

Impacto Ambiental da Indústria Cimenteira e o Desenvolvimento de Novos Eco-Cimentos

Mauricio Mancio

mancio@ufrgs.br



ECO-CIMENTOS

Mauricio Mancio

mancio@ufrgs.br



Desenvolvimento de Cimentos Não-Portland

Mauricio Mancio

mancio@ufrgs.br





EcoCimentos

1) Por quê?

2) O que?

3) Como?

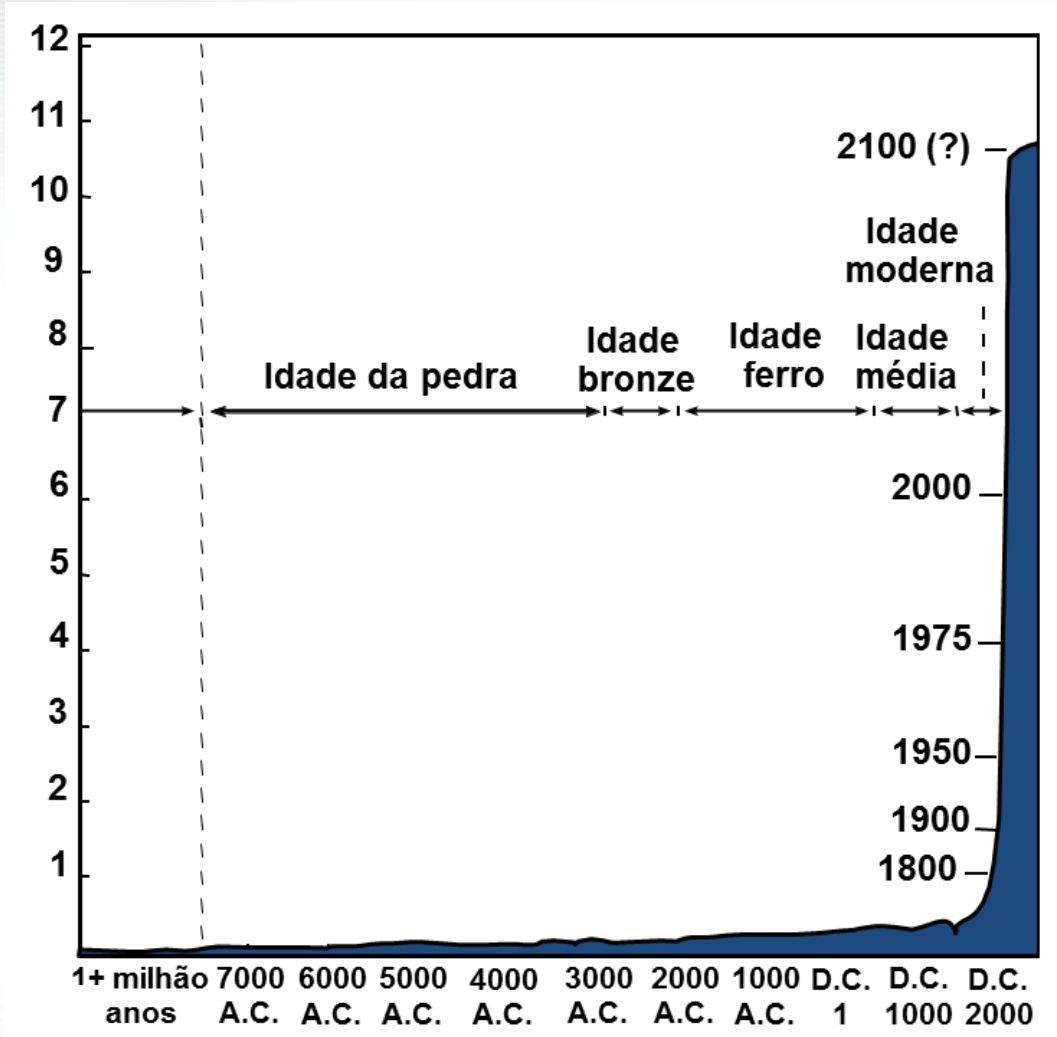


PARTE 1: Por quê?

- Crescente preocupação com o impacto ambiental das atividades industriais
 - Aumento populacional e dos níveis de consumo
 - **Aquecimento global**
- Aumento expressivo do uso de cimento
- Impacto ambiental devido à fabricação de cimento Portland
 - Consumo de energia
 - **Emissões de CO₂**



Crescimento populacional



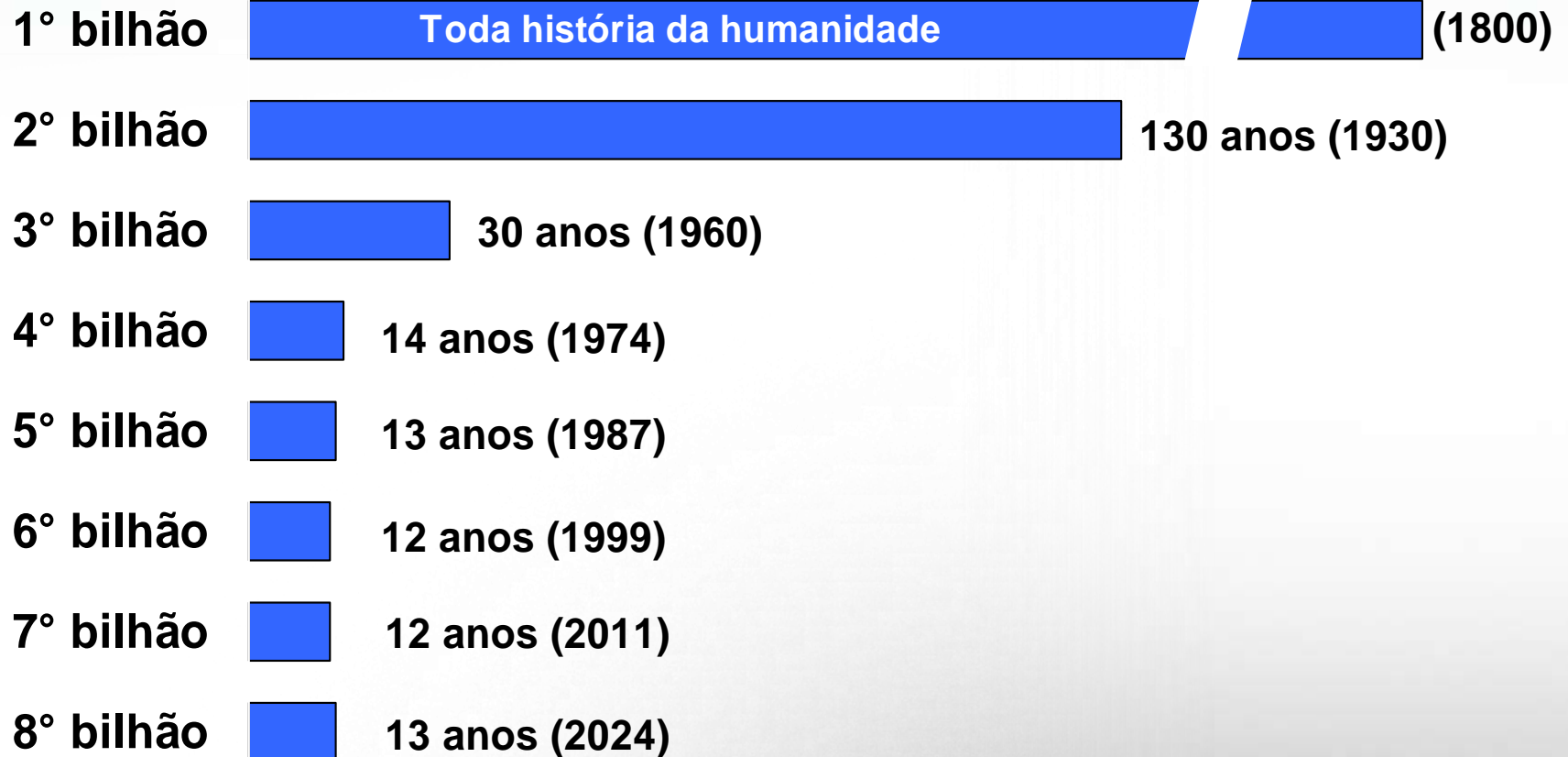
População
em 2011:
7 bilhões

Projeção
para 2045:
9 bilhões



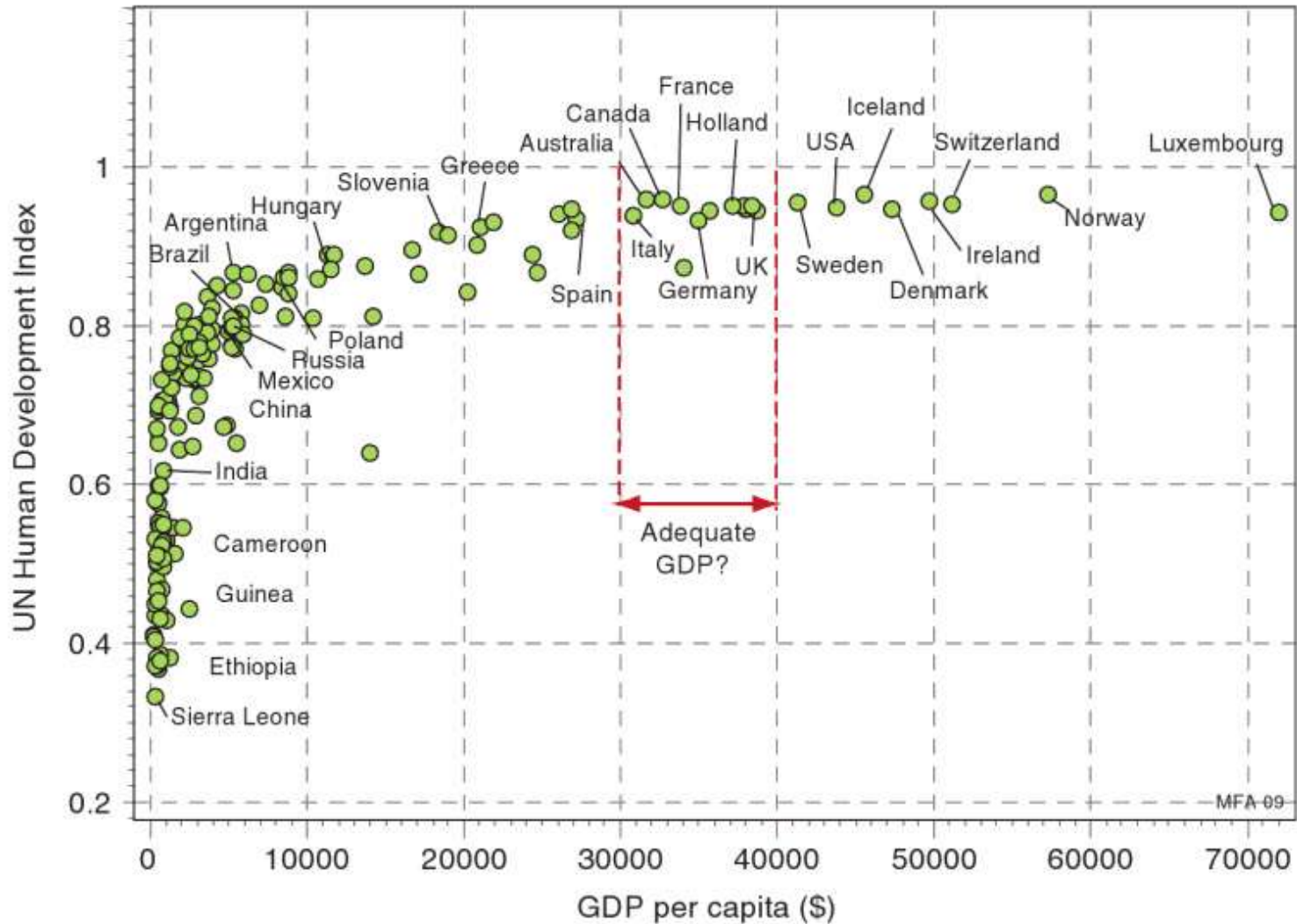
Crescimento populacional

- Tempo necessário para atingir cada bilhão





Aumento do consumo



MFA-09



Aumento do consumo



Pirâmide de Necessidades de Maslow

Países com:

Alta renda
per capita

Média renda
per capita

Baixa renda
per capita

IDH:

Alto

Alto/
Médio

Baixo

Pegada
Ecológica:

Alta

Média

Baixa



E.U.A. – Pop. 307 milhões; IDH 0,902; PIB/pc \$47.200; **Pegada Ecológica 9,4 ha/hab.**

Brasil – Pop. 200 milhões; IDH 0,807; PIB/pc \$10.326; Pegada Ecológica 2,4 ha/hab.

China – Pop. 1,3 bilhões; IDH 0,762; PIB/pc \$5.963; Pegada Ecológica 2,1 ha/hab.

Índia – Pop. 1,2 bilhões; IDH 0,609; PIB/pc \$2.762; Pegada Ecológica **0,9 ha/hab.**



Impacto Ambiental



POPULAÇÃO



CONSUMO



ATIVIDADES INDUSTRIAIS



CONSUMO ENERGÉTICO



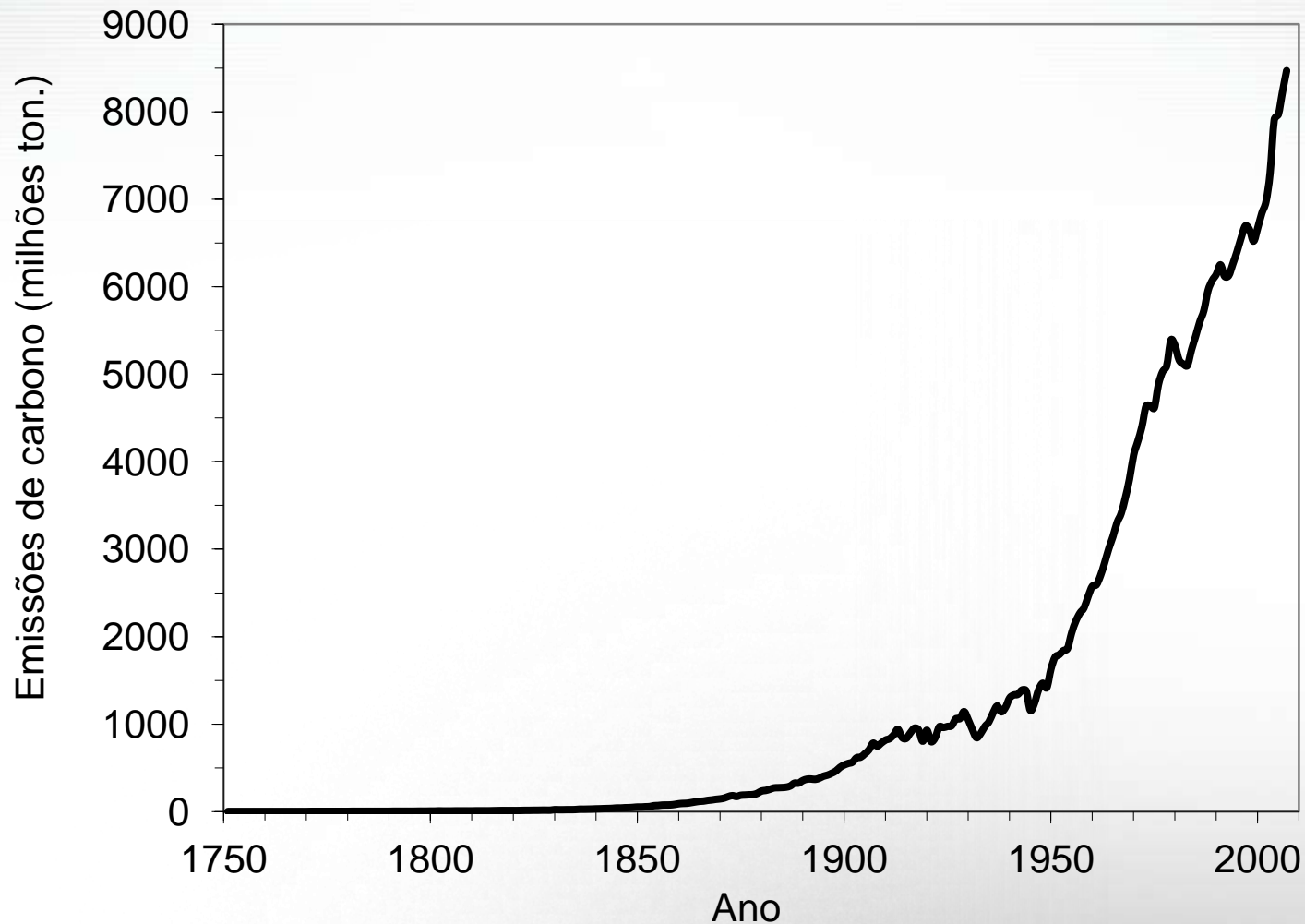
NÍVEIS DE POLUIÇÃO



USO DE RECURSOS NATURAIS



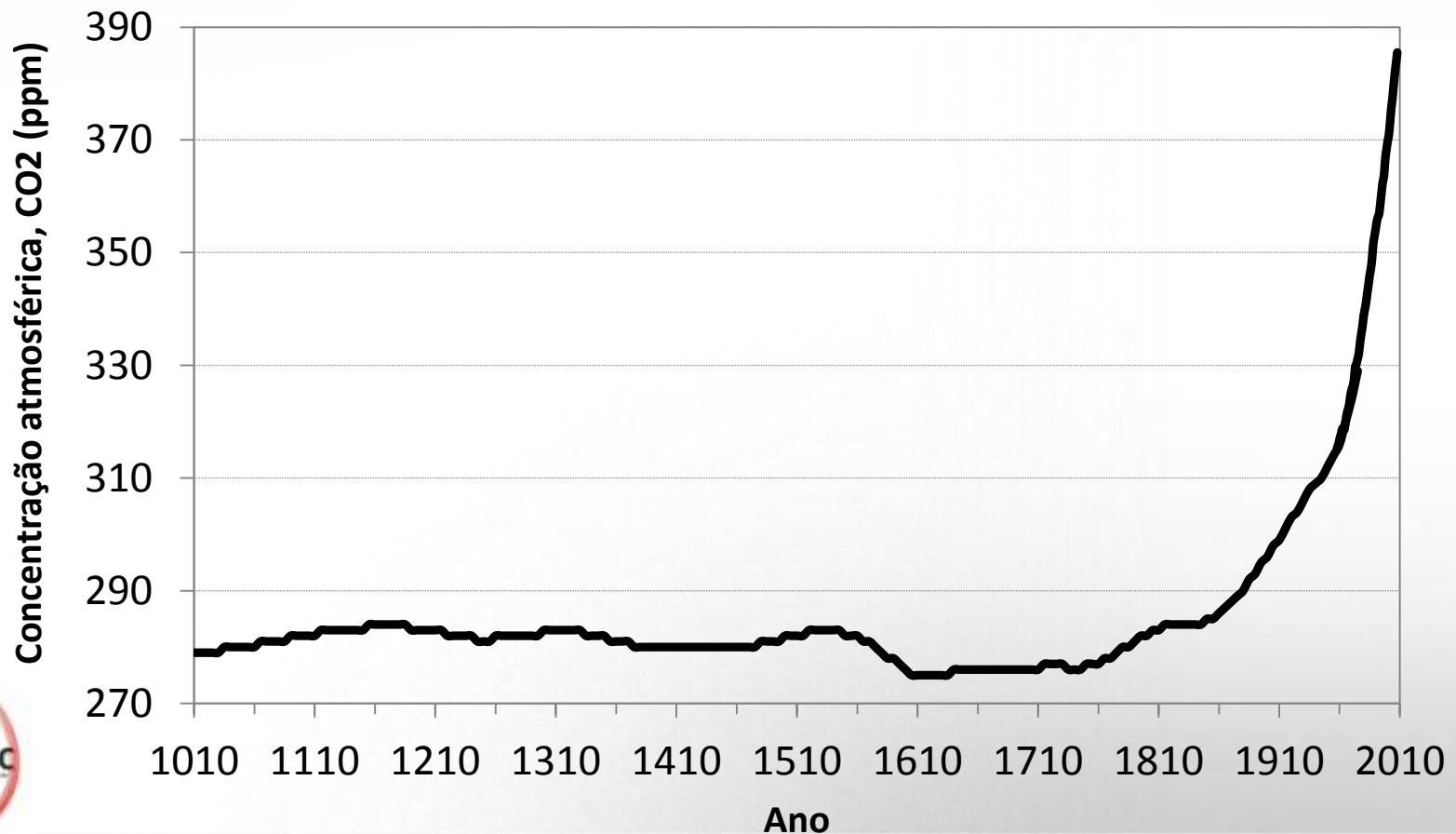
Emissões de CO₂





Concentração de CO₂

- **Medida ao longo dos últimos 1000 anos**
 - 1010-1958: gelo antártico, 1958-2008: análises ar

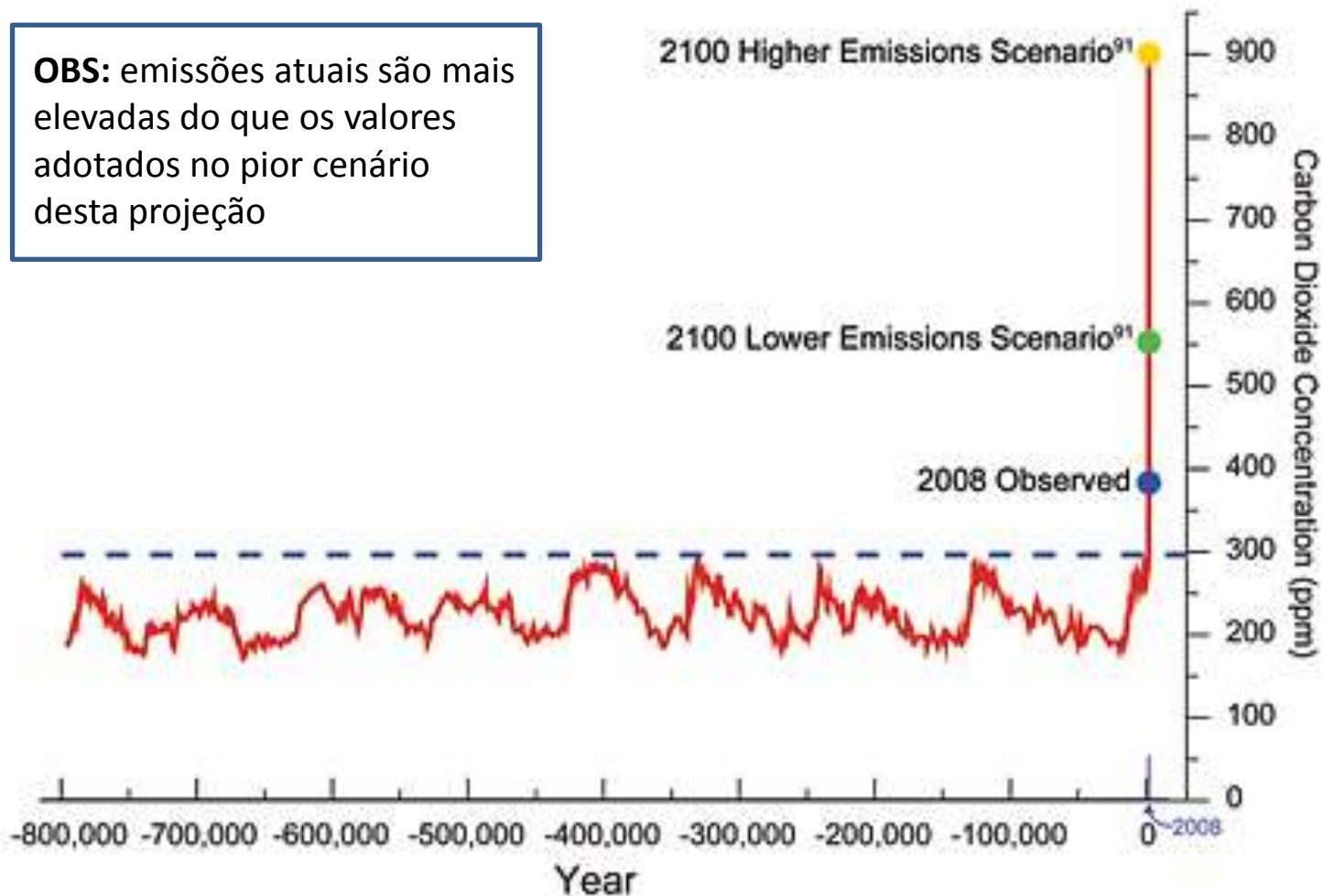




Concentração de CO₂

- Medida ao longo dos últimos **800,000** anos

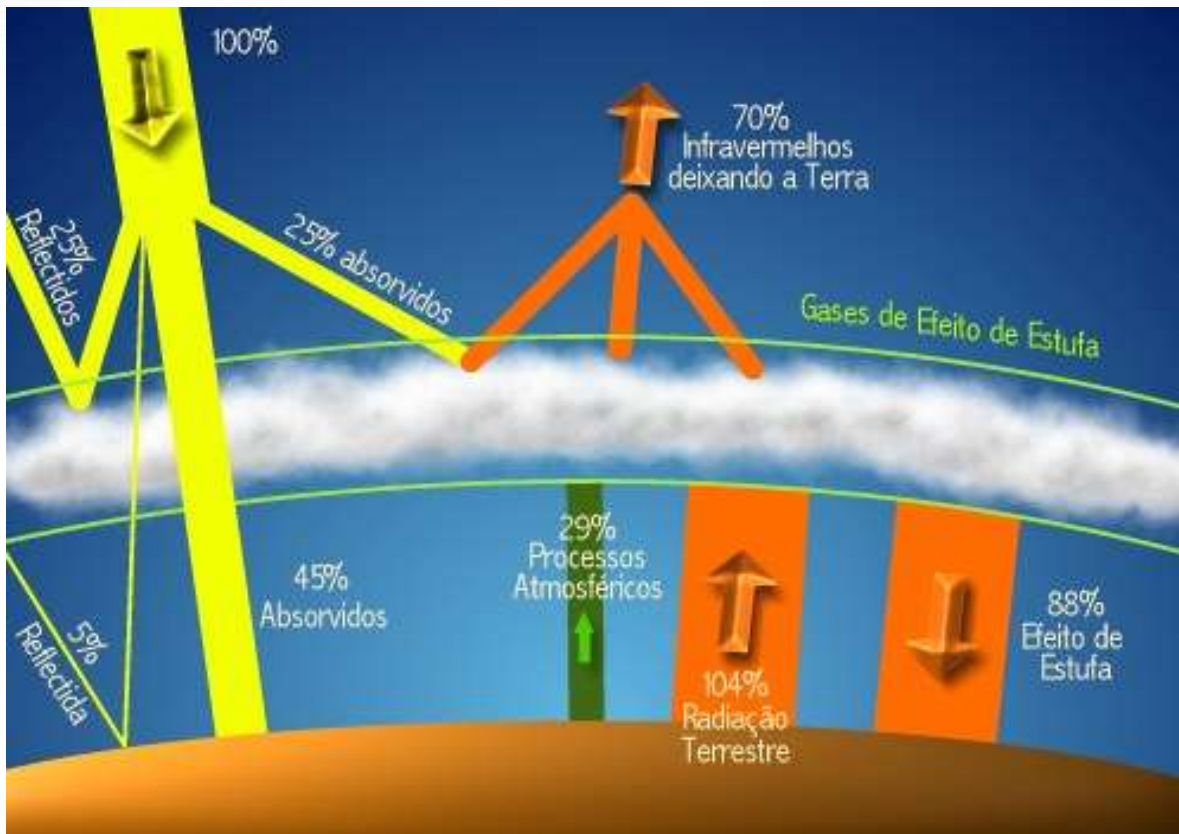
OBS: emissões atuais são mais elevadas do que os valores adotados no pior cenário desta projeção





Aquecimento Global

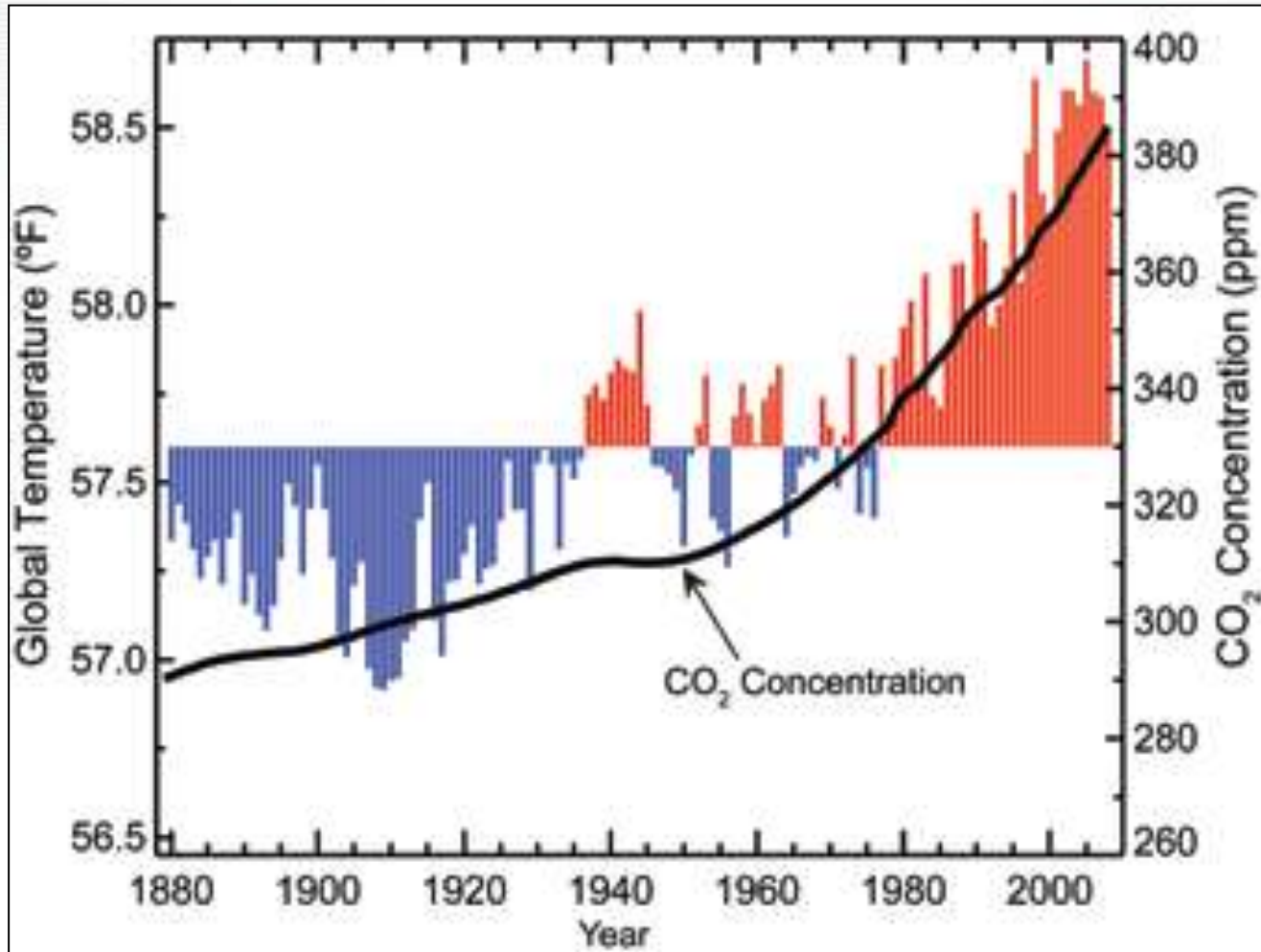
- Consequência do **Efeito Estufa**



CO₂
CH₄
N₂O
CFCs



Aquecimento Global





Aquecimento Global

Prova irrefutável do aquecimento global



1800 → 1950 → 2010



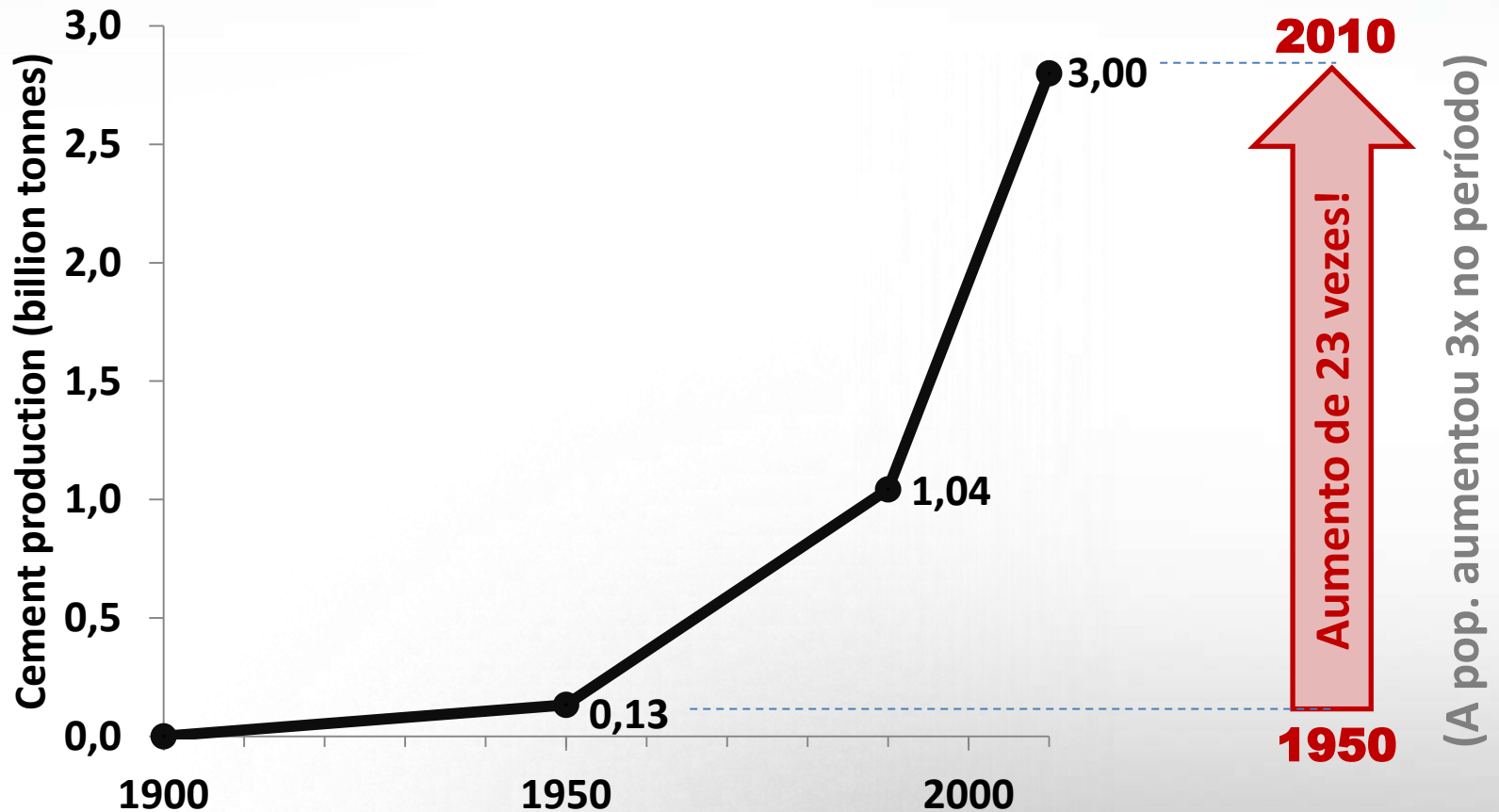
Cimento: Impacto Ambiental

- O consumo mundial atual de concreto é de aproximadamente **23 bilhões ton/ano**
 - 3,3 ton/pessoa/ano (9 kg/dia!)
- Este nível de produção demanda:
 - **3 bilhões ton. cimento**
 - 18 bilhões ton. agregados
 - 2 bilhões ton. água
- **A fabricação de cimento é responsável por ~7% das emissões globais de CO₂**



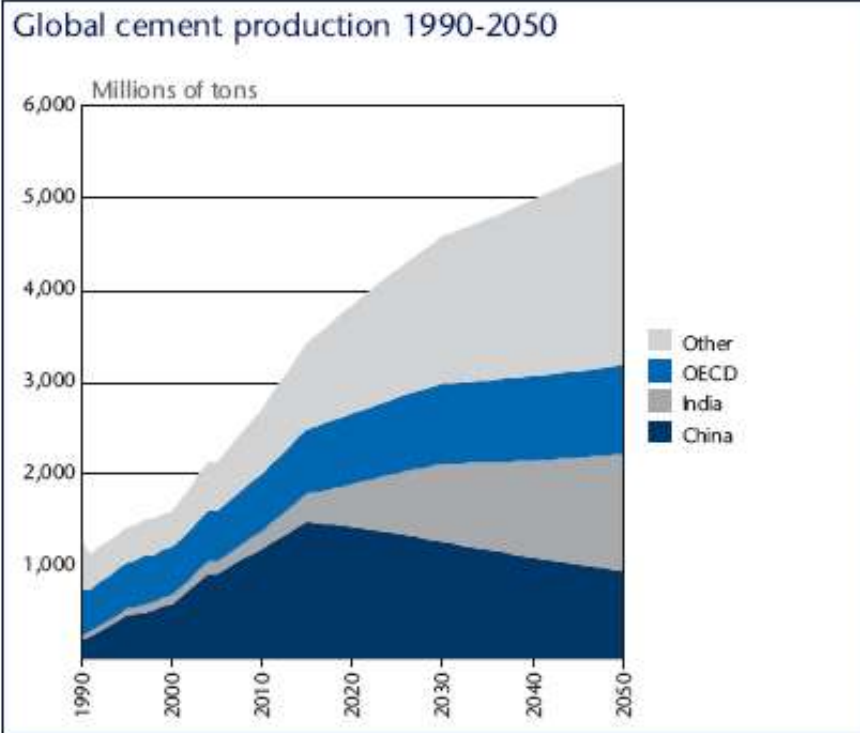
Cimento: Impacto Ambiental

- Produção de cimento Portland, de 1900 a 2010





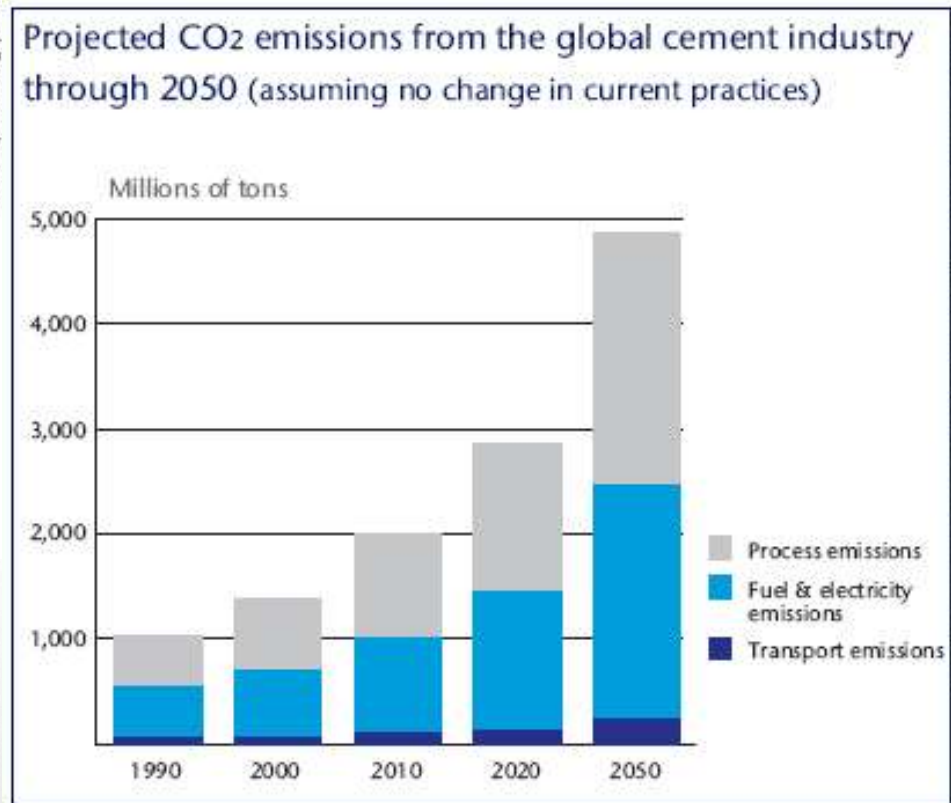
Cimento: Impacto Ambiental



Source: International Energy Agency

Produção de cimento

Emissões de CO₂



Source: Battelle Memorial Institute (in Agenda for Action, p. 21)





Cimento: Emissões de CO₂

- Processo de **calcinação**



$$1\text{kg} \rightarrow 0,56\text{kg} + 0,44\text{kg}$$

- Considerando o consumo energético
 - A cada **1000kg** de clínquer, gera-se aproximadamente **900kg** de CO₂
 - Calcinação → ~52%
 - Energia → ~48%



Cimento: Emissões de CO₂

- No Brasil, gera-se **~879 kg CO₂/ton de cimento**, segundo estimativa do MME
- Considerando a produção nacional de cimento, chega-se uma geração de CO₂ igual a 37 Mt/ano, o que equivale a **~11% das emissões brasileiras**
 - Aproximadamente 55% do total das emissões causadas pelo consumo de gasolina e etanol no País



E Agora?

- *O que fazer para atender às demandas e melhorar as condições de vida da população, que cresce rapidamente, sem agravar o problema do aquecimento global?*
- **Solução: desenvolver e utilizar materiais cimentantes alternativos com reduzido impacto ambiental, que não emitam CO₂ ou ao menos reduzam consideravelmente as emissões na sua produção.**



PARTE 2: O quê?

- O que são eco-cimentos?
 - Definições, surgimento
- Potencial de uso
- Tipos de eco-cimento
 - Cimentos geopolímeros ou álcali-ativados
 - À base de cinza volante, metacaolim, EAF
 - Cimentos à base de fostatos
 - Cimento à base de carbonatos amorfos
- Desafios e oportunidades



Eco-cimentos

- Eco-cimentos são comumente entendidos como materiais cimentantes alternativos com reduzido impacto ambiental, que **não emitam CO₂** ou ao menos reduzam consideravelmente as emissões na sua produção
- Termos mais usados na literatura:
 - “Green cements”
 - “Eco-cements”
 - “Environmentally friendly cements”



Eco-cimentos

- Surgimento
 - Primeiras aplicações, possivelmente, na construção de partes das pirâmides do Egito
 - Há 5000 anos... se confirmado, será a primeira utilização de concreto na história.
 - Cimentos “geopolímeros” à base de silico-aluminatos
 - Teoria originalmente levantada por Davidovits em 1986. Estudo mais completo apresentado por Barsoum et al., J. Am. Ceram. Soc., 89 (12), 2006.
 - Primeiras aplicações modernas feitas na ex-URSS após a 2ª Guerra Mundial, por Glukhovsky et al.

CLIMATE CHANGE: Annual Avoided CO₂e Emissions from Clean Energy Technologies

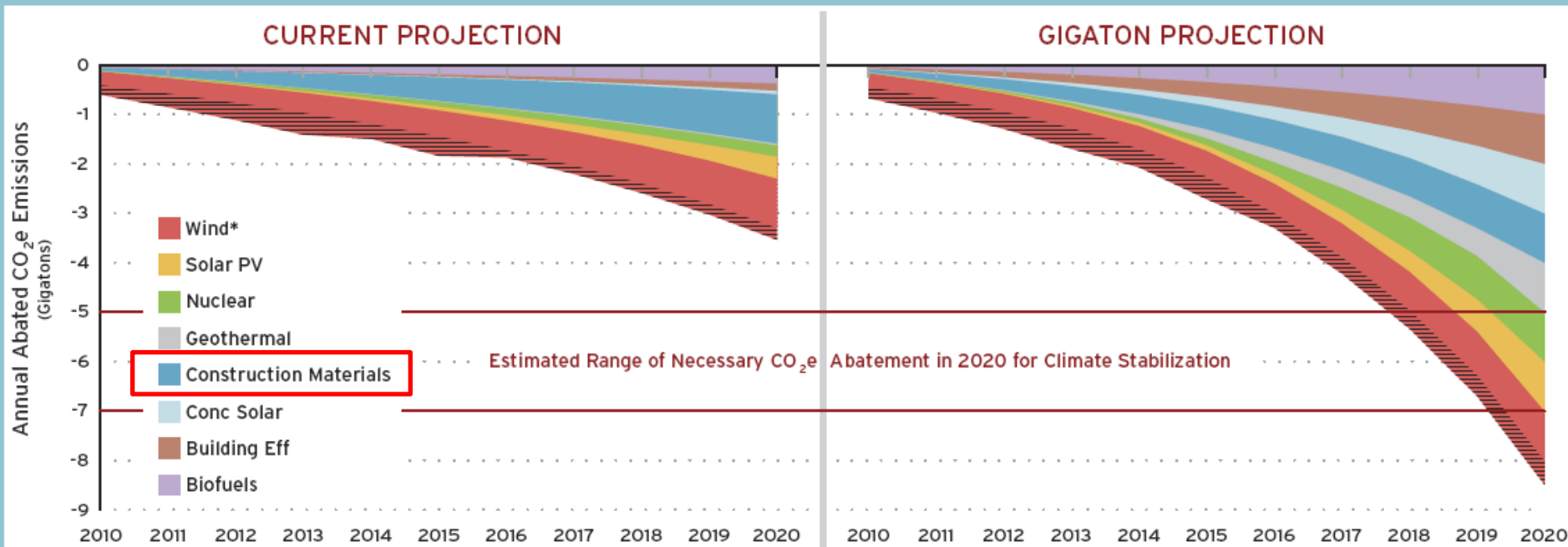


FIGURE 2. At gigaton scale, these 8 technologies could provide CO₂e reductions in excess of the 5 to 7 gigatons needed to hit 2020 climate stabilization targets, compared to the current projections that show these technologies falling short.⁵ Under current projections, these 8 technologies abate close to 3.5 gigatons of CO₂e, with the bulk of the contribution from one technology, wind. (See report chapters for details on the current projections for each technology.)

* Wind is currently projected to exceed gigaton scale and abate 1.5 gigatons of CO₂e.

Conforme o IPCC, estima-se que cortes **anuais de 5 a 7 bilhões** de ton. CO₂ são necessários para estabilização climática (CO₂ < 450 ppm).

Aproximadamente **1 bilhão ton. CO₂/ano** podem ser reduzidas através da substituição de **50% do cimento Portland** por alternativas de baixo-carbono.



Como atingir este objetivo?

- Infelizmente, não há uma “bala de prata”
- Soma de esforços:
 - Substituição de calcário na fabricação de clínquer
 - Concretos de alto desempenho com elevados teores de substituição (misturas ternárias, HVFA, etc.)
 - Dificuldade: disponibilidade de matérias-primas em escala suficiente (Consumo de cimento: 3000 Mt)
 - Cinza volante \approx 550-610 Mt, EAF \approx 200 Mt
 - Nova geração de eco-cimentos
 - Novas fontes de matérias-primas

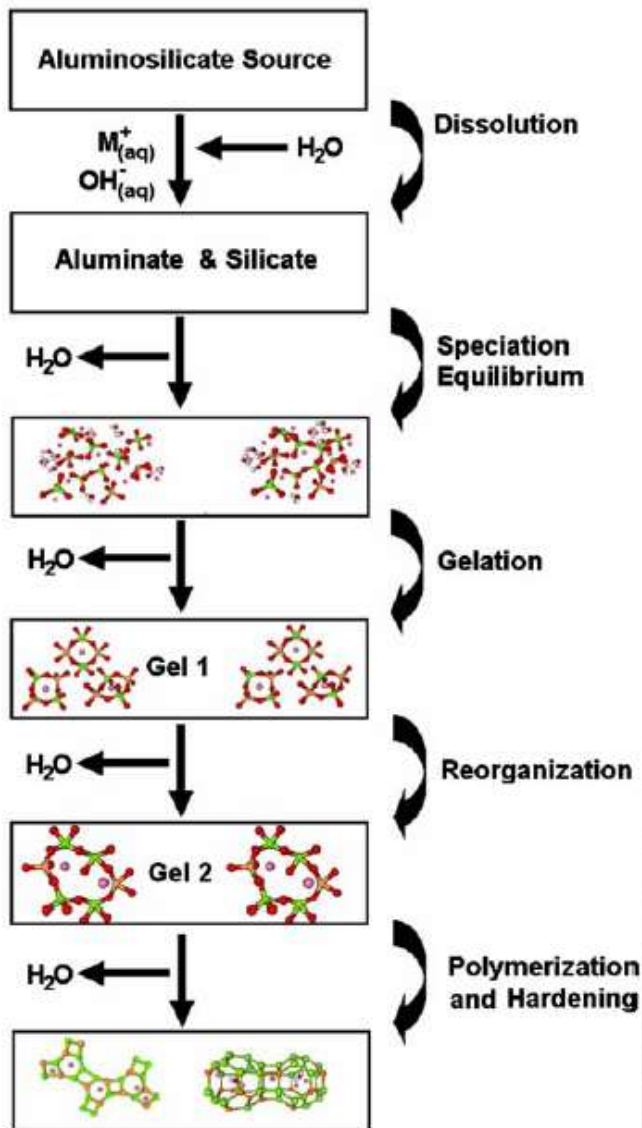


Geopolímeros

- Princípios básicos:
 - Têm como matérias-primas básicas fontes de **alumino-silicatos**, tais como cinza volante, metacaulim, escória de alto-forno e pozolanas naturais;
 - Estes alumino-silicatos são dissolvidos (liberando Al^{3+} e Si^{4+}) por solução aquosa altamente concentrada de hidróxidos e silicatos alcalinos (tipicamente NaOH e $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$)
 - Desenvolvem propriedades mecânicas semelhantes (ou até superiores) ao cimento Portland, mas **com considerável redução nas emissões de CO_2** .



Geopolímeros



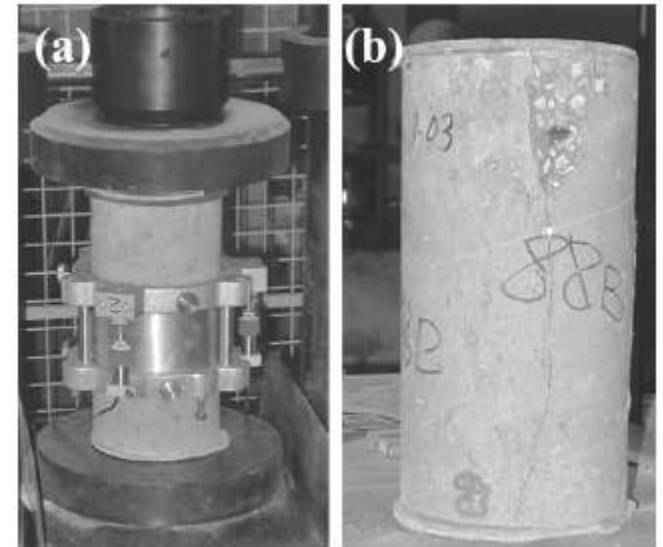
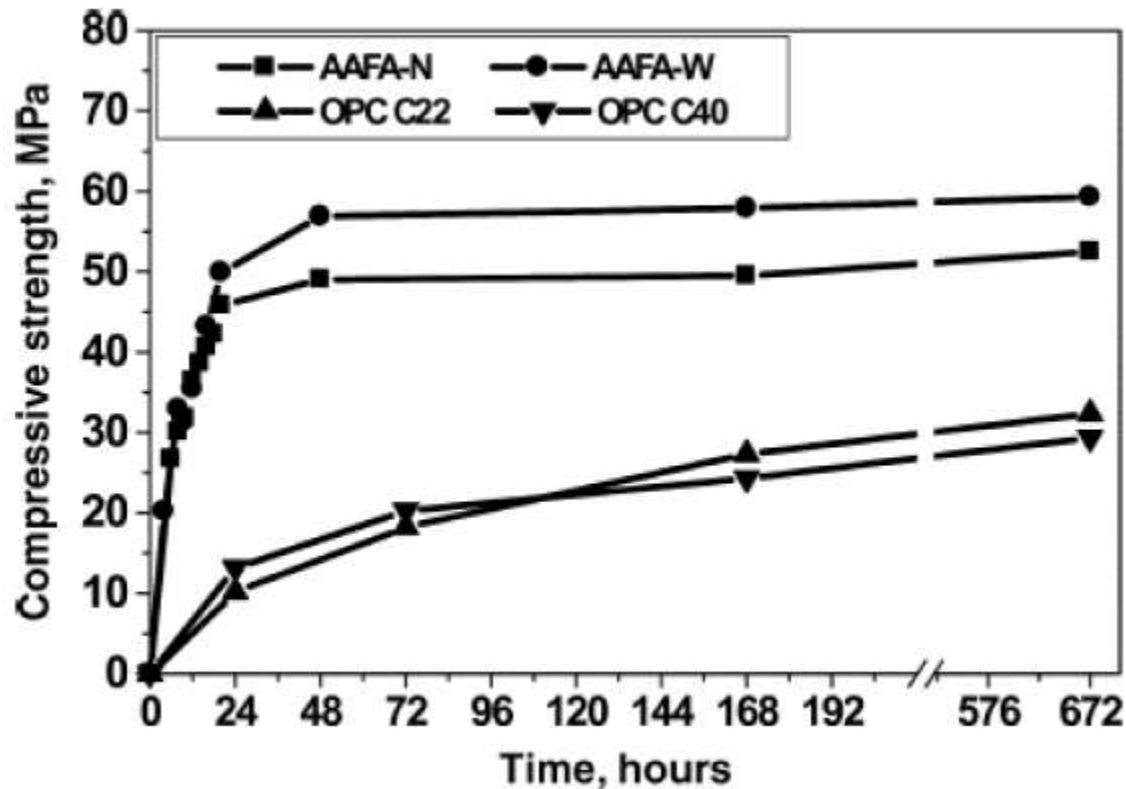
Modelo conceitual das reações de geopolimerização

- Série complexa de reações de dissolução e precipitação;
- Dissolução dos alumino-silicatos devido ao alto pH da solução ativadora
- Formação de uma solução aquosa supersaturada de aluminatos e silicatos
- Formação do gel, reorganização e polimerização dos compostos



Geopolímeros

- Exemplo
 - Cimento à base de cinza volante
 - Traço 1:4, CV = 465 kg/m³, Cura: 20h a 85°C, s/b=0,4 a 0,55



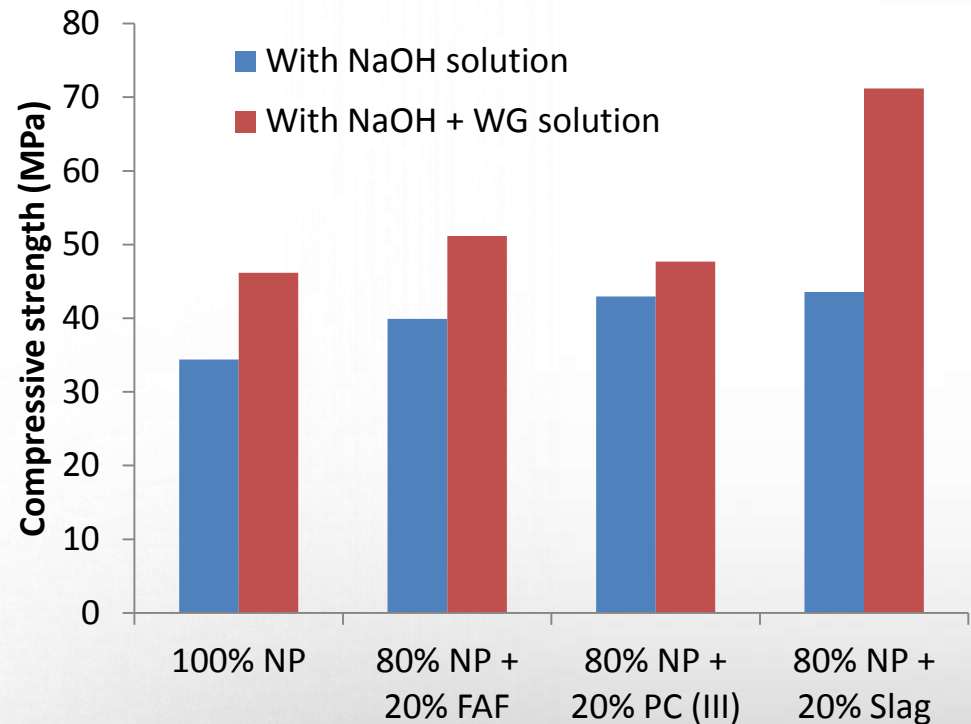


Geopolímeros

- Exemplo
 - Cimento à base de pozolana natural

Resistência à compressão (MPa), 28 dias

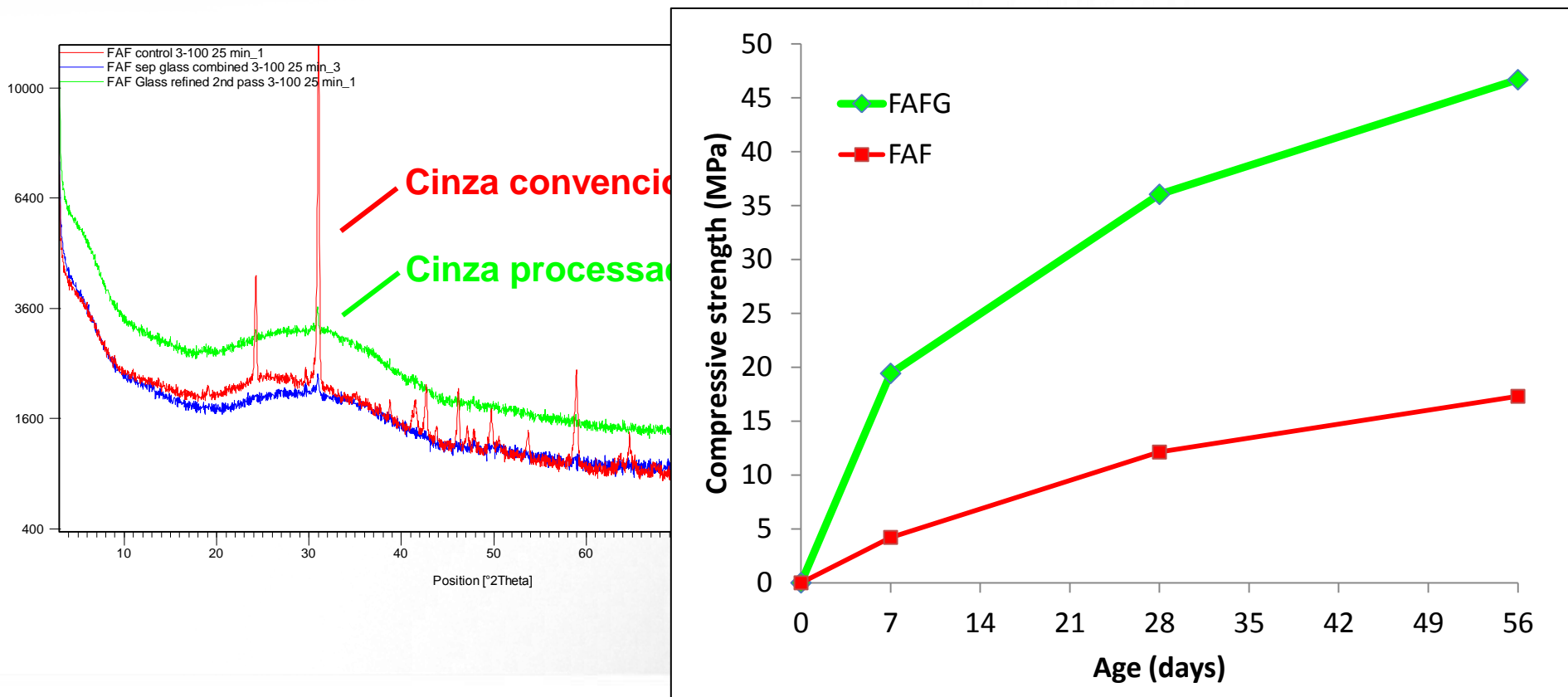
	Type of solution	
	NaOH ^a	NaOH + WG ^b
100% NP	34.4	46.2
80% NP + 20% FAF	39.9	51.2
80% NP + 20% PC	43.0	47.7
80% NP + 20% Slag	43.5	71.2





Geopolímeros

- **Desenvolvimento de geopolímeros avançados**
 - **Cura à temperatura ambiente** para possibilitar a aplicação prática em larga escala





Cimento à base de fosfatos

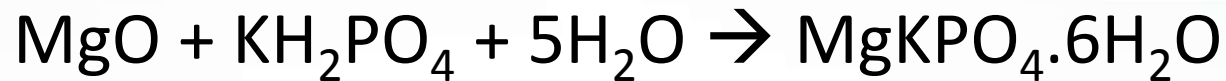
- Princípios básicos

- Também conhecidos como “**ceramicrete**” ou **CBPC** (“chemically-bound phosphate ceramics”)
- São formados a partir da mistura de óxidos e aditivos (retardadores e fillers) numa solução aquosa com fosfatos
 - No caso do fosfato de potássio, o cimento é composto por uma mistura em pó de KH_2PO_4 , MgO e Cinza Volante (tipicamente 60%). **O aglomerante formado é misturado com água e curado à temperatura ambiente**

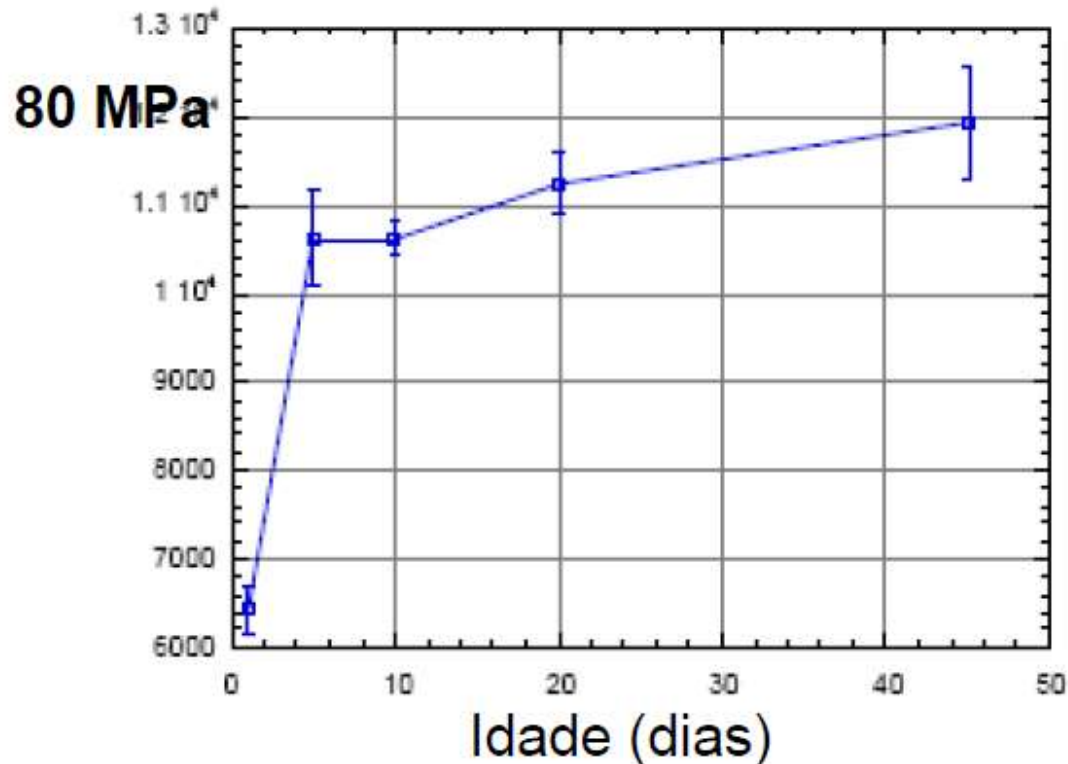


Cimento à base de fosfatos

- Reação química



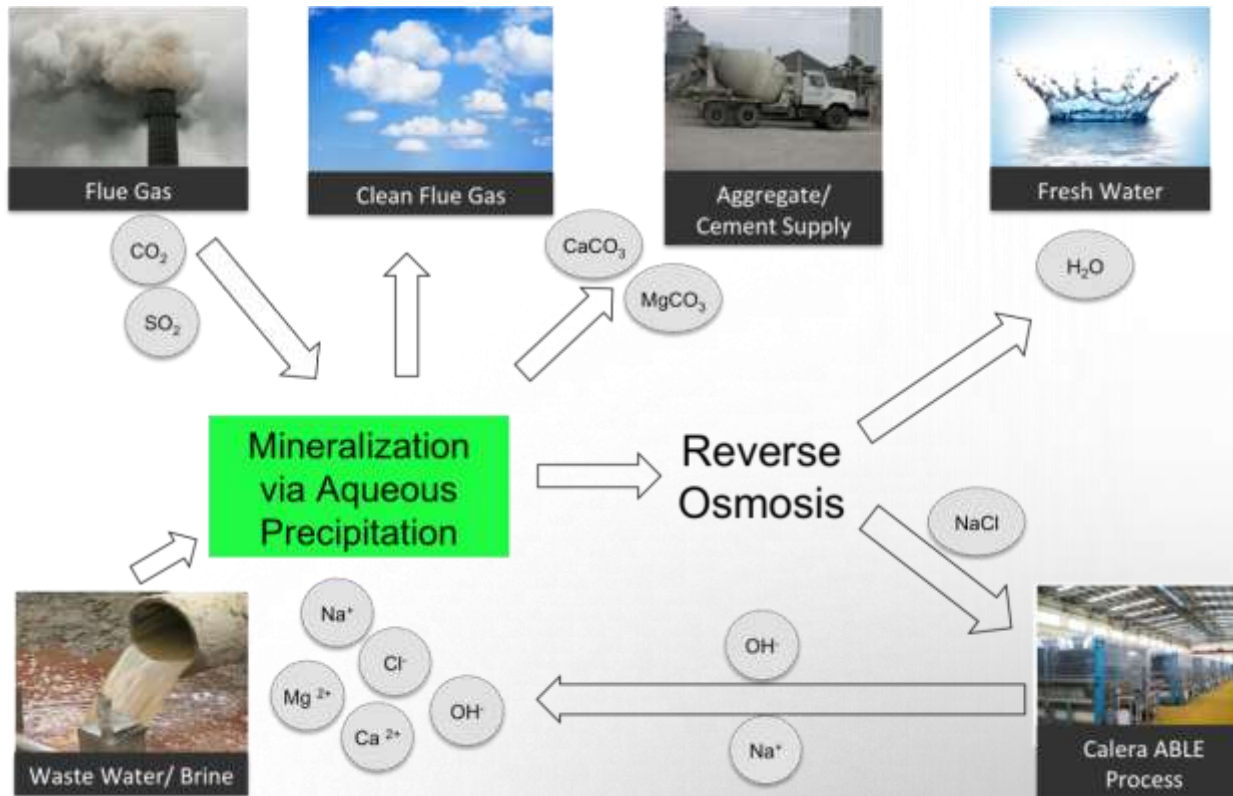
- Desenvolvimento da resistência à compressão





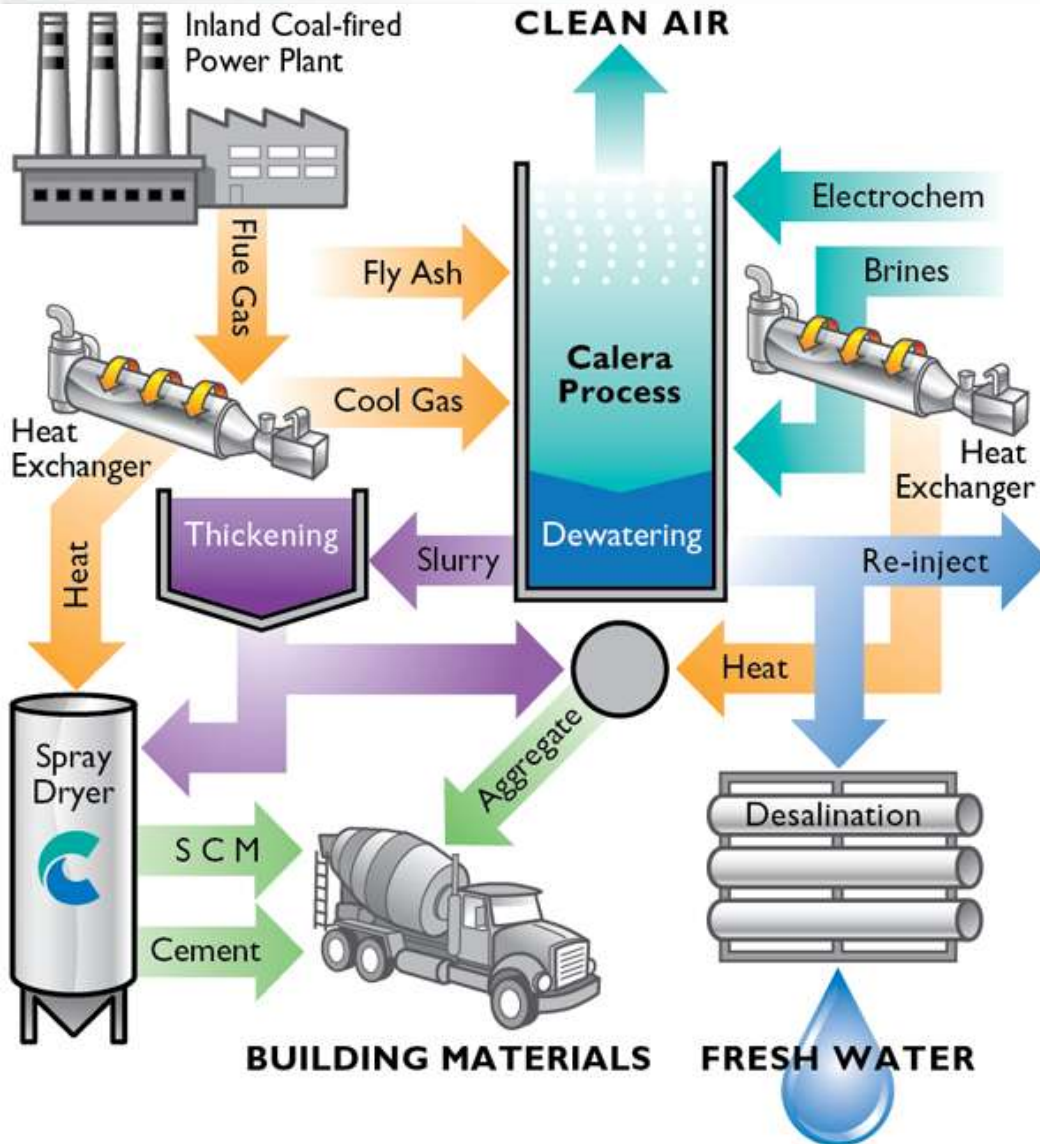
Cimento à base de carbonatos

- Materiais com pegada negativa de CO_2 , isto é, que **consomem CO_2** durante a fabricação
 - Sequestro e armazenamento de carbono





Cimento à base de carbonatos



Planta piloto na CA

Principais produtos:
Carbonatos de cálcio amorfos
Vaterita
Aragonita
Calcita



PARTE 3: Como?

- **Estudos de caso**

- (1) Zeobond (Melbourne, Austrália)**

- Cimento álcali-ativado, cura à temperatura ambiente
 - Slogan: *“concrete, no cement”*

- (2) CalStar (Vale do Silício, EUA)**

- Cimentos à base de fosfatos e CV
 - Estudo da durabilidade frente à corrosão

- **Comentários finais**



Zeobond & E-Crete

- Empresa Australiana que **produz e comercializa** cimento geopolímero para **concretos curados à T ambiente**
- E-Crete (*Environmental Concrete*)
- Estudos desenvolvidos na Univ. Melbourne
- **0% de cimento Portland**
- Cimento composto por cinza volante e escória granulada de alto forno



Zeobond & E-Crete

Zeobond E-Crete

E-Crete

- ▶ E-CRETE
- ▶ COMPANY
- ▶ FAQ
- ▶ ENVIRONMENT
- ▶ PRODUCTS
- ▶ RESEARCH
- ▶ OPPORTUNITIES
- ▶ CONTACT US

 **Zeobond**

> concrete, no cement





Zeobond & E-Crete

- Mesmo considerando o impacto ambiental associado ao uso dos ativadores alcalinos, a **redução das emissões de CO₂ chega a 90%** quando comparada ao cimento Portland
- A empresa opera atualmente em uma planta de demonstração, com capacidade para até 200m³ de concreto/dia
 - Diversos projetos já executados



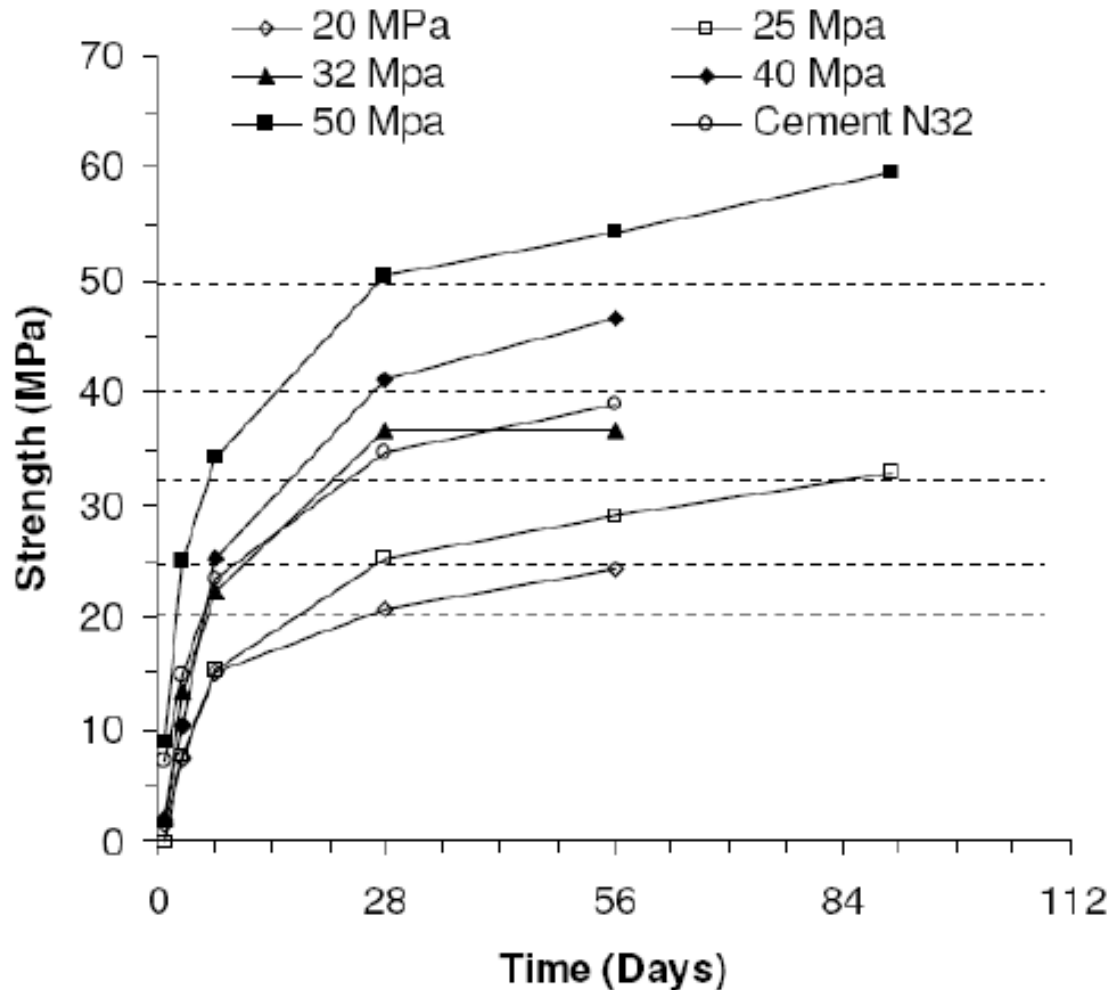
Zeobond & E-Crete





Zeobond & E-Crete

- Desenvolvimento da resistência à compressão





CalStar

- Empresa localizada no Vale do Silício (CA)
 - Missão: *“Reinventar o cimento, mantendo suas melhores propriedades e reduzindo drasticamente as emissões de CO2 e o consumo energético”*
- Foco inicial: pesquisa e desenvolvimento de cimento à base de fosfatos
 - Matérias-primas: KH_2PO_4 , MgO e C.V.
- Recentemente tem focado também no estudo de cimentos álcali-ativados à base de cinza volante



CalStar

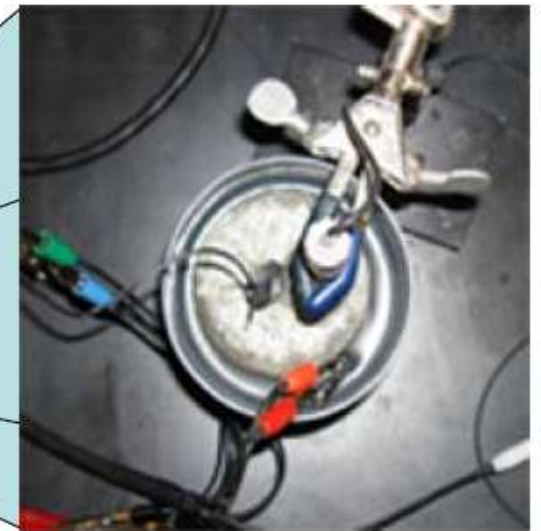
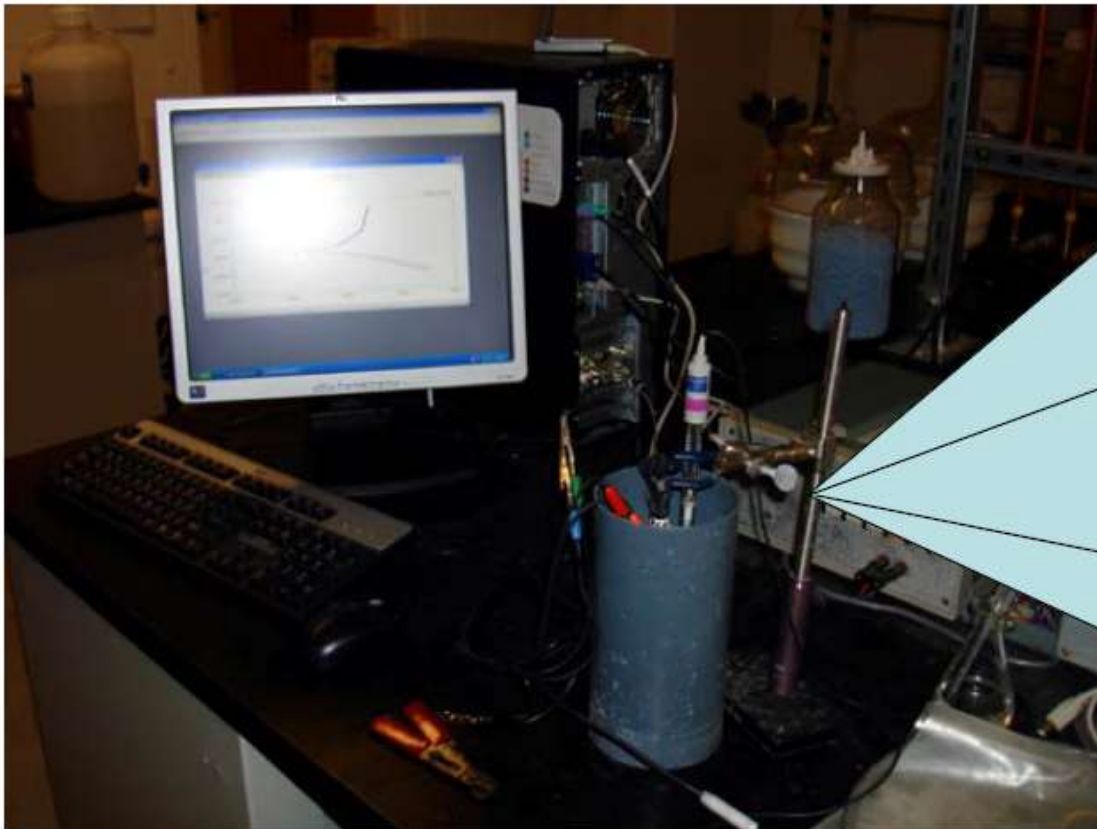
- Resistência mecânica satisfatória, comparável ao cimento Portland
- Avaliação da **durabilidade** frente à **corrosão de armaduras**





CalStar

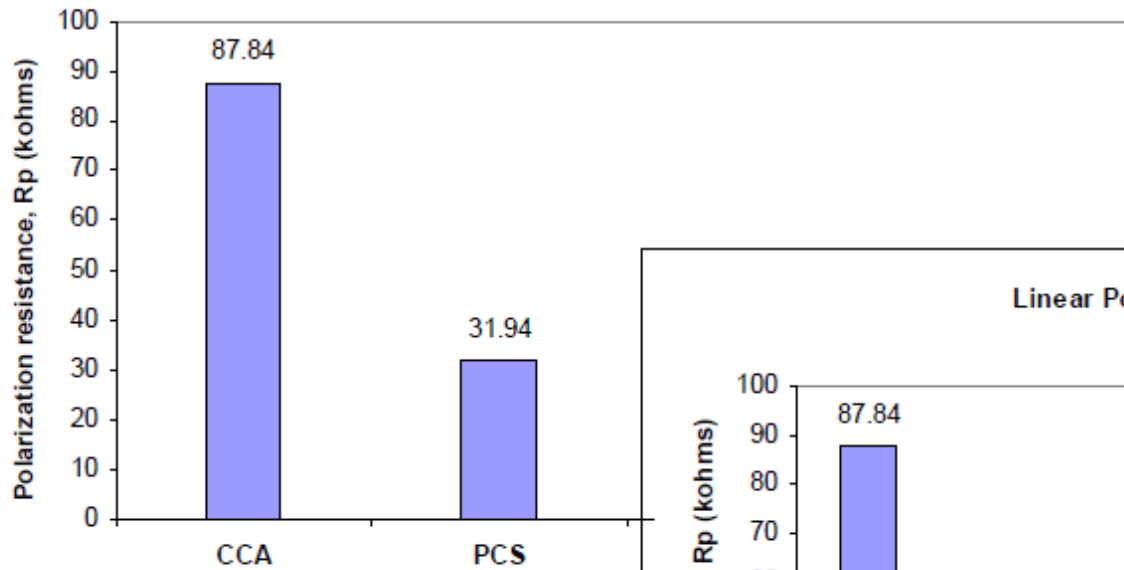
- Ensaio de corrosão
 - Resistência de polarização (R_p)





CalStar

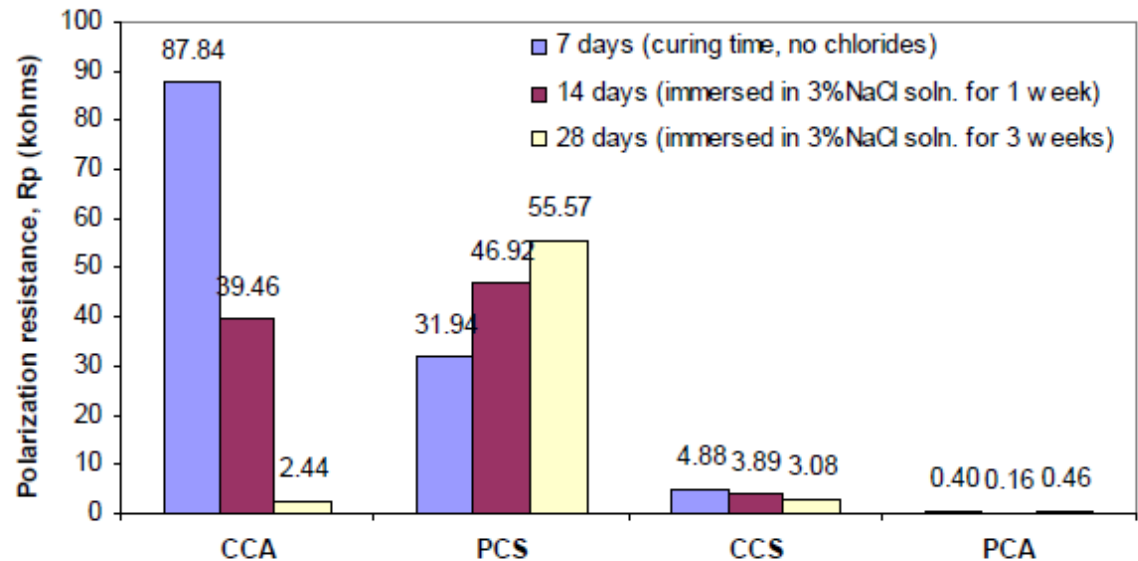
Linear Polarization Resistance (LPR), 7days



**Cimento de fosfatos:
Testes aos 7 dias
pH = 7 (neutro)
Alumínio passivado!**

**Cimento de fosfatos:
Testes aos 28 dias
pH = 10-11
Muito baixo p/ aço
Muito alto p/ Al**

Linear Polarization Resistance (LPR)





Comentários Finais

- Área de pesquisa extremamente fértil, relevante e atual
 - **Vantagem: assuntos novos, ainda inexplorados**
 - Desvantagem: relativamente menos literatura e conhecimento acumulado
- Grande possibilidade para o desenvolvimento de novos materiais, produtos e aplicações
- Mercado em expansão e receptível a soluções ambientalmente corretas

Impacto Ambiental da Indústria Cimenteira e o Desenvolvimento de Novos Eco-Cimentos

Mauricio Mancio

mancio@ufrgs.br

