

Fig. 1 - Evolução do aumento de temperatura global média com o nível de concentração de CO₂ atmosférico [1]

2.A economia do carbono

Em 1997 os países signatários do Protocolo de Quioto [2], assumiram o compromisso de no seu conjunto reduzirem até 2012, as suas emissões de gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa (GEE), em 5,2% relativamente ao nível de emissões no ano base de 1990. Tendo como objectivo estabilizar no ano 2012 os níveis de CO₂ nos 550 ppm, por forma a que a temperatura global média da Terra não exceda 2° C acima dos níveis pré-industriais. Tendo em conta que existe uma elevada similaridade entre a evolução da temperatura na Terra e o aumento da concentração de CO₂ (ver Fig. 1) a título de exemplo refira-se que, no início do século 18 o nível de concentração de CO₂ era de 280 ppm.

Nessa sequência a Comunidade Europeia, estabeleceu como meta reduzir as suas emissões de GEE em 8%, cabendo a cada país diferentes metas individuais no âmbito do Acordo de Partilha de Responsabilidades (burden sharing agreement).

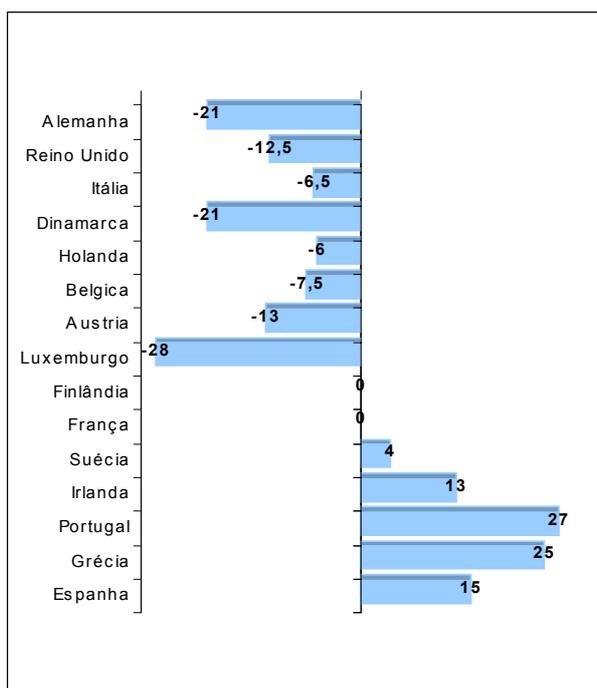


Fig. 2 – Metas de emissão de GEE em %, previstas para o ano 2012 relativamente ao ano base de 1990 [3]

Na Fig.2 pode ver-se que alguns países terão de reduzir substancialmente os seus níveis de emissões enquanto outros podem mesmo aumentá-las, como é o caso de Portugal que pode apresentar em 2012, um nível de emissões de GEE, 27% superior ao apresentado em 1990, o que representa o maior aumento percentual de todos os países da EU-15.

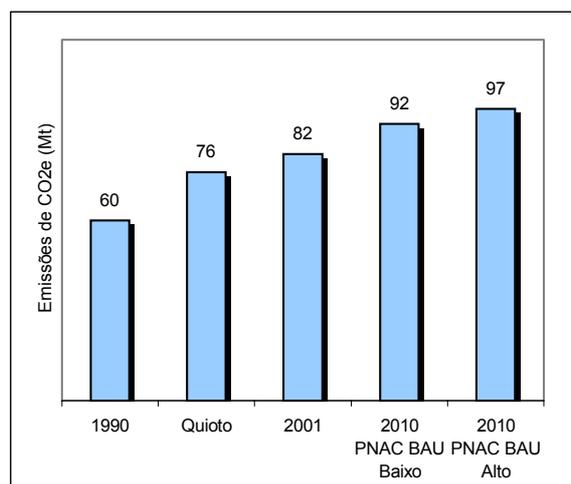


Fig. 3 – Evolução das emissões de CO₂e em Portugal relativamente à meta do protocolo de Quioto [4,5]

Sendo o nível de emissões de CO₂e (que inclui todos os gases GEE) em 1990 de 60 milhões de toneladas (Mt) anuais, a meta individual para Portugal, de emissões para o ano 2010, significa um tecto máximo de 76 Mt, contudo em 2001 o nível de emissões de CO₂e, já tinha atingido as 82 Mt, ou seja 36% acima do máximo permitido pelos compromissos assumidos (ver Fig.3).

De acordo com o Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC) as previsões de evolução das emissões num cenário Business As Usual (BAU), isto é sem medidas de redução resultaria num aumento entre 54 a 63% face ao ano de referência de 1990, ou seja na necessidade de redução entre 16 a 21 Mt CO₂e, para assegurar o cumprimento dos compromissos assumidos no âmbito da aplicação do Protocolo de Quioto. Para esse efeito Portugal conta poder recorrer a um conjunto de políticas de redução que incorporam um cenário designado de referência, bem

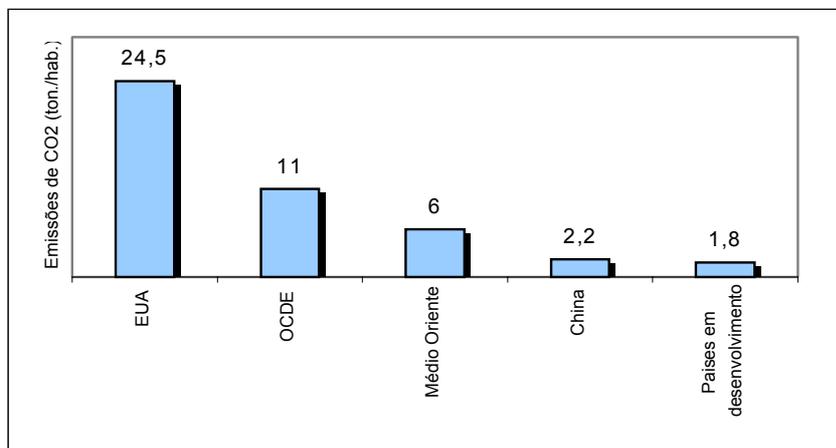


Fig. 4 – Emissões de CO₂ per capita [1]

como outras medidas adicionais e também ao Comércio Europeu de Licenças de emissões (CELE), aprovado pela Directiva nº 2003/87/CE [6], relativa à criação de um regime de comércio de licenças de emissão de GEE, que se insere nos mecanismos de flexibilidade previstos no Protocolo de Quioto e pretende ligar o mercado europeu de emissões, às políticas de combate às alterações climáticas dos países em desenvolvimento. Trata-se do primeiro regime internacional de comércio de emissões de CO₂ do mundo, cobrindo cerca de 12000 empresas que representam cerca de metade das emissões europeias de CO₂. Nessa sequência coube a cada país a responsabilidade da apresentação de um plano de atribuição de licenças de emissão de CO₂ para o período 2005-2007 (PNALE) [7].

O PNALE, abrange 220 empresas responsáveis por 44% do total de emissões de CO₂ e previa uma distribuição de licenças gratuitas para o período 2005-2007 de 116,7 Mt, (38,9 Mt/ano), ver Tabela 1, atente-se no peso do sector dos cimentos e cal, que representou 19% das emissões dos sectores considerados em 1999. No entanto em Outubro de 2004, a UE considerou que o PNALE Português punha em causa o cumprimento dos objectivos do Protocolo de Quioto, tendo acordado com Portugal um

Tabela. 1 – PNALE - proposta preliminar de atribuição de licenças por sector para 2005-2007 [7]

Actividade	Emissões 2002	Licenças 2005-2007	% vs. 2002
Centrais termoeléctricas	21.887.725	21.248.469	-2,9
Refinação	2.888.988	3.032.404	5,0
Cogeração	2.045.464	2.462.007	20,4
Outras inst. combustão	497.821	565.629	13,6
Metais ferrosos	201.789	340.587	68,8
Cimentos e cal	7.123.561	7.041.375	-1,2
Vidro	640.878	662.063	3,3
Cerâmica	888.384	940.103	5,8
Pasta de papel	317.502	339.447	6,9
Σ sectores antes ajust.	36.492.112	36.632.084	0,4
Factor de ajustamento		1,011	1,1
Σ sectores após ajust.		37.040.342	1,5
Reserva novos entrantes		1.874.489	5,1
Total de licenças		38.940.517	6,7

tecto de reduções de 0,7 Mt/ano ou seja um total de 2,1Mt, para o período 2005-2007, baixando para 114,5 Mt o total de emissões gratuitas para o período considerado.

Na sequência do comércio de emissões, a partir de 1 de Janeiro de 2005 as empresas em causa, terão que manter um registo das suas emissões e no final de cada ano um relatório de emissões que será auditado por terceiros. Ao mesmo tempo as empresas terão que assegurar que dispõem de um número de licenças suficiente correspondentes às suas emissões efectivas para devolver anualmente (a primeira devolução ocorrerá no fim de Abril de 2006) [8], por forma a não serem objecto de sanções financeiras. Para evitar essa situação as empresas podem optar por reduzir o seu nível de emissões através de estratégias de produção mais limpa (PML) ou em alternativa irem comprar ao mercado de emissões as licenças em falta.

Em 9 de Março de 2005, as licenças de emissão de CO₂ estavam a transaccionar nos 10,7 euros por tonelada métrica, contudo é previsível que esse valor tenha tendência para subir no futuro, havendo inclusive alguns cenários que apontam para valores entre 23 a 38 euros por tonelada de CO₂. Cenários esses que não podem ser considerados irrealistas, já que os países desenvolvidos representando somente 20% da população mundial foram responsáveis em 1999 por 51% das emissões globais de CO₂. Em termos de emissões per capita os países da OCDE têm um valor de emissão de GEE de 11 ton/hab que é 6 vezes o valor médio das emissões dos países em desenvolvimento (figura 4). Logo a única forma de compatibilizar os objectivos ambientais a nível mundial com os direitos dos países em desenvolvimento, passará sempre por reduções substanciais nos países desenvolvidos ou pela penalização financeira dessas emissões.

4. Cimento Portland versus ligantes geopoliméricos

4.1 O cimento Portland

Patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, o cimento Portland deve o seu nome às suas semelhanças com um calcário extraído na região

de Dorset (Inglaterra) e designado de Portland [9]. Embora tenha sido o ligante por excelência do século 20, devido em grande parte à sua versatilidade, à abundância recursos naturais para o seu fabrico, e ao seu relativamente baixo custo, o cimento Portland padece no entanto de alguns inconvenientes em termos de durabilidade. Como já reconhecia Sousa Coutinho, "*...a sua elevada alcalinidade torna-o um material instável...pele que a sua duração não será muito longa.*" [10]. Apresenta-se uma descrição sucinta das desvantagens dos ligantes de cimento Portland:

- Elevado grau de emissões de CO₂ (1 ton. por cada ton. de cimento)
- Elevado consumo energético na fase de fabrico, com temperaturas de clínquerização da ordem dos 1450° C
- Betões com vida útil que correntemente não ultrapassa os 60 anos
- Betões sem qualquer resistência ao ataque de ácidos
- Betões com resistência ao fogo quase nula
- Betões com elevada condutibilidade térmica
- Betões com considerável permeabilidade à penetração de agentes agressivos
- Betões sensíveis à acção da carbonatação
- Betões sensíveis ao ataque de cloretos
- Betões sensíveis à ocorrência de reacções expansivas do tipo alcali-agregado
- Necessidade de utilização de agregados com granulometrias bem graduadas

4.2 Ligantes geopoliméricos

Embora usualmente designados por ligantes geopoliméricos, são também designados por ligantes obtidos por activação alcalina, ou cimentos alcalinos. Em termos históricos este tipo de ligante (ver tabela 2), foi objecto de intensas análises por parte de investigadores do Leste da Europa, contudo somente quando em 1978 Joseph Davidovits introduziu o termo "*geopolimero*" tendo patentado investigações sobre a polimerização de metacaulino

Tabela 2 – Resenha histórica sobre alguns acontecimentos importantes acerca de cimentos obtidos por activação alcalina e cimentos alcalinos [11]

Autor	Ano	Descrição
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovskiy	1959	Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovskiy	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo " Geopolimero "
Malinowski	1979	Caracterização de aquedutos milenares
Forss	1983	Cimento tipo F (Escórias – alcalis – superplastificante
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais em edifícios milenares
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento " Pyramet "
Krivenko	1986	Sistemas R2O – RO - SiO ₂ - H ₂ O
Malolepsy e Petri	1986	Activação de escórias sintéticas
Malek et al.	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioactivos
Davidovits	1987	Comparação entre betões correntes e betões milenares
Deja e Malolepsy	1989	Resistência ao ataque de cloretos
Kaushal et al.	1989	Cura adiabática de ligantes alcalinos com resíduos nucleares
Roy e Langton	1989	Analogias dos betões milenares
Majundar et al.	1989	Activação de escórias – C12A7
Talling e Brandstettr	1989	Activação alcalina de escórias
Wu et al.	1990	Activação de cimento de escórias
Roy et al.	1991	Presa rápida de cimentos activados alcalinamente
Roy e Silsbee	1992	Revisão sobre cimentos activados alcalinamente
Palomo e Glasser	1992	Metacaulino com CBC
Roy e Malek	1993	Cimento de escórias
Glukhovskiy	1994	Betões milenares, modernos e futuros
Krivenko	1994	Cimentos alcalinos
Wang e Scrivener	1995	Microestrutura de escórias activadas alcalinamente

é que a temática dos ligantes alcalinos sofreu uma inflexão, quer em termos da investigação produzida, quer mesmo em termos de divulgação mediática, o que justifica a vulgarização do termo "geopolimero", á semelhança do que aconteceu com o termo "cimento Portland" nos cimentos tradicionais.

Em termos físicos, os ligantes obtidos por activação alcalina, compreendem fundamentalmente duas etapas, uma de dissolução da sílica e alumina da matéria prima, quando misturada com uma solução alcalina (activador) e outra de policondensação e endurecimento dos produtos de reacção numa estrutura polimérica.

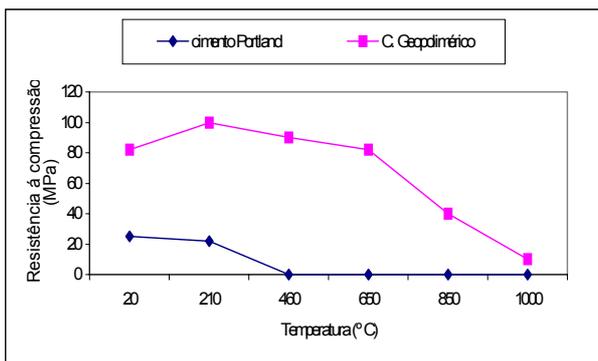


Fig. 5 – Perda de resistencia com o aumento de temperatura em betões á base cimento Portland e de cimento geopolimérico [14]

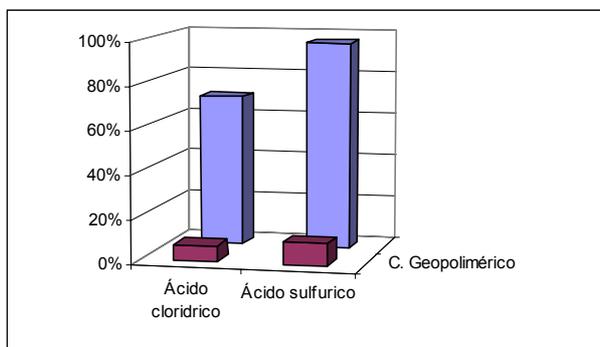


Fig. 6 – Perda de peso após ataque ácido, em betões á base cimento Portland e de cimento geopolimérico [15]

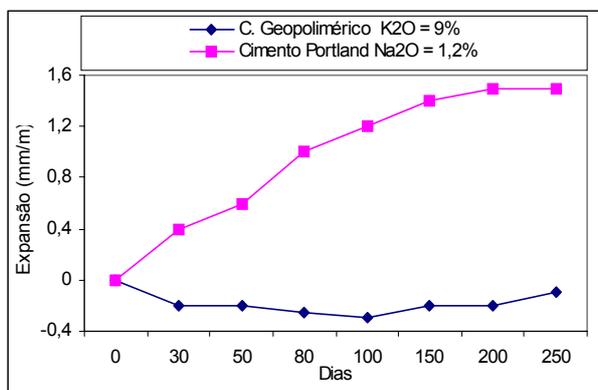


Fig. 7 – Reacção alcali-silica. Medição da expansão em argamassas á base cimento Portland e de cimento geopolimérico [16]

Ao nível fenomenológico, alguns investigadores afirmam que existem dois modelos distintos de activação alcalina [12,13]:

No primeiro modelo, um bom exemplo é o da activação de escórias de alto forno, um material com uma elevada percentagem de óxido de cálcio, que ao ser activado com soluções alcalinas de baixa ou média concentração, origina produtos de reacção do tipo silicato de cálcio hidratado (C-S-H). No segundo modelo, o material composto quase exclusivamente por sílica e alumina, é activado por soluções alcalinas bastante concentradas originando-se uma reacção de polimerização que foi patenteada por Davidovits.

De acordo com os trabalhos deste investigador, os ligantes geopoliméricos a partir do precursor metacaulino, apresentam uma série de vantagens sobre o cimento Portland:

- Redução de emissão de CO₂ até 6 vezes menos que o cimento Portland
- Betões com resistências mecânicas relativamente elevadas e obtidas em poucas horas
- Betões com baixa condutibilidade térmica
- Betões com capacidade de imobilização de metais pesados
- Betões com resistência a altas temperaturas (Fig.5)
- Betões resistentes ao ataque químico (Fig.6)
- Betões imunes à reacção alcáli-silica (Fig.6)

Os ligantes geopoliméricos podem utilizar como matéria prima qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina [17] e que tenha sido sujeito a um tratamento térmico, que torne o material amorfo (mais reactivo). As investigações de Davidovits recomendam no entanto que se respeitem determinadas razões atómicas, para se obterem resultados óptimos quer ao nível mecânico quer ao nível da durabilidade [18].

$$0,2 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,48$$

$$3,3 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,5$$

$$0,8 < \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,6$$

Desta forma podem ser utilizados como matérias primas para os ligantes geopoliméricos, cinzas escórias, ou até mesmo residuos de minas e pedreiras, mesmo contendo metais alcalinos[19].



Fig. 8 – Betonagem de pilar com betão geopolimérico á base de cinzas volantes [20]

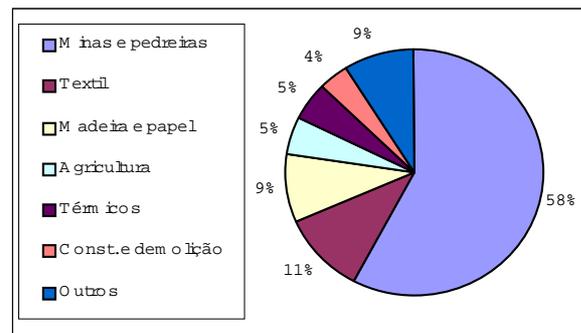


Fig. 9 – Tipologia dos resíduos industriais em 2001[23]

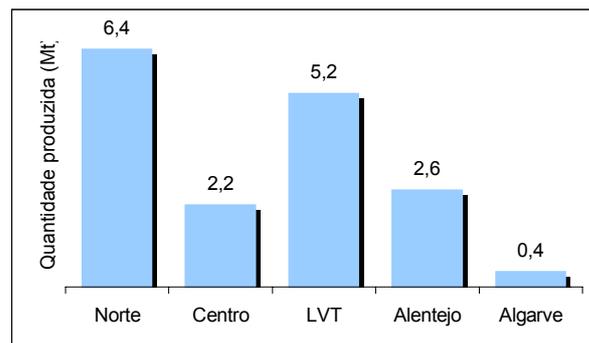


Fig.10 – Distribuição geográfica dos resíduos de minas e pedreiras em 2001[23]

Apesar das inúmeras vantagens descritas, os betões á base de ligantes geopoliméricos apresentam no entanto alguns inconvenientes tecnológicos comparativamente aos betões tradicionais, que a investigação actualmente procura solucionar como sejam:

- Um nível de retracção ligeiramente superior;
- Uma trabalhabilidade bastante baixa, originada pela viscosidade das soluções alcalinas e que os superplastificantes actuais não conseguem resolver;
- Uma elevada dependência das condições de cura, seja em termos da necessidade de impedimento da evaporação, quer em termos de se obterem resultados físicos melhorados com curas a temperatura elevadas.

A nível mundial a investigação na área dos ligantes geopoliméricos, centra-se hoje quase exclusivamente sobre as cinzas volantes [12] (ver Fig. 8), devido á elevada quantidade que é anualmente produzida 600 milhões de toneladas (Mt), estimando-se que apenas 14% desse volume seja reaproveitado. Havendo inclusive resultados muito promissores em termos do desenvolvimento de travessas pré-fabricadas para linhas ferroviárias [21]. Em Portugal no entanto, a escassez desse tipo de sub-produtos, (anualmente são produzidos apenas 0,4 milhões de toneladas) o que representa somente 4% da produção nacional de cimento Portland [22]) leva a que a produção de futuros ligantes

geopoliméricos só seja exequível pelo recurso a precursores ricos em sílica e alumina de origem mineral. Relativamente a este contexto, Portugal possui felizmente uma tipologia de resíduos industriais onde predominam os resíduos de minas e pedreiras (ver Fig. 9), não sendo esse volume localizado em nenhuma região específica, mas antes regularmente distribuído por todo o território nacional, com excepção da região Algarvia, cujo volume deste tipo de resíduos é bastante mais baixo que o das outras regiões (ver Fig. 10). Pelo que a reutilização parcial deste tipo de resíduos na produção de ligantes trará vantagens ambientais acrescidas, além daquelas que resultam de um ligante caracterizado pelo seu reduzido nível de emissões de GEE.

Nessa sequência, o primeiro autor realiza presentemente trabalhos de Doutoramento no Departamento de Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior (UBI), sob a orientação e co-orientação respectivamente do segundo e terceiro autor. Os referidos trabalhos incidem sobre o desenvolvimento de ligantes alternativos ao cimento Portland obtidos a partir da activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira cuja actividade extractiva ao longo de dezenas de anos, gerou milhões de toneladas de lamas residuais (ver Fig.11). Até ao presente momento, foram realizados estudos de caracterização e tratamento térmico das lamas, com resultados bastante promissores que serão apresentados no "World Congress Geopolymer 2005" que se realizará em França em Junho do corrente ano.



Fig.11 – Minas da Panasqueira. Vista dos lagos de lamas residuais.

5. Viabilidade económica

Uma das maiores, senão mesmo a maior, desvantagem dos betões à base de ligantes obtidos por activação alcalina, reside no facto daqueles apresentarem um custo substancialmente superior aos betões correntes à base de cimento Portland [24]. Não existem no entanto estudos que permitam quantificar quer essa diferença, quer mesmo quais os factores que para ela mais contribuem e onde futuras investigações, possam alcançar reduções significativas.

A tabela 3 apresenta a composição e a resistência à compressão de quatro tipos de betões. Dois são do tipo geopolimérico (GA e M9), e os restantes dois são betões à base cimento Portland, um deles tem na sua composição cimento tipo I da classe 42,5 com substituição de 60% de cimento por cinzas volantes (CV60), e o outro é um betão corrente da classe C20/25, à base de cimento tipo II da classe 32,5 (PPC).

Na tabela 4 apresenta-se o custo dos betões, relativamente aos quais se quantificou somente o custo dos materiais, porquanto o custo da mão-de-obra representa apenas uma pequena parte do custo global do betão e que se pode considerar invariável nos

Tabela 4 - Custo dos betões (só materiais)

Tipo de betão	Custo dos materiais em (€ / m ³) e em percentagem (%)							Custo total	
	Agregados (7,7 € / ton)	Areia (7,1 € / ton)	Cimento Portland Tipo I (85€ / ton)	Cinzas volantes (20€ / ton)	Metacaulino (30€ / ton)	Silicato de sódio em sol. (420 € / ton)	Hidróxido sódio palhetas (714 € / ton)	(€ / m ³)	(€ / MPa)
GA	7 (5%)	6 (5%)	-	-	9 (7%)	84 (63%)	27 (20%)	133	2,3
M9	14 (17%)	-	-	10 (12%)	-	50 (61%)	8 (10%)	82	1,4
PPC	7 (16%)	6 (14%)	31 (70%)	-	-	-	-	44	1,8
CV 60	7 (15%)	6 (13%)	28 (59%)	6 (13%)	-	-	-	47	1,3

Tabela 3 - Betões: Composição e resistência à compressão

Tipo de betão	Composição (Kg/m ³)							Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
	Agregados	Areia	Cimento Portland	Cinzas volantes	Metacaulino	Silicato de sódio	Hidróxido de sódio	
GA [19]	930	792	-	-	300	200	100 (15M)	57
M9 [13]	1756	-	-	476	-	120	48 (8M)	60
PPC C20/25	880	812	370 Tipo II	-	-	-	-	25
CV 60 [25]	850	774	200 Tipo I	300	-	-	-	35

diferentes tipos de betões apresentados, já que se entendeu considerar simplifcadamente que os betões teriam todos a mesma trabalhabilidade, o que não sucede. O custo é apresentado por metro cúbico e também em termos de rácio custo/resistência.

Pode constatar-se da análise da tabela 4, que em termos do custo por m³, os betões de base geopolimérica são bastante mais caros que os betões à base de cimento Portland, o de menor custo M9 é 74% mais caro que o betão tradicional de maior custo CV 60. A explicação para o custo algo invulgar dos betões geopoliméricos, reside fundamentalmente no custo dos activadores alcalinos, em percentagens relativamente ao custo global de respectivamente 83% no betão GA e 71% para o betão M9, o que quer dizer que o custo dos percursos é quase irrelevante, não sendo exequível conseguir reduções no custo final através de reduções neste material. Uma solução mais correcta será a de se actuar ao nível da quantidade do activador e da concentração da molaridade do

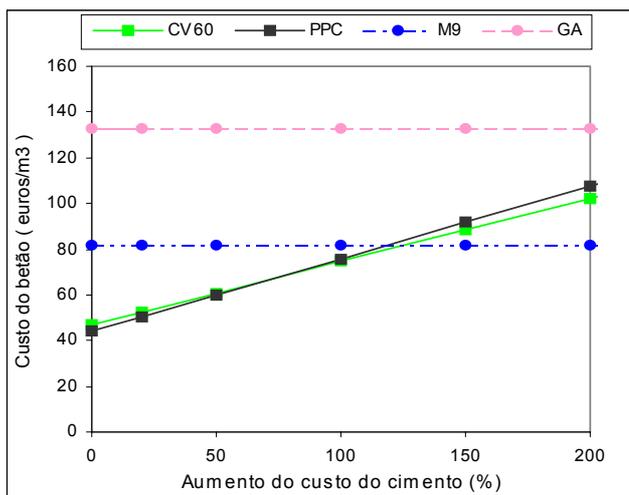


Fig. 12 – Evolução do custo do betão por metro cúbico com o aumento do custo do cimento

hidróxido de sódio, como aconteceu entre os betões GA e M9, em que essa alteração originou uma redução de 62% no custo por metro cúbico. Aliás, as investigações actuais no domínio dos ligantes geopoliméricos incidem bastante sobre a questão dos activadores, procurando melhorar o desempenho dos existentes, quer em termos das suas propriedades quer em termos do seu custo, através de melhorias em termos da economia da sua produção.

Em termos de custo por MPa no entanto, as diferenças já são bastante menos expressivas, nesse caso o betão de base geopolimérica com o custo menor M9, tem um custo somente 8% acima do custo do betão tradicional de menor custo, PPC. Contudo o betão tradicional de custo mais elevado CV60 apresenta um custo 28% superior ao do betão geopolimérico de menor custo M9.

As figuras 12 e 13 mostram de que forma um aumento do custo do cimento Portland, em virtude do contexto da economia do carbono, em que as empresas terão que começar a imputar ao custo dos materiais que produzem o custo da sua poluição, vai influenciar a competitividade dos betões executados com este ligante face aos seus equivalentes de matriz geopolimérica. Em termos de custo por

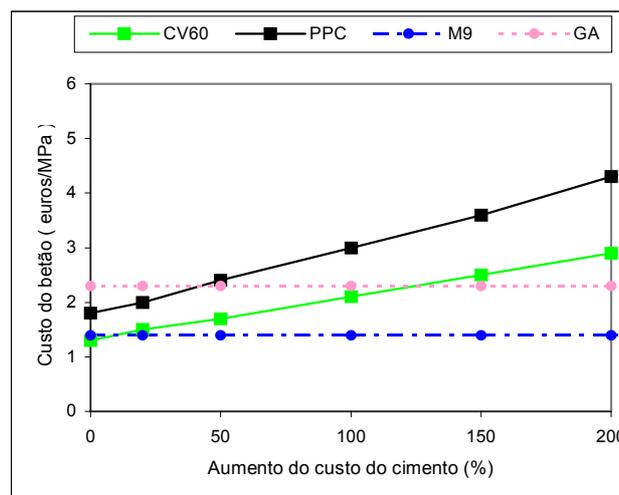


Fig. 13 – Evolução do rácio custo do betão/resistência com o aumento do custo do cimento

metro cúbico o panorama, só começa a alterar-se a partir de um aumento do custo do cimento acima dos 100%, o que quer dizer que tão cedo dificilmente o cimento Portland perderá a sua competitividade. No entanto se análise for feita em termos de rácio custo/resistência, para um aumento do custo do cimento de aproximadamente 50%, os ligantes geopoliméricos já se tornam uma alternativa efectiva. Além disso, importa frisar que não foram objecto de contabilização a favor dos ligantes geopoliméricos, o facto destes terem uma vida útil muito mais longa, de permitirem a colocação das estruturas em serviço muito mais cedo, reduzindo de forma substancial o prazo de conclusão das obras e também o facto de ao serem constituídos por resíduos, permitirem poupanças em termos de taxas de deposição, cujo custo é tendencialmente crescente.

6. Conclusões

A indústria cimenteira mundial é um dos grandes responsáveis pela emissão de elevadas quantidades de dióxido de carbono, por outro lado o cimento apresenta sérias fragilidades em termos da sua durabilidade. Desta forma assume-se como um designio urgente por parte da comunidade científica a procura de soluções

alternativas a este material que sejam menos poluentes e mais duráveis. Os ligantes geopoliméricos, constituem-se como um produto inovador alternativo ao cimento Portland, quer em termos ambientais devido às suas baixas emissões, quer ao facto de poderem ser produzidos a partir de resíduos, quer mesmo em termos da sua inequívoca superior durabilidade.

Portugal apresenta um elevado nível de emissões de CO₂, acima mesmo dos limites assumidos no âmbito de compromissos internacionais decorrentes da aplicação do Protocolo de Quioto, em que uma parte substancial é devida à sua indústria cimenteira. Por outro lado não possui sub-produtos de características pozolânicas em quantidade suficiente, como as cinzas volantes ou as escórias. Possui no entanto elevadas quantidades de resíduos de minas e pedreiras, reunindo assim todas as condições, para o uso de um ligante alternativo ao cimento Portland a partir daquele tipo de resíduos.

A curto prazo e devido ao seu baixo custo, não se esperam grandes alterações ao predomínio tecnológico do cimento Portland, desta forma prevêem os autores que os cimentos com incorporação de cinzas volantes ou escórias continuem a ser predominantes em termos de mercado, mesmo que para o efeito se recorra como já se faz actualmente à importação daquele tipo de sub-produtos, além disso existem também grandes potencialidades, ainda pouco exploradas em termos de mercado, no domínio dos betões com substituição de cimento por metacaulino (uma pozolana artificial bastante reactiva, obtida a partir da desidroxilação do caulino), os quais se caracterizam por terem excelentes prestações quer em termos mecânicos quer mesmo em termos da sua durabilidade [26]. A médio e longo prazo, importa contudo não esquecer que, por um lado Portugal beneficiou conjuntamente com o facto de lhe ter sido permitido aumentar o seu nível de emissões relativamente a 1990, e por outro que essa conjuntura tem por base o cumprimento de um escasso 5% de redução de emissões estabelecidos no âmbito do Protocolo de Quioto o que significa que a curto prazo é possível antecipar cenários em que se efectivem penalizações crescentes das empresas com elevadas emissões de CO₂, o que

levará inevitavelmente a um aumento da competitividade dos ligantes geopoliméricos.

7. Referencias

- [1] Fernandes, M.; Sousa, A.; Dias, A. - Impactes Ambientais e comercio de emissões. Industria cerâmica: Um caso de estudo. Associação Portuguesa da Industria Ceramica APICER, Dezembro de 2004.
- [2] UNFCCC - Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change, United Nations convention on climate change, FCC/CP/L.7/Add1, Kyoto
- [3] European Environmental Agency – Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2004. EEA Technical Report N° 5/2004.
- [4] Instituto dos Resíduos - Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável ENDS 2005-2015
- [5] PNAC - Plano Nacional para as Alterações Climáticas. Resolução do Conselho de Ministros n.º 119/2004 de 31 de Julho.
- [6] Directive 203/87/Ec - European Union CO2 emissions trading scheme
- [7] PNALE - Plano Nacional de atribuição de licenças de emissão de CO2 2005-2007. Ministério das cidades e do Ordenamento do Território.
- [8] WWW.eicpme.iapmei.pt/eicpme_not_02.php?noticia_id=334
- [9] Neville, A M. - Properties of Concrete. Fourth and Final Edition.
- [10] Coutinho, A Sousa - Fabrico e propriedades do betão. 2ª Edição, vol. 1, LNEC, Lisboa, 1988.
- [11] Roy, Della M. – Alkali – activated cements. Opportunities and challenges. Cement and Concrete Research 29 (1999) 249-254.
- [12] Palomo, A.; Grutze, M. W.; Blanco, M. T. – Alkali – activated fly ashes. A cement for the future. Cement and Concrete Research 29 (1999) 1323-1329.
- [13] Hardjito, D.; Wallah, S. E.; Sumajouw; Rangun, B. V. Fly ash based geopolymer concrete, Construction material for sustainable development. Concrete World: Engineering & Materials, American Concrete Institute 2004 India
- [14] Davidovits, J. – Geopolymers: Inorganic polymeric new
- [15] Davidovits, J. – Properties of geopolymers cements. Proceedings of the First International Conference on alkaline cements and concretes. Scientific Research Institute on Binders and Materials Kiev, Ukraine. 131-149.
- [16] Davidovits, J. – Geopolymers: Man-Made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. Journal of Materials education 16 (1994) 91-139.
- [17] Xu, Hua; Deventer, J. S. J. – The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. International Journal of Mineral Processing 59 (2000) 247-266.
- [18] Teixeira Pinto, A. - Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina de metacaulino. Tese de Doutoramento, 2004, Universidade do Minho.
- [19] Teixeira Pinto, A.; Jalali, Said – Novos materiais obtidos por activação alcalina de metacaulinos, argilas e resíduos ricos em sílica e alumina. Patorreb 2003. Porto.
- [20] Hardjito, D.; Wallah, S. E.; Sumajouw; Rangan, B. V. Brief review of development of geopolymer concrete. George Hoff Symposium, American Concrete Institute. Las Vegas, USA, 25 May 2004.
- [21] Fernandez-Jimenez, A.; Palomo, J. - Alkali activated fly ash concrete: Alternative material for the precast industry. In proceedings of 2002 Geopolymer Conference. Melbourne, Australia.

- [22] Ministério do Ordenamento do Território. Instituto dos Resíduos – Produção de cinzas volantes de centrais térmicas e escórias de siderurgia em 2002.
- [23] Instituto dos Resíduos - Estudo de inventariação dos Resíduos Industriais. Relatório Síntese. 2004.
- [24] Deventer, S. J. - Opportunities and obstacles in the commercialisation of geopolymers. Geopolymer 2002. Melbourne.
- [25] Camões, A.; Aguiar, J. B.; Rocha, P.; Jalali, S.; Pereira, J. C. - Betões de elevado desempenho de custo reduzido utilizando materiais correntes. Betão (1999) 34-38.
- [26] Sabir, B. B. ; Wild, S.; Bai, J. - Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement and Concrete Composites 23 (2001) 441-454