

CIMENTO ALUMINOSO: CARACTERÍSTICAS, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES¹

Gabriele OLIVEIRA²

Graduanda em Engenharia Civil/IFSP-Campus São Paulo

Avelino CREPALDI³

Doutor em Fadiga do Concreto/EP-USP

Docente do Departamento de Construção Civil/IFSP-Campus São Paulo

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o cimento aluminoso quanto às suas características, propriedades e aplicações. Estabelece comparações entre as performances do cimento Portland comum e do cimento aluminoso, mostrando as principais diferenças e vantagens de aplicação de um ou de outro conforme a situação de projeto exija. Também estuda as propriedades de misturas compostas por cimento Portland e cimento aluminoso, cimento aluminoso e sulfato de cálcio, e, por fim, a mistura dos três elementos. Esse estudo tem como foco duas das propriedades do cimento: tempo de pega e resistência à compressão.

Palavras-chave: Cimento aluminoso. Cimento Portland. Sulfato de Cálcio. Tempo de pega. Resistência à compressão.

Introdução

O presente trabalho é um estudo comparativo entre os cimentos Portland e aluminoso no âmbito da construção civil. O uso do cimento aluminoso é pouco difundido no Brasil e no mundo. Poucas pesquisas têm sido feitas em relação a esse material na Europa e praticamente não se tem pesquisado sobre isso nos demais continentes. Isso porque o cimento aluminoso sofre o fenômeno químico de conversão, que gera perda de resistência, mas que pode ser contornada com aplicação do conhecimento técnico.

¹ Trabalho resultante de Iniciação Científica/PIBIFSP.

² Endereço eletrônico: gabicmo@hotmail.com

³ Endereço eletrônico: avelinocrepaldi@gmail.com

Esse receio teve origem alguns anos depois da Segunda Guerra Mundial. O cimento aluminoso foi muito utilizado ao fim da guerra para reconstruir a Europa. Entretanto, pouco ou nada se sabia sobre o fenômeno da conversão, de forma que esse aspecto não foi devidamente calculado, levando ao colapso de várias estruturas. Mas o principal motivo desses colapsos foi, na realidade, o excesso de água na formulação de concretos e argamassas. Hoje, sabe-se que concretos de cimento aluminoso devem ter uma relação água/cimento menor do que 0.4, mas a maioria das estruturas que entraram em colapso tinham essa relação superior a 0.5. Ou seja, a baixa performance do cimento aluminoso foi, na verdade, falta de conhecimento técnico.

É importante que o engenheiro civil tenha conhecimento a respeito desse material, uma vez que seu uso pode resolver de maneira bastante prática situações especiais, principalmente aquelas que requerem o uso de cimento refratário, com alta resistência inicial ou aceleração do tempo de pega. Pretendemos mostrar nesse trabalho que o conhecimento técnico pode contornar esse temor e tornar o uso de cimento aluminoso muito eficiente.

Cimento aluminoso

O cimento aluminoso foi inicialmente desenvolvido para resistir ao ataque de sulfatos, na França, em 1888. Pesquisas permitiram o desenvolvimento desse material, cujas propriedades incluem, além da resistência a ambientes quimicamente agressivos, alta resistência inicial, resistência em altas temperaturas, alta performance como refratário.

Esse material pode ser combinado com o cimento Portland e sulfato de cálcio para a obtenção de propriedades e características específicas, como aceleração do tempo de pega, controle de expansão, compensação da retração.

Não é recomendado para uso estrutural quando puro, mas, se formulado com cuidado, pode prover alto desempenho para concretos e argamassas especiais. Isso porque, durante a hidratação, o cimento aluminoso sofre um fenômeno químico chamado conversão, em que há alteração da estrutura cristalina e conseqüente redução da resistência mecânica. A resistência mínima a ser atingida pelo cimento deve ser considerada para a formulação do concreto ou argamassa a ser utilizado, por questões de segurança. O cimento aluminoso mais utilizado na construção civil é o Fondu.

Os principais constituintes dos cimentos aluminosos são óxido de cálcio (CaO, obtido de rocha calcária, cal) e óxido de alumínio (Al₂O₃, obtido de bauxita, alumina). O processo de fabricação varia conforme o nível de pureza das matérias-primas. Outra informação importante refere-se ao cimento Portland que resulta da combinação do clínquer com sulfato de cálcio, porque o clínquer reage até mesmo com a umidade do ar, endurecendo rapidamente; logo, é necessária a adição de sulfato de cálcio para retardar o tempo de pega. Ao contrário do cimento Portland, o cimento aluminoso não tem tri-aluminato de cálcio (C₃A) livre para reagir com a água, por isso não há pega imediata e, conseqüentemente, não há necessidade de adicionar sulfato de cálcio para controlar o tempo de pega. Essa diferença faz com que o cimento aluminoso tenha maior resistência inicial do que o cimento Portland e é um aspecto muito importante para a utilização de cimento aluminoso como acelerador do cimento Portland.

Misturas de cimento aluminoso, cimento Portland e sulfato de cálcio

Como vimos anteriormente, o cimento aluminoso tem alta resistência inicial, mas perde resistência com o passar do tempo, devido à conversão. Quanto à trabalhabilidade, o tempo de início de pega é bem próximo ao do cimento Portland e o tempo de fim de pega é maior do que o do cimento Portland. Considerando ainda que o cimento aluminoso é muito mais caro do que o cimento Portland, não há vantagens na utilização de cimento aluminoso puro.

Entretanto, sua combinação com OPC (Ordinary Portland Cement – Cimento Portland Comum) e sulfato de cálcio (C\$) proporciona características importantes à mistura. Temos, então, uma mistura que pode ser locada em algum ponto do seguinte triângulo:

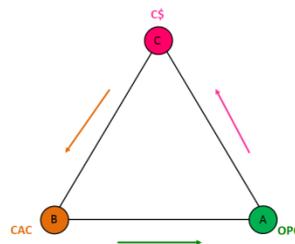


Figura 1 Sistema combinatório
Fonte: KERNEOS, 2016.

Ao longo da aresta inferior do triângulo, no sentido da seta verde, buscamos aceleração do tempo de pega. Ao longo da aresta direita do triângulo, no sentido da seta rosa, buscamos retardamento do tempo de pega – o controle utilizado na fabricação do OCP para evitar a falsa pega. Ao longo da aresta esquerda do triângulo, no sentido da seta laranja, buscamos diminuição da perda de resistência. Nesse caso, o sulfato de cálcio age como expansor, compensando a retração e aumentando a resistência do CAC.

Cimento Portland puro

No cimento Portland, a quantidade de C_3A (tri-aluminato de cálcio) livre para reagir com a água promove a pega imediata. Adiciona-se, então sulfato de cálcio para neutralizar parte do C_3A , diminuindo a velocidade da hidratação e, conseqüentemente, aumentando o tempo de pega. O cimento Portland só atinge alta resistência depois de 28 dias.

Combinação entre cimento Portland e cimento aluminoso

Nessa combinação, o CAC reage com o sulfato de cálcio disponível no OPC, formando uma pequena quantidade de etringita estrutural. Assim, o C_3A está livre para reagir novamente, acelerando o tempo de pega e formando C_4AH_x (etringita). Porém, ocorre a formação de uma espécie de envoltório de C_4AH_x , que bloqueia parcialmente a hidratação do C_3S (silicato tricálcico).

Para misturas ricas em OPC, apesar de a resistência inicial dessa combinação ser mais alta do que a do cimento Portland puro, a combinação não atinge altas resistências. Para misturas ricas em CAC, há perda de resistência devido à conversão – embora a conversão não seja igual à que ocorre no CAC puro. Além disso, a retração do cimento aluminoso acontece mais rápido do que a do cimento Portland.

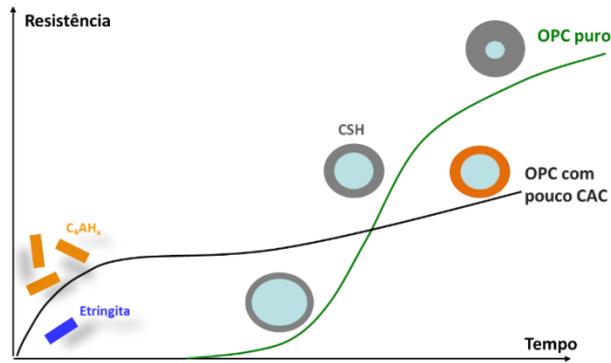


Figura 2 Comparação entre o desenvolvimento da resistência em função do tempo entre OPC puro e OPC com adição de CAC.
Fonte: KERNEOS, 2016. Adaptado.

Vê-se na representação ilustrativa da Figura 2 o processo de hidratação do cimento, de fora para dentro. A camada externa, em cinza, já está hidratada, enquanto a camada interna, em azul claro, é um gel. Pode-se notar que inicialmente a hidratação do OPC puro é mais lenta, de forma que a combinação OPC + CAC tem maior resistência inicial, mas quando se forma a camada de etringita, representada em laranja, bloqueando parcialmente a hidratação, o OPC puro apresenta a maior resistência à compressão.

A aceleração do tempo de pega na combinação CAC/OPC é extremamente dependente da quantidade de sulfato de cálcio disponível no OCP, e essa quantidade varia conforme a matéria-prima utilizada na fabricação do cimento Portland.

O gráfico a seguir (Figura 3) foi obtido a partir de resultados experimentais realizados em laboratório. Relaciona a proporção CAC/OPC com o tempo de pega. É importante observar nesse gráfico que não apenas o CAC acelera o OPC como também o OPC acelera o CAC.

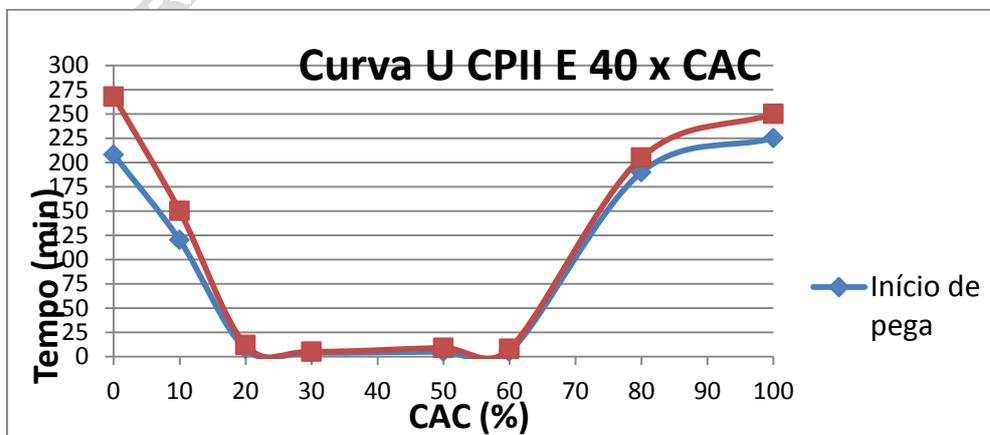


Figura 3 Tempo de pega da pasta de cimento em função da porcentagem de CAC

Durante os ensaios realizados em laboratório, pudemos observar que a adição de cimento Fondu ao cimento Portland não reduz muito significativamente o tempo de início de pega em relação ao cimento Portland puro, no entanto, uma vez atingido o início de pega, o cimento endurece muito rapidamente, de forma que há uma grande aceleração do tempo final de pega. Misturas com 20 a 60% de cimento aluminoso apresentam pega imediata.

Combinação entre cimento Portland e cimento aluminoso com adição de sulfato de cálcio

Com pequena adição de sulfato de cálcio, o CAC e o C\$ reagem para formar etringita, liberando o C_3A para reagir, acelerando o tempo de pega e aumentando a resistência inicial. O sulfato de cálcio “extra” trabalha como expansor, promovendo a compensação da retração, aumentando a resistência à compressão.

Pelo sistema de cores, podemos ver claramente na Figura 4 a aceleração da hidratação: a camada hidratada, em cinza, é mais espessa na linha que representa o desempenho do ternário, em comparação com a do OPC puro.

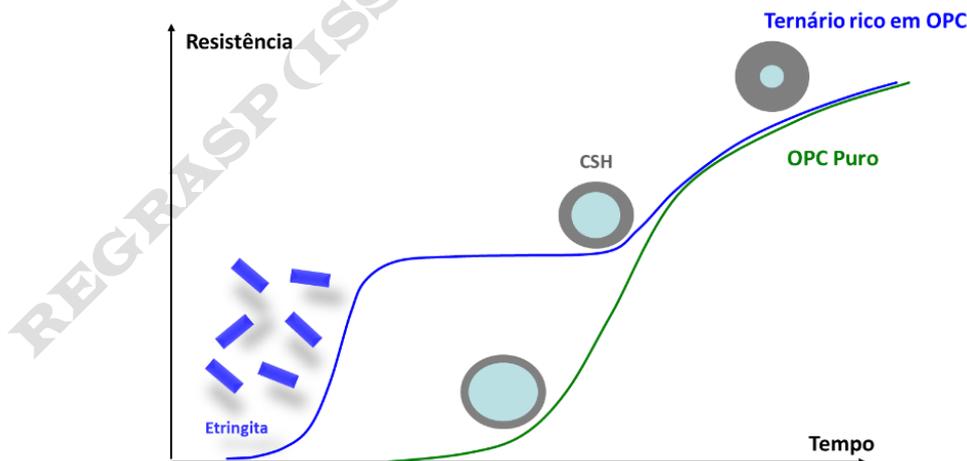


Figura 4 Comparação entre o desenvolvimento da resistência em função do tempo entre OPC puro e OPC com adição de CAC e pouco C\$. KERNEOS, 2016. Adaptado.

A relação CAC/CS deve estar próxima de 2:1. Maiores proporções de sulfato de cálcio podem levar à expansão incontrolável ou grande impacto de baixas temperaturas. No caso de sistema rico em CAC com adição de sulfato de cálcio, a etringita passa a ser o principal hidrato formado, o que proporciona compensação da retração e aceleração do tempo de pega. Por isso, deve-se utilizar preferencialmente gesso ou hemidrato como fonte de sulfato de cálcio, e a relação CAC/CS recomendada é de no máximo 3:1.

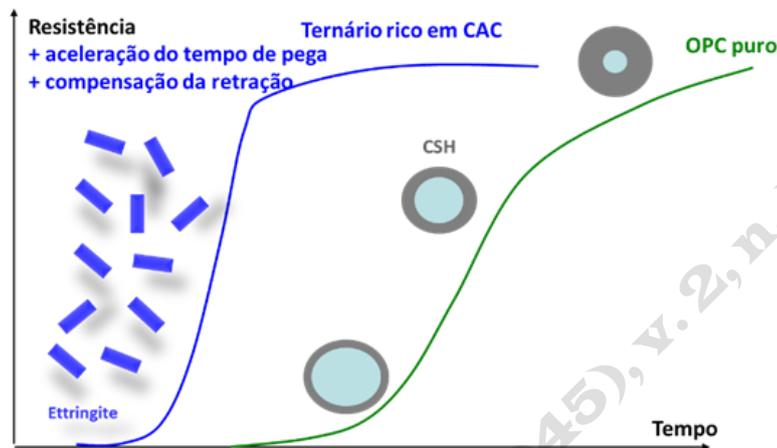


Figura 5 Comparação entre o desenvolvimento da resistência em função do tempo entre OPC puro e CAC com adição de CS e OPC.

Fonte: KERNEOS, 2016. Adaptado.

Combinação entre cimento aluminoso e sulfato de cálcio

A função do sulfato de cálcio nesse sistema é compensar a retração, aumentando a resistência à compressão. Recomenda-se fortemente a utilização de hemidrato como fonte de sulfato de cálcio e relação CAC/CS de 2:1.

Conversão e resistência mínima do cimento aluminoso

A velocidade da conversão do cimento aluminoso é dependente de uma série de fatores, como temperatura, umidade, composição, aditivos. O fato é que a conversão pode ser retardada, mas não impedida, portanto haverá perda de resistência. A

resistência mínima a ser atingida em longo prazo deve ser considerada para a formulação, a fim de garantir que esta seja adequada para resistir aos esforços aos quais a peça estará submetida.

Puro, o cimento aluminoso não oferece vantagens físicas e econômicas para concreto estrutural em relação ao concreto de cimento Portland, mas é material de escolha em situações que exigem endurecimento rápido, resistência a ataques químicos e abrasão, entre outros (HEWLETT, 2006⁴, p. 733). Neste caso, recomenda-se $a/c \leq 0,4$ para assegurar boa resistência a longo prazo (HEWLETT, 2006, p. 737). Além disso, o consumo de cimento não deve ser inferior a 400 kg/m³ (HEWLETT, 2006, p. 743). Mesmo seguindo essas recomendações, é importante saber qual será a resistência mínima. A resistência mínima é atingida por volta dos 5 anos, prolongando-se até quase 10 anos, e então, quando ocorre a hidratação secundária, a resistência volta a subir (HEWLETT, 2006, p. 739).

Pesquisas têm sido realizadas no sentido de desenvolver métodos de cura que acelerem a conversão para determinar a resistência mínima com ensaios de laboratório. Para pequenas seções de concreto, o método baseado no princípio supracitado é suficientemente preciso: os corpos de prova são imersos em água a 38°C diretamente após a moldagem e atingem a resistência mínima depois de 5 dias.

Aplicações do cimento aluminoso

O cimento aluminoso não oferece vantagens econômicas em situações em que o cimento Portland apresenta desempenho satisfatório. Para situações especiais, entretanto, as propriedades do cimento aluminoso e suas combinações com cimento Portland, sulfato de cálcio e aditivos tornam seu uso muito viável. Os nossos estudos têm como foco duas dessas propriedades: alta resistência inicial e pega rápida. Mas outras propriedades são importantes para as diferentes aplicações do cimento aluminoso. Alguns usos não são detalhados nesse estudo, mas estão sendo pesquisados e desenvolvidos, como por exemplo o cimento MDF (Macro-Defect Free – livre de macro-defeitos), que teria alta resistência à flexão.

⁴ Optamos pela edição: HEWLETT, P. C. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Fourth Edition. Arnold Publisher, 2006.

Aplicações devidas à pega rápida e alta resistência inicial do CAC

Os CACs têm tempo de pega muito similar ao do OPC, entretanto, uma vez iniciada a pega, o desenvolvimento da resistência é extremamente rápido, permitindo rápida retirada de fôrma e liberação de utilização dentro de 6 a 24 horas (HEWLETT, 2006, p. 761).

Reparos

Hewllett (2006, p. 762) menciona três exemplos marcantes da utilização de CAC para reparos que precisavam ser executados rapidamente:

Uma rampa de acesso para balsas no Canal Inglês originalmente construída com concreto de OPC havia sido deteriorada pela água do mar. O reparo com concreto de OPC demoraria vários dias e seria necessário construir ensecadeiras para a execução do concreto. Usando CAC fornecido por caminhões betoneiras, o concreto antigo foi substituído. Devido ao rápido endurecimento, foi possível realizar o serviço no período entre duas marés altas.

Em Bangkok, de 1989 a 1990, uma autoestrada foi reparada devido aos danos causados pelo tráfego intenso usando CAC. O serviço era realizado durante a noite e pela manhã a estrada já era liberada para evitar transtornos no trânsito.

Southern Alps, França, 1989. Uma ponte que era a única conexão entre duas comunidades vizinhas separadas por um desfiladeiro precisava ser ampliada. Usando CAC, a ponte ganhou 3,5 m de largura e foi reaberta em 12,5 horas. O custo extra foi de apenas 3%. (HEWLETT, 2006, p. 762)

Minas e túneis

Em minas de carvão em que a rocha é fraca, precisa-se de um material de pega e endurecimento rápidos, que seja de baixo custo. Como a resistência inicial não precisa ser tão alta, a solução é uma combinação de CAC e C\$: a etringita formada tem alta capacidade de liga, logo permite uma relação água/cimento em alta – de até 2,5 – diminuindo o custo do material (HEWLETT, 2006, p. 765).

Em outros casos, barras de ferro são chumbadas no teto e nas paredes de minas e túneis para estabilizar a rocha. Para tanto, é necessário um material de pega rápida e alta

resistência inicial, que é obtido pela combinação de CAC e fillers. Em túneis, concreto de CAC também é usado para execução de revestimento pré-moldado de túneis, permitindo rápida inversão dos moldes – para formar o arco.

Pisos industriais

O CAC é utilizado em pisos industriais não apenas por sua pega e endurecimento rápidos e alta resistência inicial, mas também por sua resistência a impactos, abrasão, ácidos, ataques químicos e tolerância a temperaturas extremas.

Aplicações devidas à tolerância a temperaturas extremas

A dilatação térmica do concreto de CAC depende principalmente dos agregados usados na mistura, mas a pasta de cimento aluminoso tem menor dilatação térmica do que a pasta de cimento Portland. Com a seleção correta de agregados, concretos de CAC podem ser projetados para resistir a repetidas exposições ao fogo, por isso é largamente utilizado como concreto refratário, concreto resistente a calor, revestimento de chaminés e em prédios para treinamentos de combate a incêndios (HEWLETT, 2006, p. 747).

A rápida produção de calor durante o endurecimento do CAC é benéfica em situações de exposição a baixas temperaturas. Se a temperatura for suficientemente alta para manter o concreto acima do ponto de congelamento até que a hidratação comece, ou seja, por cerca de três horas, a partir daí o próprio calor produzido pelas reações é suficiente para garantir o endurecimento. Aceleradores permitem a hidratação mesmo se os agregados estiverem abaixo da temperatura de congelamento (HEWLETT, 2006, p. 762).

O bom desempenho do CAC em baixas temperaturas permite sua aplicação em fundações em solo congelado, muito frequente no Canadá, por exemplo, para prover suporte temporário para túneis sendo escavados em solos artificialmente congelados e reparos em câmaras frias industriais (HEWLETT, 2006, p. 762).

Desempenho em água do mar

Estudos de longo prazo (20-30 anos), realizados na Europa e nos Estados Unidos comparando o desempenho de OPC, OPC com aditivos pozolânicos e CAC sob água do mar, mostram que o CAC apresenta a melhor performance relativa. Outro estudo extensivo tem sido feito sobre estruturas de concreto de CAC do píer de Halifax, no Canadá, que, submersas, apresentaram bom desempenho por mais de sessenta anos (HEWLETT, 2006, p. 754).

Aplicações devidas à resistência à abrasão, a impacto, a ataques químicos e a ácidos

O CAC foi inicialmente desenvolvido para ter boa resistência a ataques químicos, contudo o CAC de qualidade também tem excelente resistência à abrasão e impacto, pelo que é aplicado em pisos industriais, por exemplo. Todas essas propriedades permitem que o CAC seja utilizado como revestimento de grandes encanamentos de esgoto e águas residuais.

Para descarte de águas “pesadas”, o OPC tem desempenho tão bom quanto o CAC, portanto o CAC não oferece vantagens. Já para descarte de águas “leves” (descarte de águas pluviais, neve derretida, águas “puras” de uso industrial), o desempenho do OPC é insatisfatório, logo o CAC torna-se uma solução (HEWLETT, 2006, p. 765).

Química de construção

É uma área que abrange produtos não estruturais: nivelantes de piso, grautes rápidos, reparadores rápidos, argamassa expansiva *etc.* Na maioria dos casos, o CAC é parte de uma complexa formulação envolvendo muitos outros componentes. Além das propriedades já mencionadas, esses produtos exploram outras vantagens que o CAC tem a oferecer, como controle de expansão e compensação da retração (quando combinado com C\$), ou até mesmo a cor branca do CAC com pouca adição de ferro (para efeitos estéticos).

Sustentabilidade

Aluminatos de cálcio têm a propriedade de combinar com minerais e ânions orgânicos, portanto podem ser utilizados no tratamento de resíduos líquidos ou sólidos. Pode ser necessário adicionar cal para maximizar a formação de compostos. Essa aplicação do CAC é interessante para tratar resíduos resultantes de processos de combustão, como incineração de lixo, por exemplo, uma vez que estes são geralmente estabilizados através de processos baseados no uso de aglomerantes hidráulicos (HEWLETT, 2006, p. 766).

Considerações finais

O cimento aluminoso oferece características especiais e pode ser uma excelente opção para situações extraordinárias. Porém, a aplicação segura desse recurso deve ser muito bem estudada.

Um grande empecilho para a difusão da aplicação desse material no Brasil é a falta de disponibilidade de literatura técnica em português e o pouco ou nenhum desenvolvimento de pesquisas sobre as características e propriedades desse cimento, especialmente quanto ao fenômeno de conversão.

A alta resistência inicial e aceleração do tempo de pega, providas pelo uso do Cimento Aluminoso, poderiam gerar grandes vantagens em questão de tempo, economia e segurança na indústria de construção civil, mas é necessário que se desperte interesse no mercado para pesquisas.

Um primeiro passo para despertar esse interesse seria apresentar esse material aos engenheiros civis e arquitetos em formação, como parte da grade curricular ou conteúdo optativo. Também é necessária a tradução da literatura técnica, especialmente a francesa, e produção de literatura técnica brasileira. Além disso, existe a necessidade de desenvolver uma pesquisa sobre a conversão a longo prazo, não somente no Brasil, mas no mundo, uma vez que pouco se tem feito a respeito. Por fim, é importante ter uma maior divulgação do produto em congressos e workshops.

Referências bibliográficas

HEWLETT, P. C. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Fourth Edition. Arnold Publisher, 2006.

KERNEOS – KERNEOS-BRENNTAG SYMPOSIUM. *Introduction to calcium aluminates cement*. Bogotá, 2016. [Projeção visual]. 50 Diapositivos: color.

CALCIUM ALUMINATE CEMENT: CHARACTERISTICS, PROPERTIES AND APPLICATIONS

ABSTRACT

This work is a study about calcium aluminate as to its characteristics, properties and applications. Establishes comparisons between the performance of Ordinary Portland Cement and Calcium Aluminate Cement, showing the main differences and application advantages of one or another according to the requirements of each project's situation. In addition, it studies the properties of mixtures composed by Portland Cement and Calcium Aluminate Cement, Calcium Aluminate Cement and calcium sulfate, and, lastly, the mixture of the three elements. This study has two of the cement's properties as focus: setting time and compressive strength.

Key words: Calcium Aluminate Cement. Portland Cement. Calcium sulfate. Setting time. Compressive strength.

Envio: Dezembro/2016
Aceito para publicação: Dezembro/2016