geobetão perde progressivamente resistência em tracção e em compressão à medida que a temperatura passa dos 500 aos 700 e desta aos 900ºC, onde a resistência quase se anula. Em relação à argamassa, fabricada com o agregado cerâmico em pó, já se regista uma evolução mais positiva, pois as perdas de resistência em compressão são muito menores, sendo notável que aos 900ºC, temperatura a que os provetes estiveram sujeitos durante 2 horas, o provete com

agregado porcelânico moído ainda manteve mais de 60% da sua capacidade mecânica.

Em tracção o comportamento é fortemente afectado em qualquer dos casos considerados, parecendo que o processo de desidratação que o geopolímero experimenta a altas temperaturas tem muita importância na quebra de comportamento mecânico.

Parece assim dispor-se de um processo de enfrentar um quadro severo de exposição à temperatura (900ºC durante 2 horas foi a situação mais gravosa que foi estudada), com materiais geopoliméricos capazes de conservar ainda mais de 60% do seu comportamento mecânico em compressão. Este resultado assume particular interesse quando nas mesmas condições o betão de CPN experimentou o colapso total.