



IBRACON



BELO HORIZONTE, MG, 11/10 a 14/10, 2016

# INOVAÇÕES EM CIMENTO PORTLAND E NOVOS LIGANTES

**Arnaldo Battagin**

**Associação Brasileira de Cimento Brasileira**

**SEMINÁRIO DE NOVAS TECNOLOGIAS**



# Evolução tecnológica na fabricação do cimento Portland

1824

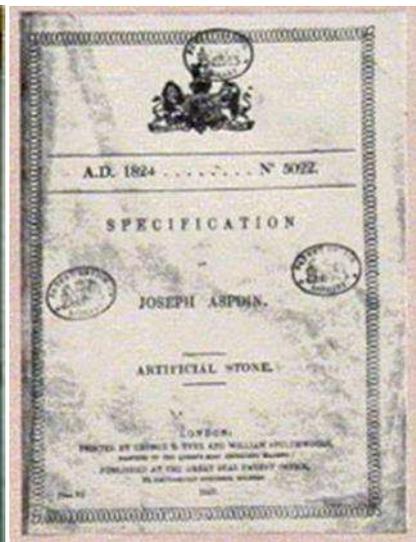
## Patente do Cimento Portland



Joseph Aspdin  
CALCÁRIO + ARGILA  
(Calcinados)



Ilha de Portland,  
Sul da Inglaterra

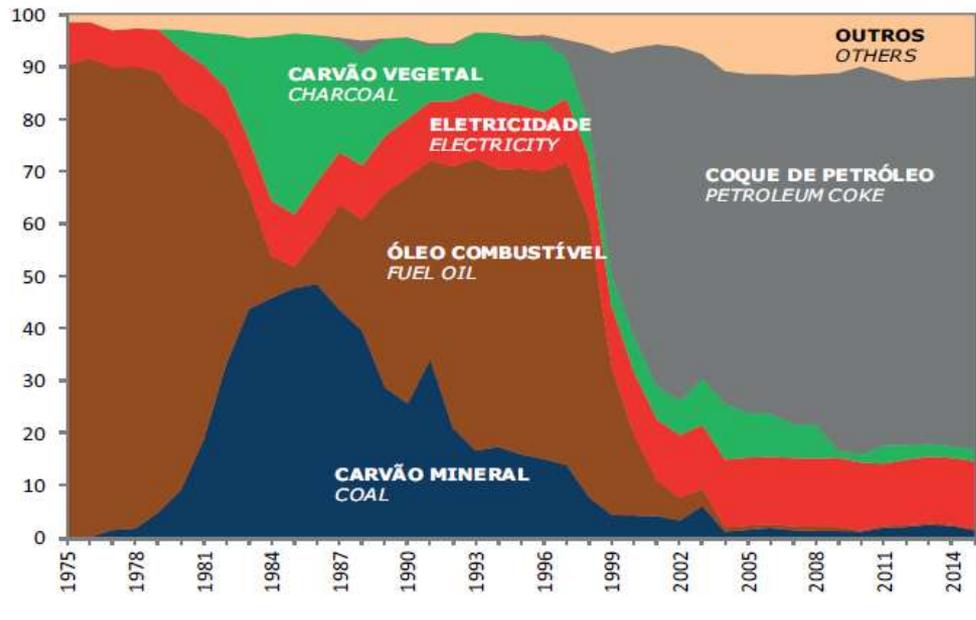


Pedra artificial  
Patente

Mesmo princípio básico  evolução tecnológica

# Evolução tecnológica na fabricação do cimento no Brasil

- Sistema via úmida para sistema via seca (99%)
- Preaquecedores e Precalcinadores (2730 MJ/t )
- Queimadores especiais para coque e resíduos
- Maçaricos ecológicos
- Moinhos e Separadores de alta eficiência (104 kWh/t)



Fonte: BEN, 2016

# Evolução tecnológica na fabricação do cimento no Brasil

## ■ Resultado: cimentos com excelente desempenho

- Os cimentos brasileiros ultrapassam expressivamente as exigências mínimas das normas técnicas

Cimento	1 dia		3 dias		7 dias		28 dias	
	Norma	Média	Norma	Média	Norma	Média	Norma	Média
CP II-E-32	-	9,3	10,0	22,0	20,0	29,8	32,0	40,8
CP II-F-32	-	14,3	10,0	24,9	20,0	30,7	32,0	38,5
CP III-32	-	5,2	10,0	15,9	20,0	25,7	32,0	42,7
CP III-40	-	8,5	12,0	22,1	23,0	33,5	40,0	51,4
CP IV-32	-	12,0	10,0	21,2	20,0	27,2	32,0	38,8
CP V-ARI	14,0	25,1	24,0	35,5	34,0	41,8	-	49,8
CP V-ARI-RS	11,0	20,7	24,0	34,2	34,0	41,8	-	49,8

Fonte: Controle do Selo de Qualidade ABCP

# Grande desafio da indústria mundial do cimento

- Mitigação das emissões dos gases de efeito estufa
- **A indústria somente terá um futuro sustentável se a taxa de inovações tornar-se maior que a taxa de restrições.**

Na Europa o número de regulamentos ambientais cresceu de 19 em 1990 para 635 em 2010



Fonte: Chandelle, 2011

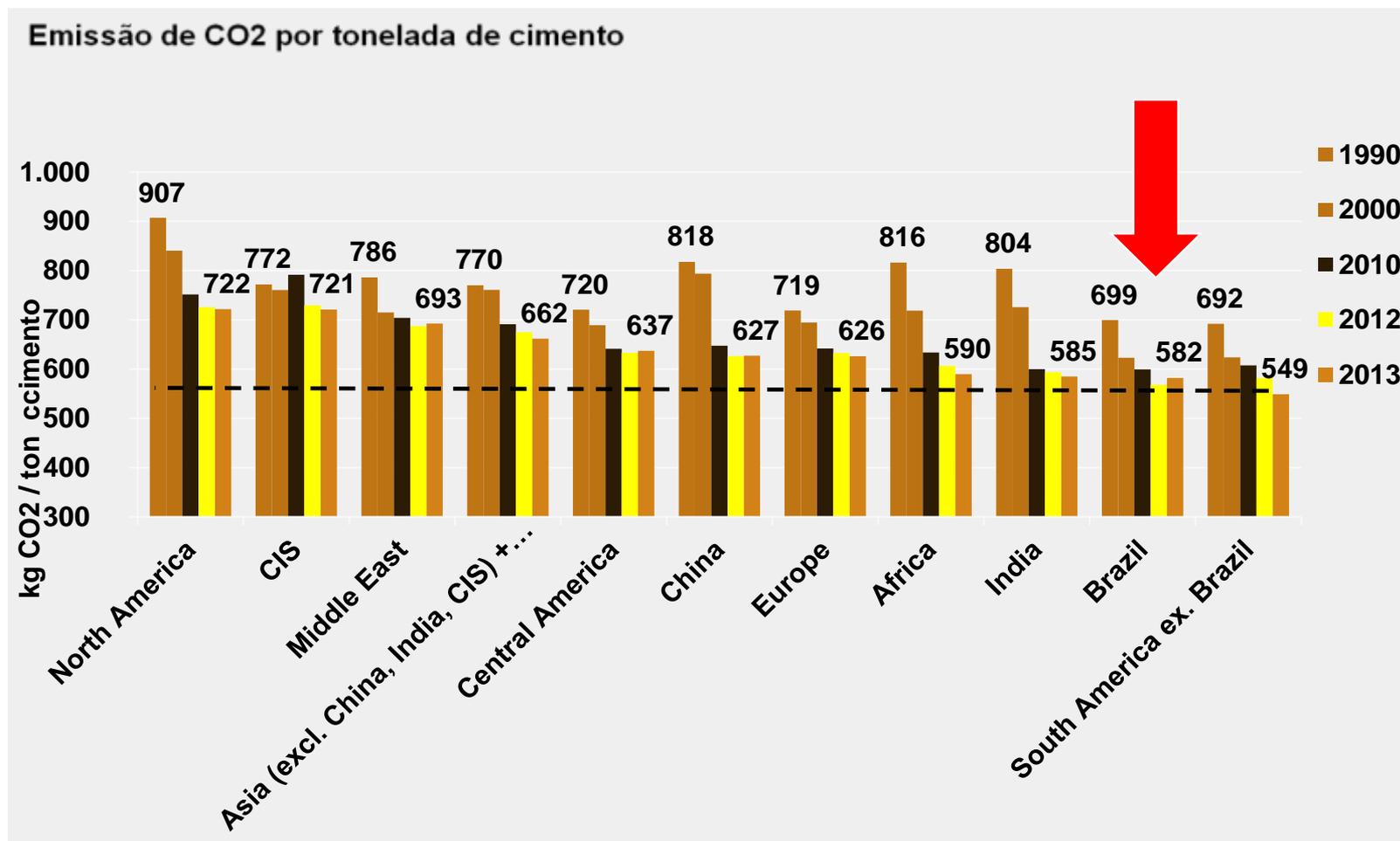
# Os quatro vetores mundiais para mitigação das emissões

- Eficiência energética
- Combustíveis alternativos
- Cimentos com adições
- Captura e armazenamento de carbono

**A participação da indústria do cimento mundial é 5% das emissões totais de CO<sub>2</sub>.**

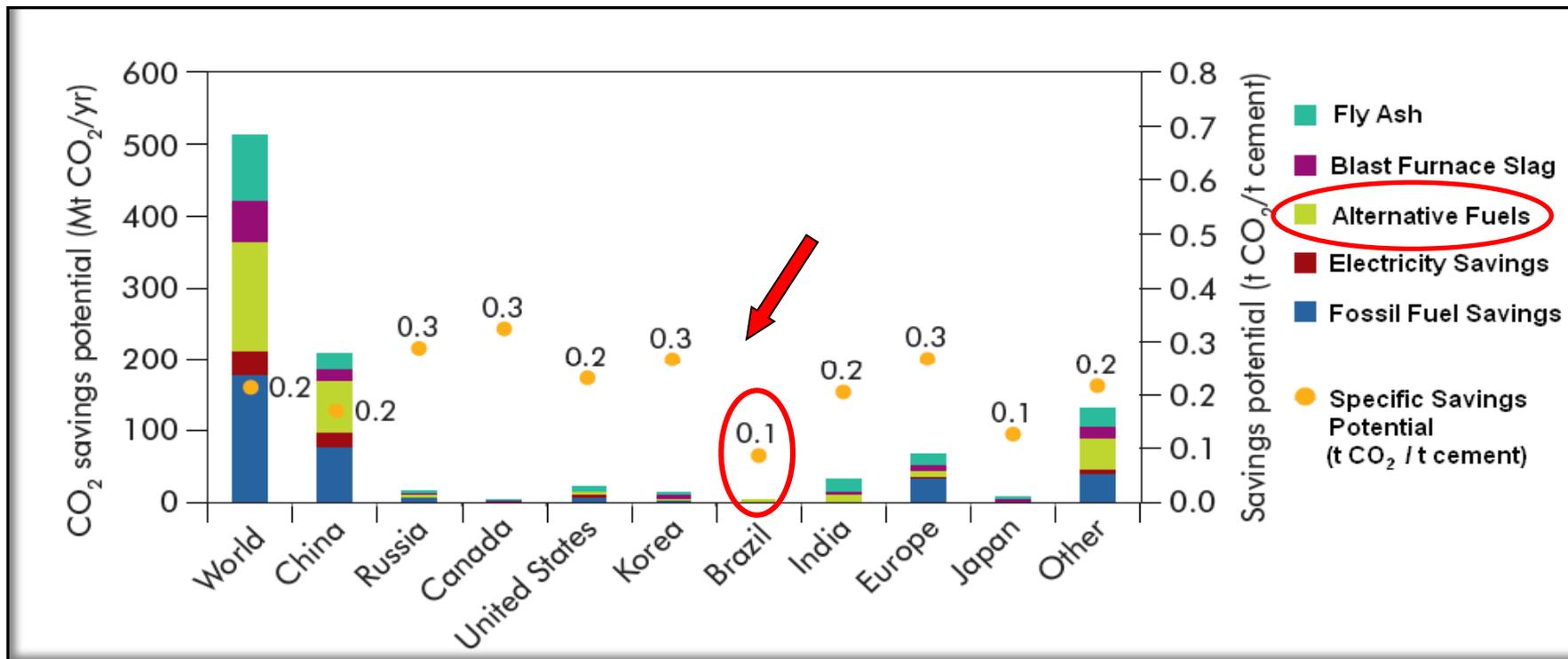
**Mas há diferenças expressivas entre diferentes países ou regiões**

# Emissões de CO<sub>2</sub> do Cimento (CSI)



Fonte: *Getting the Numbers Right (GNR) WBCSD-CSI (2015)*

# Potencial de redução de CO<sub>2</sub>

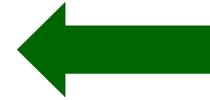


**O Brasil tem o menor potencial redução de emissão de CO<sub>2</sub> em comparação com outros países produtores de cimento, com base nas melhores tecnologias disponíveis (BAT)**

Fonte: IEA – International Energy Agency/2009

# Os quatro vetores mundiais para mitigação das emissões

- Eficiência energética
- Combustíveis alternativos
- Cimentos com adições
- Captura e armazenamento de carbono



limitações

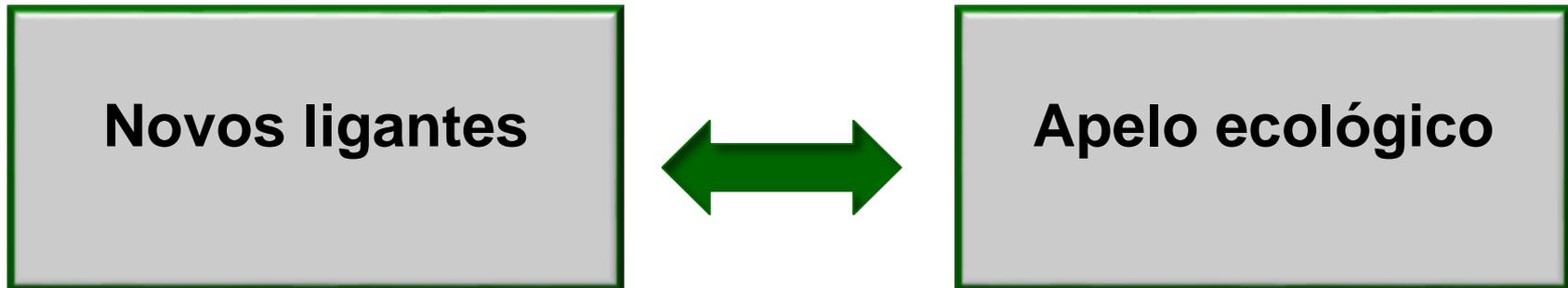


**A captura e armazenamento de carbono constitui atualmente tecnologia cara e tecnicamente impraticável, mas é a solução do futuro para a indústria em termos de minimização das emissões.**

# Ambiente favorável para novos ligantes

~~Desempenho~~

- Diminuição das emissões dos gases de efeito estufa



# Novos ligantes

---

- **Novacem**
- **Ceramicrete**
- **Cimentos com nanotubos de carbono**
- **Energy modified cement (EMC)**
- **Calera**
- **Cimento de sulfoaluminato de cálcio (CSA)**

# Novos ligantes

- **Novacem**
- Ceramicrete
- Cimentos com nanotubos de carbono
- Energy modified cement (EMC)
- Calera



- Ligante desenvolvido no Imperial College Inglaterra, a partir de silicato de magnésio em 2005

**Cimento Portland  $\neq$  Cimento Novacem**

## Cimento Portland

CO<sub>2</sub> do combustível(1450°C)



■ Clínquer + Adições  $=$  cimento Portland

- Princípio básico de fabricação do cimento Novacem

## Cimento Novacem

CO<sub>2</sub> do combustível (700°C)



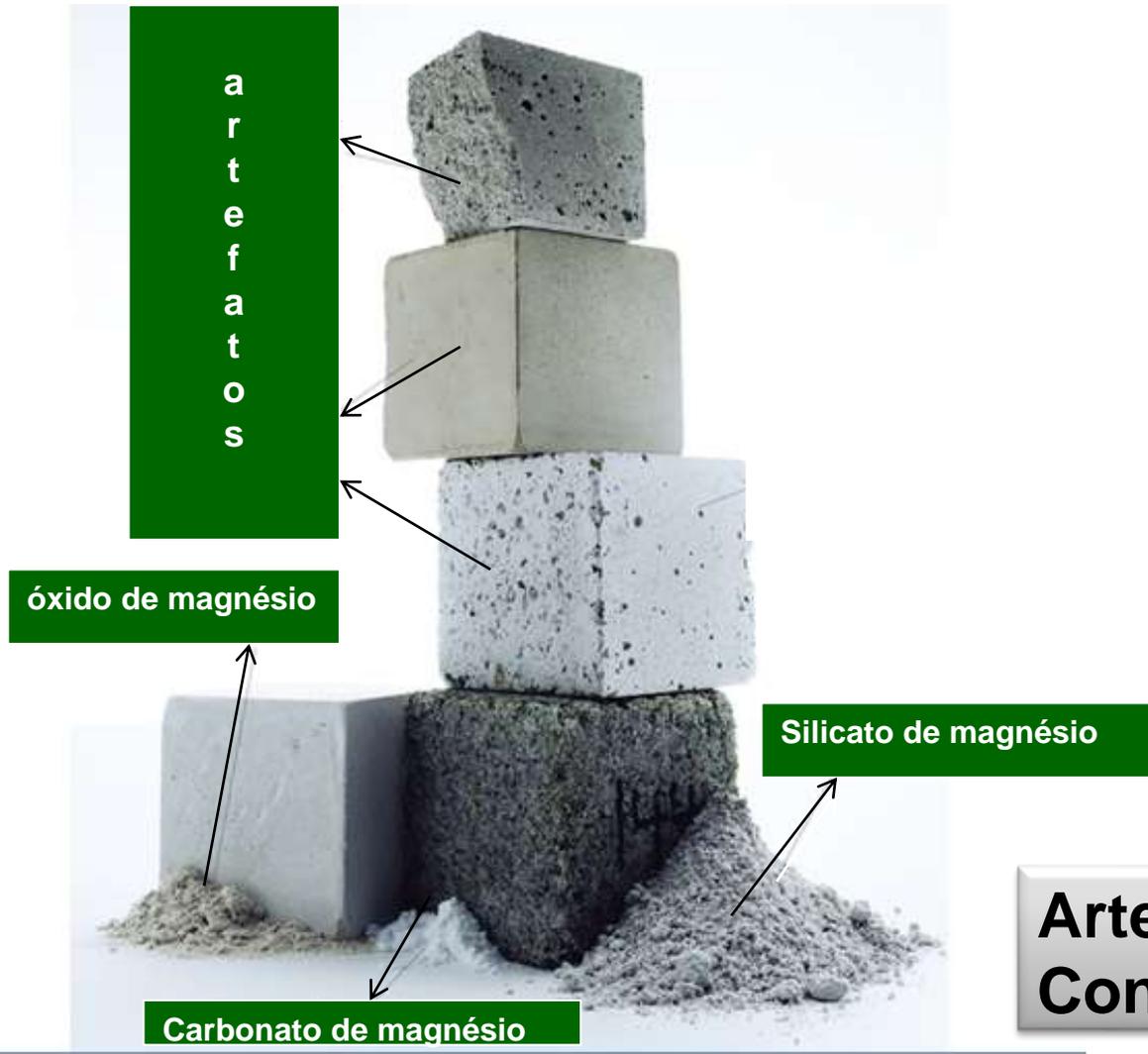
(carbonatos hidratados de magnésio)

- **Comparação da emissão de CO<sub>2</sub> ( kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento)**

<b>Ligante</b>	<b>Fabricação</b>	<b>uso</b>	<b>saldo</b>
<b>Cimento Portland</b>	<b>800 kg</b>	<b>400 kg</b>	<b>400kg</b>
<b>Novacem</b>	<b>300kg</b>	<b>900 kg</b>	<b>- 600 kg</b>

Fonte: Fabricante

# Aplicações do Novacem



**Artefatos de concreto**  
**Concreto estrutural**

# Cronologia do cimento Novacem

- Pesquisa no Imperial College 2005
- Inovações na formulação 2007
- Empresa incubadora (Novacem) outubro 2008
- Processo em escala de laboratório outubro 2009
- Premio MIT - Top 10 Emerging Technology abril 2010
- Parceria Lafarge – 1 bilhão de libras julho 2010
- Ensaio de validação do produto agosto de 2011
- Fabricação em escala comercial 2014
- Insolvência e venda a Calix ( stand by ) 2015



- Nicho de mercado
- Matéria prima : reservas mundiais 10 trilhões de toneladas
- Custo
- Apelo ecológico
- Citado no relatório WBCSD/IEA - redução de emissão de CO<sub>2</sub> até 2050 – Cement Technology Roadmap, 2009

# Novos ligantes

---

- Novacem
- **Ceramicrete**
- Cimentos com nanotubos de carbono
- Energy modified cement (EMC)
- Calera
- Cimento de sulfoaluminato de cálcio (CSA)



- Princípio básico de fabricação
- MgO obtido a partir da calcinação de carbonatos ou silicatos de magnésio
- $\text{MgO} + \text{KH}_2\text{PO}_4 + 5\text{H}_2\text{O} \text{ ---> } \text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ← MKP
- MKP + Cinzas volantes

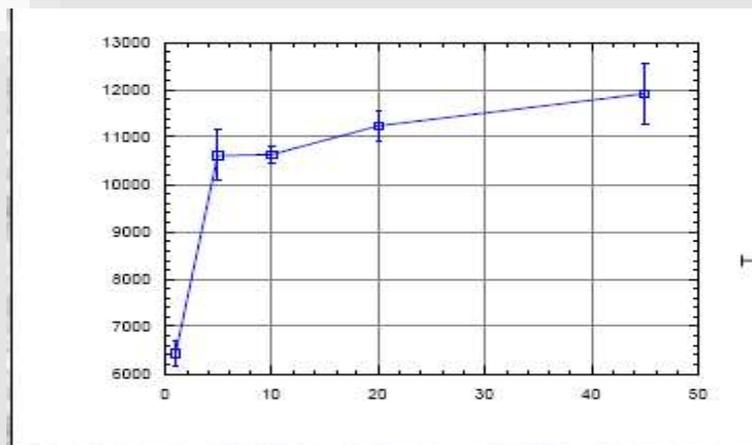
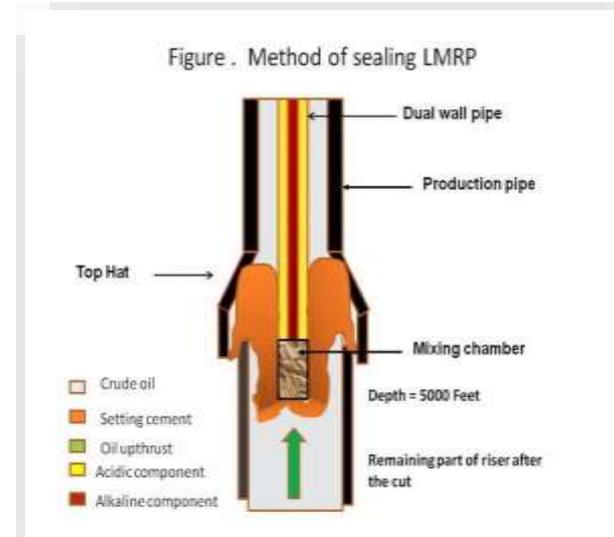
# Propriedades do Ceramicrete

- Pasta com tempo de pega controlado
- Resistência : 3 x Cimento Portland

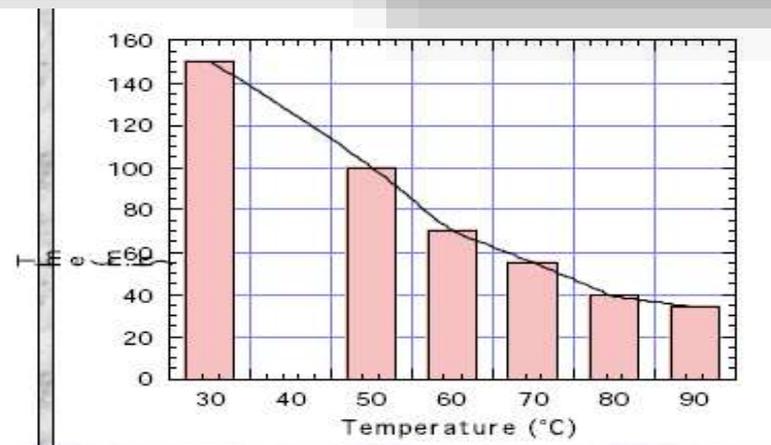


# Aplicações do Ceramicrete

- **Estabilização de resíduos radioativos**
  - Aplicação original
- **Construção civil**
  - Grautes e selantes de poços petrolíferos
- **Cimentos odontológicos**
  - Ainda em testes iniciais



Strength gain at room temperature



Setting time at subsurface temperatures

# Percepção

- Não tem potencial de substituir o cimento portland
- Aplicações especiais para reparos e selante de poços petrolíferos
- Alto custo
- Não se encontrou na literatura técnica internacional uso em concreto.



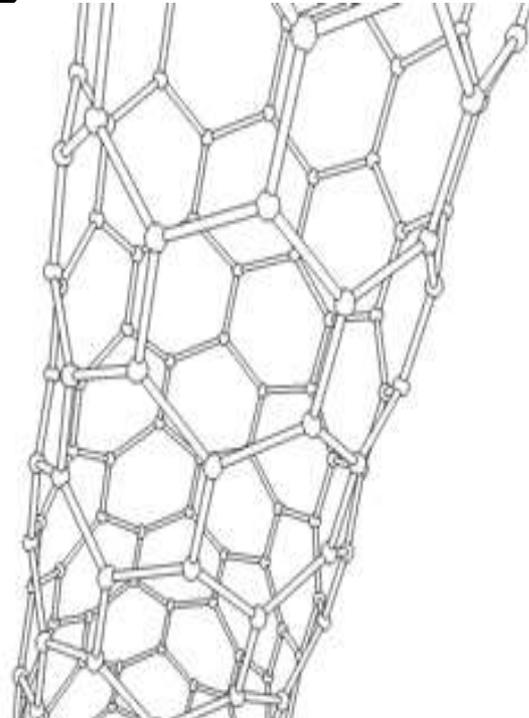
Aspecto da pasta



Reparo de pavimento

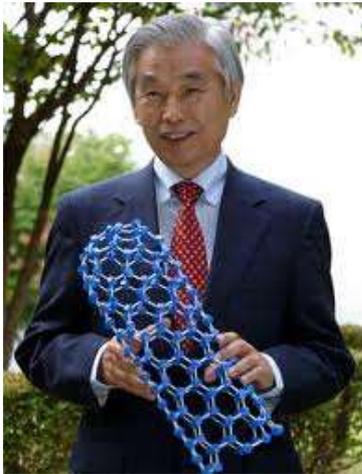
# Novos ligantes

- Novacem
- Ceramicrete
- **Cimentos com nanotubos de carbono**
- Energy modified cement
- Calera
- Cimento de sulfoaluminato de cálcio

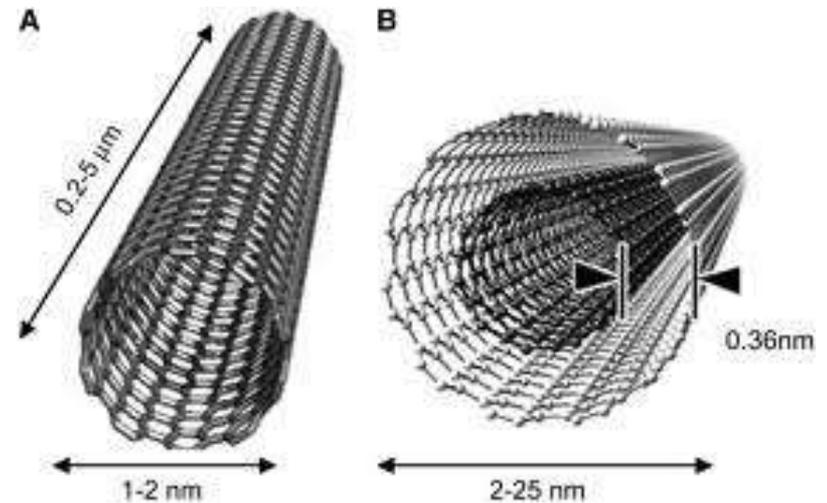


# Cimento com nanotubos de carbono

- Nanotubos descobertos em 1991 no Japão
- Dimensões  $10^{-9}$  m
- 50 x mais resistentes que o aço
- Alto condutor elétrico e térmico
- Interesse acadêmico - 5000 trabalhos desde 2006
- Aplicações plástico, tecidos, tintas etc
- Alto custo US\$500/g



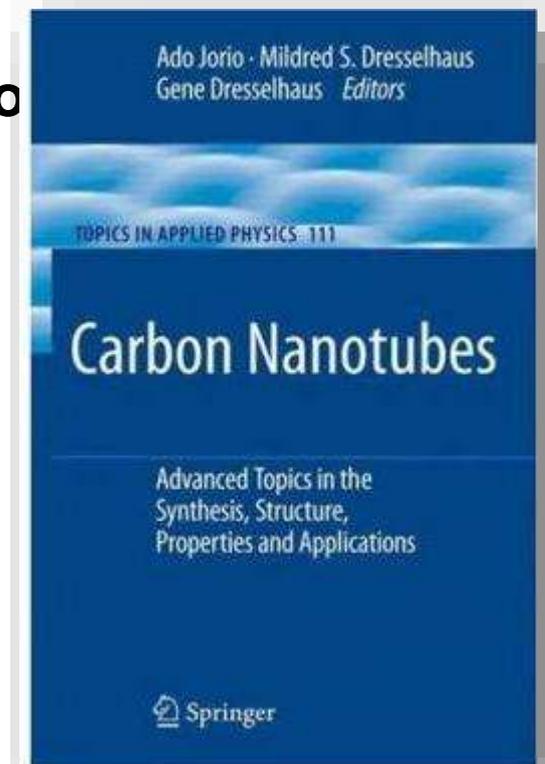
Inventor: Dr Sumio Iijima



# Aplicações nanotubos de carbono

- Vidros autolimpantes
- Óleos ultralubrificantes
- Tintas anti-risco
- Embalagem de alimentos (vida longa)
- Materiais mais leves e resistentes que o aço
- Resistentes a alta temperatura

Material	Young's modulus (GPa)	Tensile Strength (GPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Single wall nanotube	1054	150	1.4
Multi wall nanotube	1200	150	2.6
Diamond	600	130	3.5
Kevlar	186	3.6	7.8
Steel	208	1.0	7.8
Wood	16	0.008	0.6



# Propriedades dos cimentos com nanotubos de carbono

- Adição de nanotubos de carbono (0,3%)
- Aumento da resistência à tração (25%)
- Aumento da resistência à compressão (80%)
- Aumento da durabilidade
- Custo de saco de 50kg US \$ 1.500,00

## NANOCEM- European Research Network

- 120 pesquisadores
- 60 teses em nanotecnologia
- 37 entidades acadêmicas e indústrias de cimentos



# Cimentos com nanotubos de carbono

## A experiência brasileira



### PROCESSO DE PRODUÇÃO CONTÍNUA E EM LARGA ESCALA DE NANOTUBOS DE CARBONO NO CIMENTO PORTLAND

ICEEx - Departamento de Física - Laboratório de Nanomateriais  
Prof. Luiz Orlando Ladeira

[tranferencia@ctit.ufmg.br](mailto:tranferencia@ctit.ufmg.br)

[www.ufmg.br/ctit](http://www.ufmg.br/ctit)

Obtido do processo de síntese de nanotubos de carbono sobre o  
clínquer de cimento diretamente e simultâneo à produção do  
cimento.



# Cimentos com nanotubos de carbono

## Síntese a partir do clínquer e não adição ao cimento

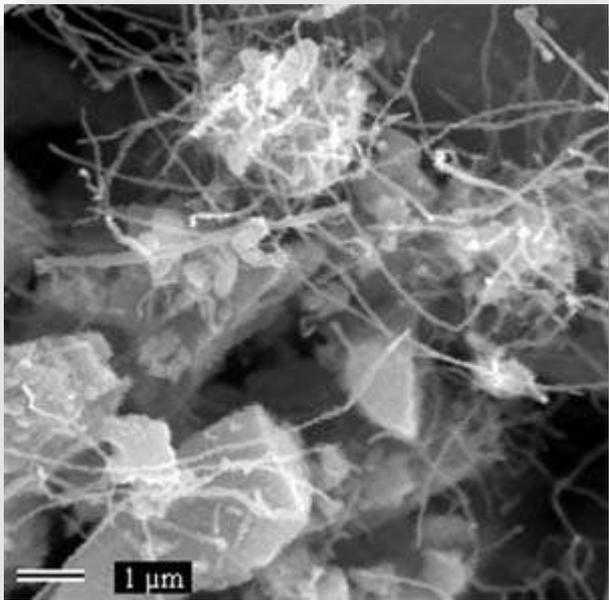


Imagem de microscopia eletrônica de varredura do supercimento: os nanotubos de carbono entrelaçam as partículas do clínquer de cimento (foto: Luiz O. Ladeira)

### UFMG está mais próxima do cimento ultra-resistente

**UFMG**

**Luiz O. Ladeira**  
Coordenador de Engenharia

Professores de Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) estão desenvolvendo um novo tipo de cimento ultra-resistente. O projeto, liderado pelo professor Luiz O. Ladeira, prevê a síntese de nanotubos de carbono diretamente a partir do clínquer de cimento, em vez de adicioná-lo posteriormente. O novo material, batizado de "supercimento", promete ser 50% mais resistente que o cimento convencional e pode ser usado em obras de infraestrutura, como pontes e túneis. O projeto é financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e tem como parceiros a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

O professor Ladeira explica que o objetivo é desenvolver um cimento que seja mais resistente e durável, além de ser mais sustentável. "Atualmente, o cimento é produzido a partir de materiais que geram muita poluição e consomem muita energia", diz ele. "Nosso objetivo é criar um material que seja mais sustentável e que possa ser usado em obras de infraestrutura, como pontes e túneis. O projeto é financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e tem como parceiros a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)."

O professor Ladeira também explica que o novo material é mais resistente que o cimento convencional porque os nanotubos de carbono se entrelaçam com as partículas de clínquer, criando uma estrutura mais forte. "O novo material é mais resistente porque os nanotubos de carbono se entrelaçam com as partículas de clínquer, criando uma estrutura mais forte", diz ele. "O novo material é mais sustentável porque é produzido a partir de materiais que geram menos poluição e consomem menos energia. Além disso, o novo material é mais durável porque os nanotubos de carbono são muito resistentes à corrosão e ao desgaste. Isso significa que o novo material pode ser usado em obras de infraestrutura por um período muito mais longo de tempo. O projeto é financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e tem como parceiros a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)."

Luiz O. Ladeira, professor da UFMG. "O custo do produto é alto, mas vale a pena porque o cimento ultra-resistente é mais sustentável e pode ser usado em obras de infraestrutura por um período muito mais longo de tempo. O projeto é financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e tem como parceiros a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)."

Segundo o Prof Ladeira o custo do saco de cimento seria o dobro

# Cimentos com nanotubos de carbono

## A experiência brasileira

FOHJA DE S. PAULO  
SEXTA-FEIRA, 10 DE JULHO DE 2014 - C\$

# ciência+saúde

## Brasil terá primeiro centro de tecnologia em nanotubos

Parceria de R\$ 36,2 milhões envolve UFGM, Petrobras e INDES para produzir o material em escala industrial

**Nanotubo de carbono é formado por estrutura com a espessura de um átomo e pode ser muito mais forte que o aço**

**OS NOVOZ PRINHO DO DIAMANTE**  
Nanotubos, fulerenos e grafeno pertencem a família de materiais de carbono

**ESTRUTURA DO CARBONO**  
As ligações químicas entre átomos de carbono criam várias de suas formas. As estruturas, ditas a três dimensões, são a grafite, o grafeno e o diamante.

**QUE É GRAFENO**  
É o carbono formado de carbono com apenas um átomo de espessura

**FULERENO**  
Molécula de carbono formada por átomos de carbono unidos em uma esfera com 60 átomos

**NANOTUBO**  
Formado por um tubo de parede de grafeno enrolado em torno de si

**PRODUTO É USADO PARA INJEÇÃO DE MATERIAL GENÉTICO**  
Um nanotubo de carbono é usado para injetar material genético em células de uma bactéria

**IMPORTÂNCIA DO NANOTUBO**  
Um nanotubo de carbono é usado para injetar material genético em células de uma bactéria

**CIMENTO E COLA**  
Um dos projetos em andamento é a produção de um cimento com nanotubos de carbono. A ideia é que os nanotubos de carbono sejam adicionados ao cimento para torná-lo mais resistente e durável.

**EM 2013, O LABORATÓRIO DE MATERIAIS DO INSTITUTO DE QUÍMICA DA UFPA, EM BELÉM, PARÁ, NA PRODUÇÃO REGULAR DE UM MATERIAL, QUE SERÁ USADO EM PROJETOS DE INFRAESTRUTURA PARA AEROPORTOS E OBRAS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. O MATERIAL É O CIMENTO COM NANOTUBOS DE CARBONO. A IDEIA É QUE OS NANOTUBOS DE CARBONO SEJAM ADICIONADOS AO CIMENTO PARA TORNÁ-LO MAIS RESISTENTE E DURÁVEL.**

# O grafeno e seus desafios

Mackenzie traz cientista brasileiro radicado no exterior e investe na formação de novo centro de pesquisa



As pesquisas devem migrar para outras áreas do concreto



# Cimentos com nanotubos de carbono

Devido aos altos custos pesquisas na Espanha e Japão direcionaram para outras propriedades do concreto que não resistência, tais como as características de isolantes térmicos e acústicos e armazenador de calor.

A adição dos nanotubos transforma o concreto com baixa condutibilidade elétrica para excelente condutor e ao aplicar uma corrente contínua o concreto se aquece e retém calor, aquecendo as paredes e pisos, trazendo conforto aos usuários desses ambientes



**Bloco de concreto com grafeno nos EUA: mais leve, resistente e alto desempenho termoacústico**



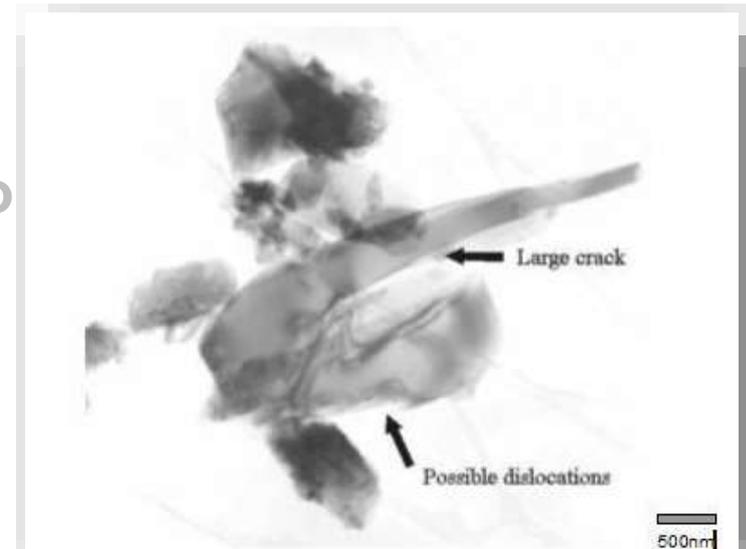
**Aerogel de grafeno para corrigir imperfeições termoacústicas de paredes**

# Percepção

- Não tem potencial de substituir o cimento portland convencional
- Alto custo
- Pesquisa incipiente em cimento
- Não é citado no relatório WBCSD/IEA - redução de emissão de CO<sub>2</sub> até 2050 – Cement Technology Roadmap, 2009
- Nicho de mercado
- **Utilização em painéis, paredes e pisos para aquecimento de instalações de edifícios**

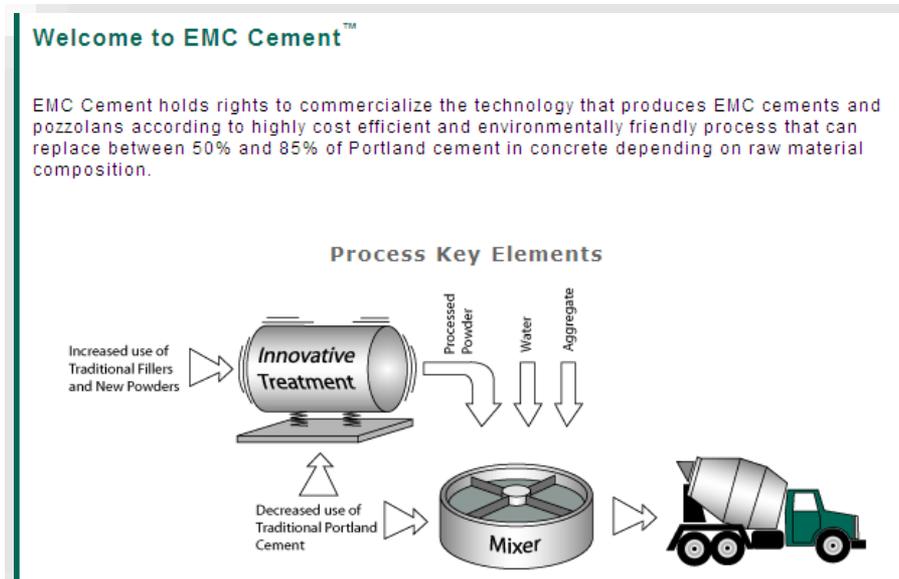
# Novos ligantes

- Novacem
- Ceramicrete
- Cimentos com nanotubos de carbono
- **Energy modified cement (EMC)**
- Calera
- Cimento de sulfoaluminato de cálcio



# Cimento modificado energeticamente (EMC)

- Cimento portland similar ao tradicional cujo clínquer apresenta alta reatividade obtida por procedimentos diferenciados da moagem.
- Desenvolvido nos anos 90 na Suécia. **EMC Cement tem patente**
- Variante do processo aplicado em cinzas volantes nos Estados Unidos CEM POZ (Texas Industry)



 Texas EMC Products, Ltd.  
Cem-Pozz NG

Home | About Us | Product Info | Contact Us

The Texas EMC Products plant location is in Jewett, Texas with corporate offices in The Woodlands, Texas.

We use a patented process to prepare pozzolans for use as supplementary cementitious materials (SCM) that replace Portland cement at 50 to 60% or higher replacement rate. We also make a "green" Type 1 GU cement.

Our products qualify for high LEED points and CO2 credits.

Limestone Plant	Corporate Office
157 LCR 900 Jewett, TX 77045 903-625-4111 Ph 903-625-4150 Fax	2204 Timberloch Place, Suite 248 The Woodlands, TX 77290 281-419-2422 Ph 281-419-2448 Fax



# Cimento modificado energeticamente (EMC)

## ■ Princípio básico da Fabricação

**Clínquer portland**

**Clínquer ativado**

**Moinho de bolas**

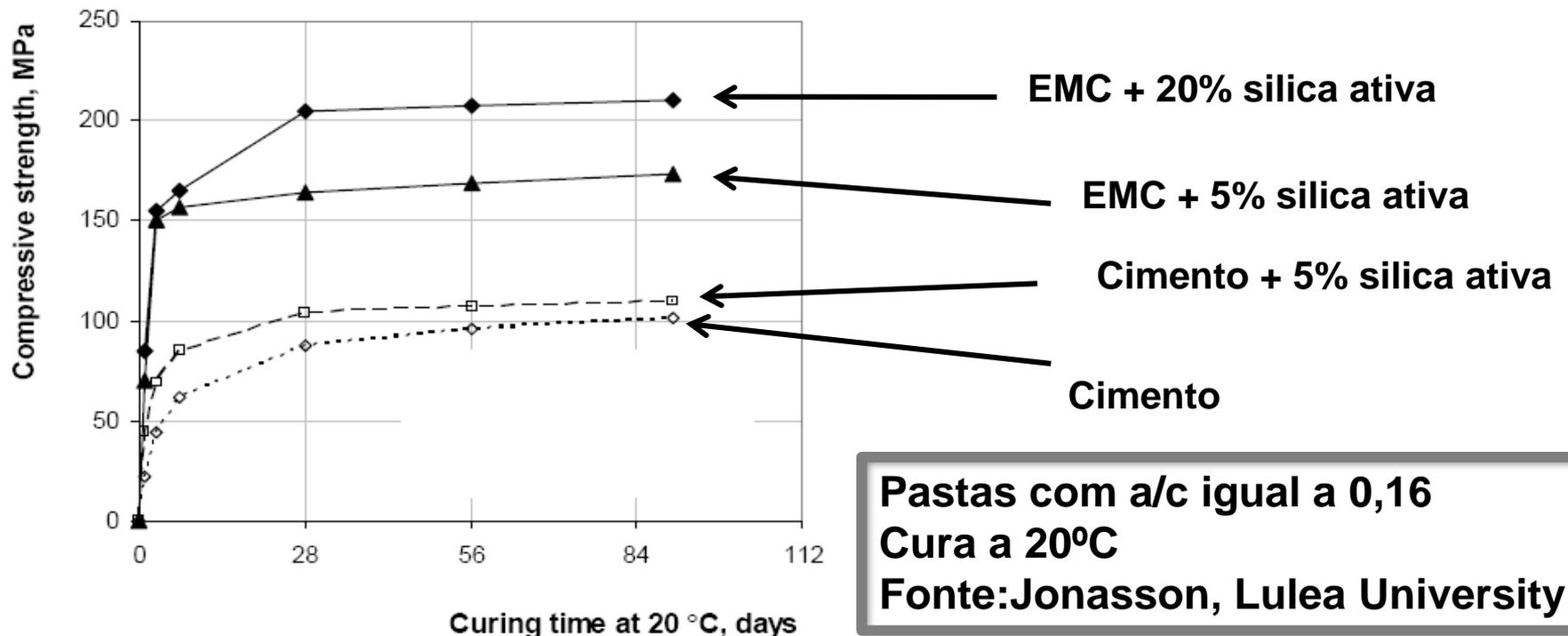
**Moinho de alta vibração e  
impacto das partículas  
(vibrating mill)**

**Reatividade: aumento da finura**

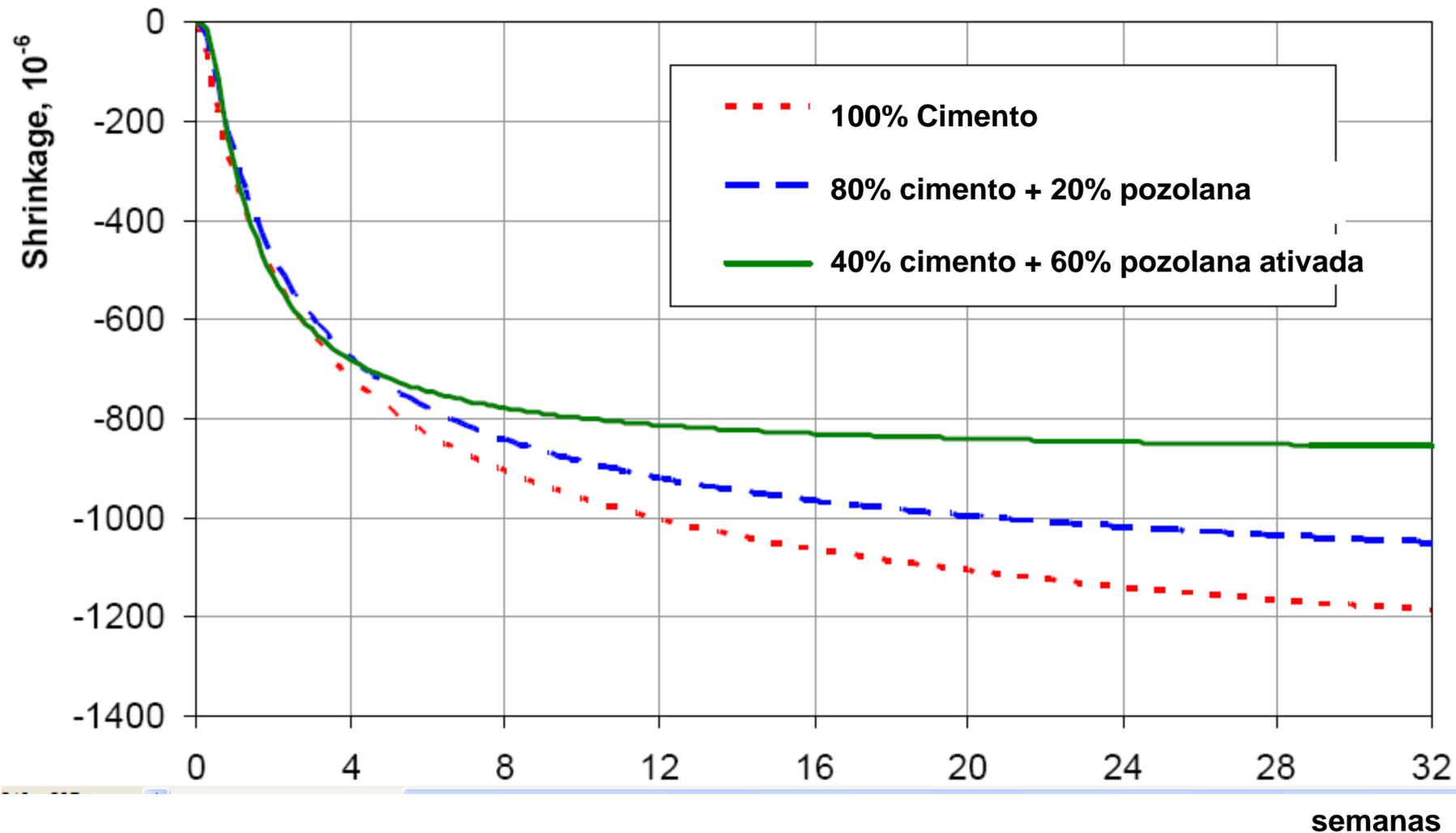
**Reatividade: microfissuração e  
deformação ( finura)**

# Propriedades do EMC- hidratação e resistência mecânica

- Formação precoce de portlandita
- Maior formação de C-S-H
- Maior resistência inicial
- Menor teor de clínquer no concreto: menor emissão



# Propriedades do EMC- retração

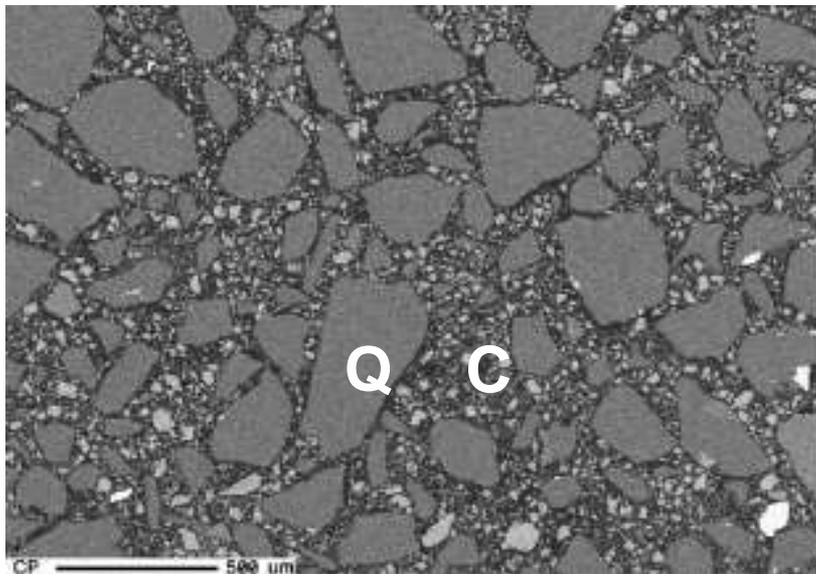


Fonte:Jonasson, Lulea University

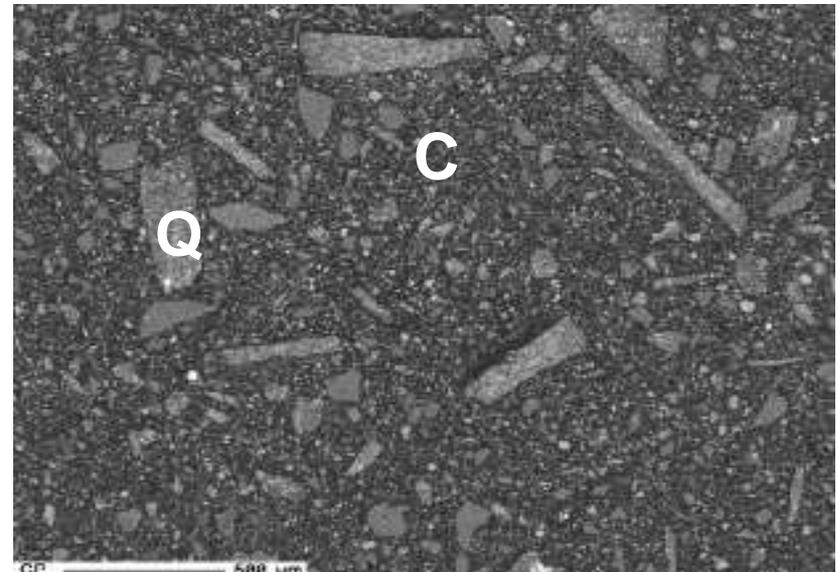


# Aplicações do cimento modificado energeticamente

- Em todos os campos da tecnologia do concreto
- Clínquer ativado energeticamente
- Adições ativas ou inertes modificadas energeticamente



**Moagem normal**



**Moagem EMC**

Fonte: Justnes, 2005 CCR

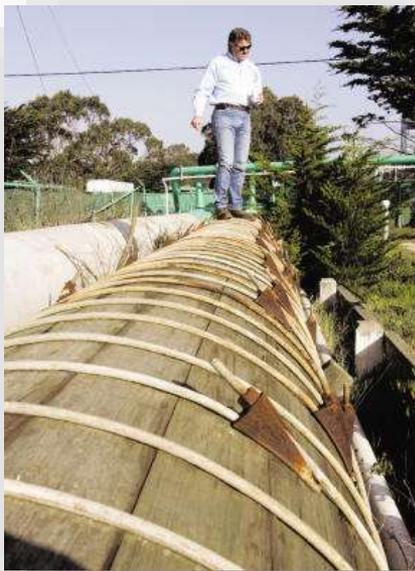
- **Pressão ambiental estimula o uso de menor clínquer no concreto**
- **Cimenteira americana (Texas Industry) já fabrica o Cem Pozz**
- **Trabalhos experimentais são numerosos e mostram viabilidade técnica**
- **Falta convencimento da indústria de cimento para fazer os investimentos**

# Novos ligantes

- Novacem
- Ceramicrete
- Cimentos com nanotubos de carbono
- Cimento TX active
- Energy modified cement
- **Calera**
- Cimento de sulfoaluminato de cálcio (CSA)



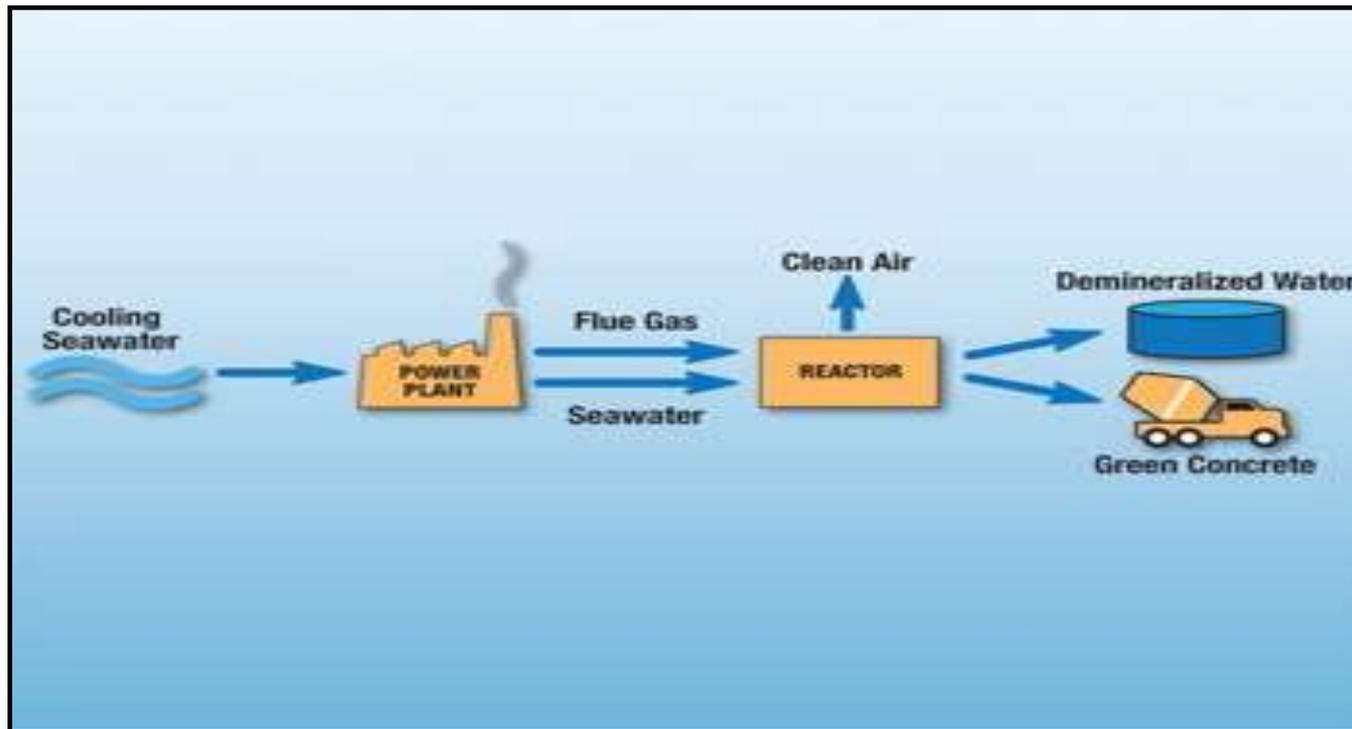
- Empresa situada em Los Gatos, Califórnia especializada na captura de CO<sub>2</sub>.
- Produtos: carbonatos de cálcio ou magnésio
- No geral não é tipo novo de cimento
- Processo: Carbonate Mineralization by Aqueous Precipitation



**Empresa de 9 anos  
Reconhecida pelo Departamento Energia EUA  
Projeto piloto instalado na Termelétrica de  
Moss Landing**

## ■ Princípio básico de fabricação

- captura de  $\text{CO}_2$  através de dutos que levam gases das fontes emissoras num recipiente contendo água do mar ou salobra, com precipitação de carbonatos .



# Aplicações do produto da Calera

- Matéria prima para a fabricação de clínquer
- Adição ao cimento como filler (maior potencial)
- Uso como agregados calcários
- Uso como novo cimento (vaterita --- aragonita)

## Energy Dept. spends \$106M to put captured CO<sub>2</sub> to use

July 22, 2010 | Camille Ricketts

1 Comment

The Energy Department followed up its [pledge today to invest \\$122 million in converting sunlight into fuels](#) with another announcement: \$106 million in new stimulus funding for six projects working to convert carbon dioxide emissions into plastics, fuel, cement, fertilizer and other products. The idea is not only to eliminate harmful emissions from the atmosphere, but also to put them to good use.

Carbon sequestration is still a huge question mark. While efforts are currently being made to bury emissions from power plants and factories indefinitely, it's a solution that can't work everywhere, and may not last as is. Trapping carbon emissions in the form of usable products may increasingly supplement other carbon capture methods.

## Calera Corporation CEMENT FROM CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>



PESWiki.com

# Percepção

- Nicho específico de mercado (vaterita)
- Mercado mais amplo se usado como fíler substituindo cimento
- Custo
- Apelo ecológico- sequestro de carbono
- Citado no relatório WBCSD/IEA - redução de emissão de CO<sub>2</sub> até 2050 – Cement Technology Roadmap, 2009
- 2 fábricas-piloto

# Novos ligantes

- Novacem
- Ceramicrete
- Cimentos com nanotubos de carbono
- Cimento TX active
- Energy modified cement
- Calera
- **Cimento de sulfoaluminato de cálcio (CSA)**



# Cimento à base de sulfoaluminato de cálcio (CSA)

## ■ Princípio básico da Fabricação

**Clínquer  
portland**

**Clínquer  
sulfoaluminato**

**Calcário + argila**

**Calcário+ bauxita + anidrita**

**Composição: silicatos e aluminatos cálcicos (  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  )**

**Composição:  $C_3A$ . $CaSO_4$  e  $C_2S$  ( yeelimita )**

**Temperatura: 1400 °C– 1500 °C**

**Temperatura: 1250 °C– 1350 °C**

# Propriedades do cimento de sulfoaluminato de cálcio (CSA)

- Alta resistência inicial
- Maior resistência química
- Maior resistência aos sulfatos
- Maior retração
- Menor emissão de CO<sub>2</sub>

## Exemplo real de um ensaio

Resistência à compressão (MPa)		tempos de pega (min.)		finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
3 h	24,8	<b>Início</b>	<b>10</b>	<b>6170</b>
6 h	31,6			
12 h	40,3			
1 dia	44,0	<b>Fim</b>	<b>15</b>	
3 dias	50,7			
7 dias	55,2			
28 dias	60,4			

# Aplicações do cimento de sulfoaluminato de cálcio (CSA)

- Em todos os campos da tecnologia do concreto
- Especialmente para reparos para liberação rápida
- Combinação com o cimento Portland
- Cuidados com variação dimensional (expansão e retração)

**Buzzi (NEXT)**

**Heidelberg (BCT)**

**Italcementi (ALIPRE)**

**Vicat (ALPENAT)**

**Lafarge (AETHER)**

# Percepção

---

- **Pressão ambiental estimula o uso de cimento com baixa emissão de gases de efeito estufa**
- **No Brasil representante de cimento importado**
- **Não é totalmente conhecida sua durabilidade a longo prazo**
- **Em processo de normalização na Europa**
- **Alto custo**
- **Nicho de mercado**

# Conclusão

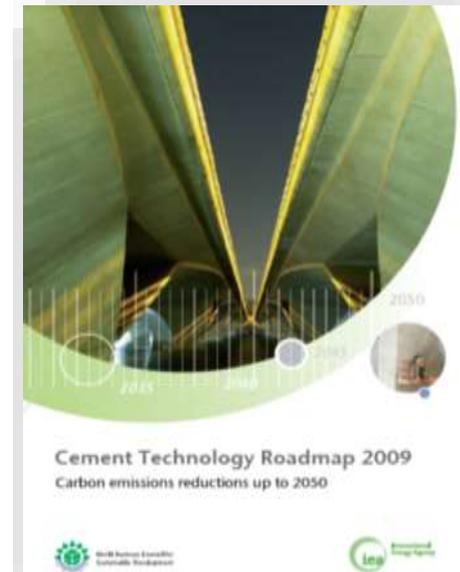
O estágio atual das investigações e iniciativas mostradas permite concluir que embora possam contribuir para aplicações específicas não constituem um substituto do cimento portland em larga escala.

Processos ainda em desenvolvimento que precisam provar que:

Economicamente viáveis.

Comportamento de bom desempenho ao longo do tempo.

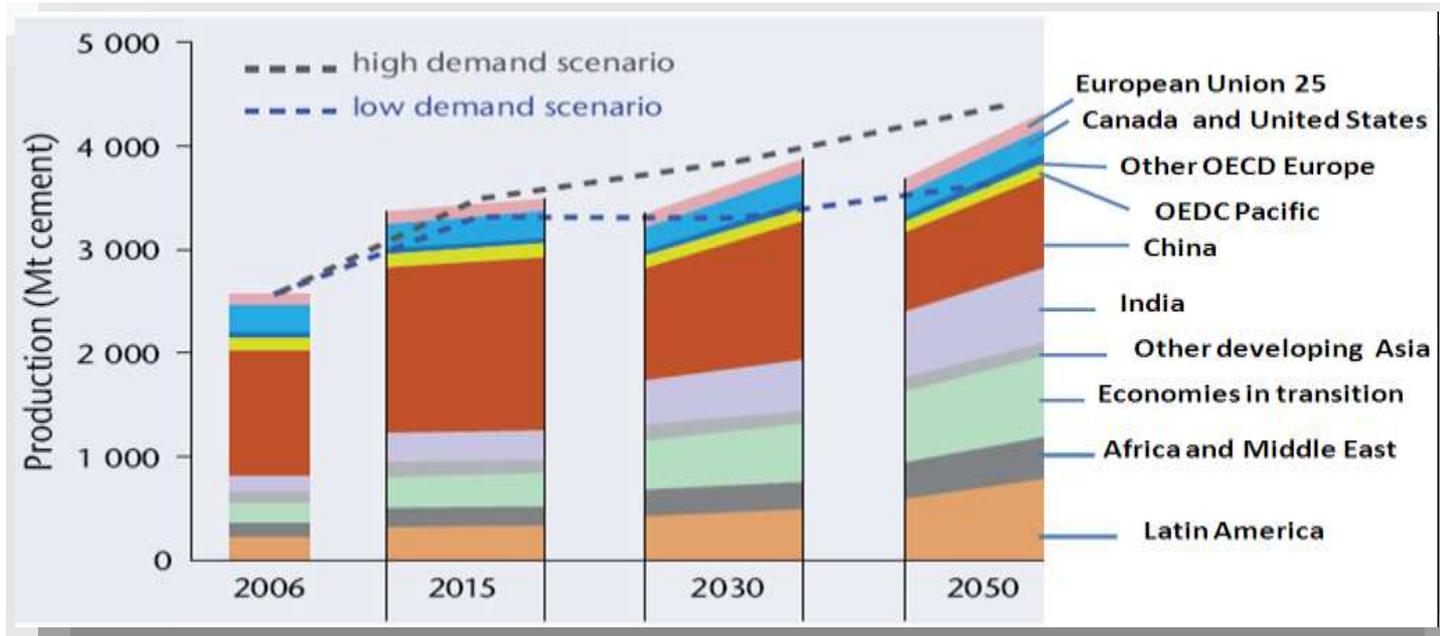
Aceitação na indústria da construção.



# Conclusão

O cimento Portland permanecerá por longo tempo como material chave para satisfazer às necessidades globais de infra-estrutura e habitação e, como consequência, a indústria estará enfrentando desafios crescentes.

## Previsão de consumo de cimento Portland até 2050



Fonte: IEA, 2009  
Schneider, 2011



Muito Obrigado!