

	<p>Concreto de Alta Resistência – 2012 Prof. Pierre-Claude Aïtcin Prof. Sydney Mindess Prof. Arezki Tagnit-Hamou</p>	<p>Notas de aula</p>	<p>Prof. Eduardo C. S. Thomaz</p>	<p>1 / 10</p>
---	--	----------------------	-----------------------------------	---------------



<http://www.fibstockholm2012.se/> (free download)

Building Highly Sustainable Concrete (HSC) Structures

<p>Professor, Dr. Pierre-Claude Aïtcin Professor, Dr. Arezki Tagnit-Hamou Université de Sherbrooke (Québec) Canada J1K 2R1 E-mail: pcaïtcin@yahoo.ca</p>	<p>Professor, Dr. Sydney Mindess University of British Columbia Canada V6T 1Z4</p>
--	--

Manteremos a nomenclatura usada no artigo :

HPC = Concreto de alto desempenho = CAD no Brasil

NSC = Concreto de Resistência Normal

w/c = relação água / cimento

Obs: Na falta de uma melhor expressão, usaremos:

sustainability = qualidade (no sentido de preservação ambiental)

more sustainable = melhor (no sentido de preservação ambiental)

RESUMO

Hoje é possível produzir concreto pronto (*ready mixed*) com resistências de 75 MPa a 150 MPa com abatimentos de 100mm a 180mm, como também concretos fluidos de 200MPa para pré-moldados.

Enquanto em alguns lugares é difícil encontrar uma combinação compatível “*cimento / superplastificante*”, que seja resistente o suficiente para produzir um concreto HPC de 75 MPa, em outros lugares é relativamente fácil alcançar 150 MPa.

Isto se deve a que os fabricantes de cimento otimizam a **resistência**, e não o **comportamento reológico**, dos seus cimentos, quando da combinação com o superplastificante.

Entretanto, se especificarmos um **clinker** Tipo I/II da ASTM (clinker + gesso), tendo um teor máximo de C3A de 6% e um teor de cerca de 0,6% de álcalis solúveis, o HPC resultante não terá problemas reológicos.

	<p>Concreto de Alta Resistência – 2012 Prof. Pierre-Claude Aitcin Prof. Sydney Mindess Prof. Arezki Tagnit-Hamou</p>	<p>Notas de aula</p>	<p>Prof. Eduardo C. S. Thomaz</p>	<p>2 / 10</p>
---	--	---------------------------	--	---------------

1. INTRODUÇÃO

Existem diversos modos de aumentar a *qualidade* de estruturas de concreto.

A resposta do fabricante de cimentos é o uso de cimento composto (misturado), no qual uma parte do clínquer do Cimento Portland Puro tenha sido substituído por um *filler* ou por um material cimentício suplementar.

Mas os projetistas podem fazer muito mais do que o fabricante de cimento para obter estruturas com mais *qualidade*, eles podem projetá-las com um concreto de alto desempenho HPC .

2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (HPC) *é melhor* QUE CONCRETO DE RESISTÊNCIA NORMAL (NSC)

O concreto HPC *é melhor* que o NSC . Basta comparar as quantidades necessárias de cimento Portland e de agregados em colunas que devam resistir a uma mesma carga normal N, quando essas colunas forem projetadas sem armadura e com concretos 25MPa ou 75 MPa.

Construindo uma coluna com concreto de 75MPa, usa-se apenas 1/3 do agregado e 1/2 do cimento do que seria usado para uma coluna com concreto de 25 MPa, com a mesma carga normal N.

Mesmo em elementos estruturais com flexão, as economias em cimento e em agregados são significativas.

Além disso, como as estruturas feitas com HPC são construídas com concreto muito denso, elas são mais duráveis e requerem menor manutenção do que as estruturas construídas com concreto NSC muito poroso, que pode ser facilmente atacado por agentes agressivos através de sua grande rede capilar interna.

A pergunta então se coloca: Por que não se constroem um maior número de estruturas com concreto de alta resistência ?

Três razões são dadas:

1. O preço unitário do HPC é muito alto em comparação com o NSC
2. Em minha região, é impossível achar um fabricante de concreto que possa produzir confiavelmente um HPC que não apresente problemas reológicos durante o lançamento
3. Estruturas com concreto HPC são mais susceptíveis à fissuração nas primeiras idades.

	<p>Concreto de Alta Resistência – 2012 Prof. Pierre-Claude Aitcin Prof. Sydney Mindess Prof. Arezki Tagnit-Hamou</p>	<p>Notas de aula</p>	<p>Prof. Eduardo C. S. Thomaz</p>	<p>3 / 10</p>
---	--	----------------------	-----------------------------------	---------------

Analisemos essas três objeções.

2.1 O preço unitário do HPC

Sim, 1 m³ de HPC custa mais que 1 m³ de NSC , mas quando se está projetando uma estrutura com HPC, se produz , se transporta e se lança menos concreto e também se executam menos formas.

O que conta não é o preço unitário do concreto mas sim o seu desempenho (\$ / kN).

2.2 Controle da reologia do HPC

Sim, existem produtores de concreto que são incapazes de controlar a reologia de seus concretos HPC durante os primeiros 90 minutos, mas existem outros que fornecem concreto HPC com uma reologia adequada.

Problemas reológicos são de natureza química, e são a consequência de uma escolha inadequada de uma combinação “*cimento / superplastificante*”. Esse problema será abordado adiante.

2.3 Fissuração nas primeiras idades de estruturas com concreto HPC

Sim , estruturas feitas com concreto HPC podem fissurar muito rapidamente quando elas não forem adequadamente curadas com água. Mas, se os construtores forem pagos especificamente pela cura com água das estruturas feitas com concreto HPC, eles serão mais cuidadosos com a cura, porque eles poderão ganhar dinheiro com isso.

3. Qual a diferença essencial entre HPC e NSC ?

A diferença está nas relações água/cimento (w/c).

Concretos NSC são feitos com alta relação água/cimento, $w/c > 0,42$.

Eles são feitos com mais água do que a água necessária para hidratar as partículas de cimento. Após o endurecimento eles possuem uma grande rede aberta de poros capilares.

Quanto menos resistente o concreto maior a sua porosidade e menor a sua durabilidade e menor a *qualidade* da estrutura de concreto.

Por outro lado, concretos HPC são muito densos, tendo $w/c < 0,42$.

Eles são feitos com menos água do que a água necessária para hidratar totalmente todas as partículas de cimento.

Quando curadas adequadamente com água, as estruturas feitas com concretos HPC são muito menos porosas do que as estruturas feitas com concretos NSC, e são portanto mais duráveis e *melhores*.

	<p>Concreto de Alta Resistência – 2012 Prof. Pierre-Claude Aitcin Prof. Sydney Mindess Prof. Arezki Tagnit-Hamou</p>	<p>Notas de aula</p>	<p>Prof. Eduardo C. S. Thomaz</p>	<p>4 / 10</p>
---	--	----------------------	-----------------------------------	---------------

4. SIGNIFICADO REAL DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO W/C

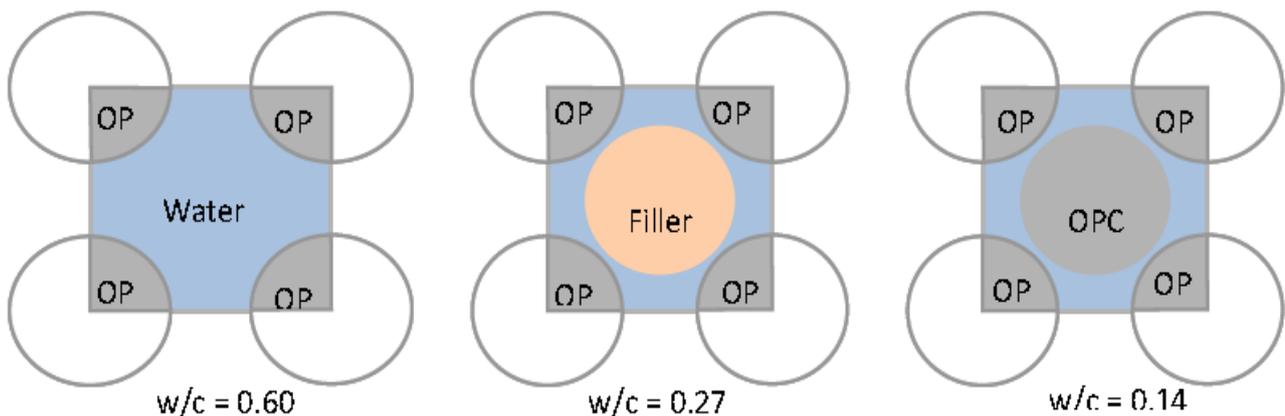
A relação água/cimento (w/c) não é um número abstrato.

É um número diretamente relacionado com a distância entre as partículas de cimento na pasta de cimento.

Quanto menor (w/c) mais próximas estão as partículas de cimento dentro da pasta. Consideremos duas pasta hipotéticas de cimento feitas de esferas de cimento, arranjadas como mostrado na figura abaixo .

A relação w/c do arranjo cúbico é igual a 0.60 , que corresponde ao w/c de um cimento com 20 MPa.

O sistema cúbico de face centrada corresponde a uma relação w/c de 0,14 que é a relação w/c de um Concreto de Ultra Alta Resistência (UHSC) com mais de 200MPa.



5. Por que a resistência do concreto aumenta quando o fator água/cimento diminui ?

A resistência do concreto depende mais da proximidade das partículas de cimento do que do número das partículas hidratadas do cimento. As ligações mecânicas desenvolvidas entre as partículas de cimento que estejam muito próximas umas das outras são mais fortes do que as ligações criadas entre partículas que estejam longe umas das outras.

Quando a hidratação cessa, as partículas de cimento não hidratadas se tornam inclusões muito duras, tendo uma resistência muito alta e um elevado módulo de elasticidade.

6. Como podemos diminuir a relação água /cimento (w/c) de um concreto de alta resistência HPC ?

Basta usar uma dosagem adequada de um superplastificante compatível para obter a resistência desejada e o abatimento adequado.

	<p>Concreto de Alta Resistência – 2012 Prof. Pierre-Claude Aitcin Prof. Sydney Mindess Prof. Arezki Tagnit-Hamou</p>	<p>Notas de aula</p>	<p>Prof. Eduardo C. S. Thomaz</p>	<p>5 / 10</p>
---	--	----------------------	-----------------------------------	---------------

7. Por que algumas combinações “cimento / superplastificante” são compatíveis e resistentes , enquanto outras não o são ?

Se não considerarmos o caso de superplastificantes de baixa qualidade na fabricação, o problema é apenas relacionado com as características do cimento.

Com um cimento que tenha uma finura moderada ($350 \text{ m}^2/\text{kg}$) e contendo cerca de 6% C3A , 60% C3S , e 0.6 % de álcalis solúveis, é possível fazer um concreto com $w/c=0,30$ e que mantenha um abatimento de 180mm a 200mm por pelo **menos 90 minutos** .

C3A é o *veneno* da reologia do concreto e da durabilidade, mas é um *veneno* necessário para baixar o custo de produção do cimento.

No entanto, quando o teor de C3A é baixo, e quando o cimento contém um teor adequado de álcalis solúveis, a reatividade do C3A pode ser controlada facilmente.

8. CURA DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

É verdade que no passado algumas estruturas feitas com HPC apresentaram fissuração inaceitável nas primeiras idades, fissuração essa devida ao desenvolvimento incontrolado da retração autógena.

Mas atualmente, estruturas de HPC, adequadamente curadas, podem ser construídas sem apresentar qualquer fissura nas primeiras idades.

8.1 O que é retração autógena ?

A reação química entre a água e o cimento causa uma contração volumétrica chamada **contração química**.

Quando a pasta já está bastante endurecida, essa contração química gera uma porosidade muito fina que suga a água dos grandes poros capilares, que se comportam então como se o concreto estivesse secando.

Esse fenômeno é chamado **auto-dissecação**. Aparecem então meniscos da água na rede capilar que criam tensões de tração, tensões essas que causam uma contração do volume aparente do concreto, sendo chamada a **retração autógena**.

Em concretos tendo um alto fator água / cimento (w/c) aparecem meniscos de água nos capilares grandes, de forma que esses meniscos geram apenas tensões baixas de tração e conseqüentemente uma retração autógena desprezível, se comparada com a familiar retração por secagem.

	<p>Concreto de Alta Resistência – 2012 Prof. Pierre-Claude Aitcin Prof. Sydney Mindess Prof. Arezki Tagnit-Hamou</p>	<p>Notas de aula</p>	<p>Prof. Eduardo C. S. Thomaz</p>	<p>6 / 10</p>
---	--	----------------------	-----------------------------------	---------------

Em um concreto HPC que tem (w/c) muito baixo , os poros capilares são mais finos, de modo que os meniscos de água que aparecem nesses capilares muito finos geram altas tensões de tração e uma retração autógena muito grande, assim que a hidratação começa.

Quanto menor o (w/c), mais rapidamente a retração autógena se desenvolve e maior será essa retração autógena .

Como essa retração autógena se desenvolve no concreto HPC ainda com baixa resistência, esse concreto HPC pode fissurar rapidamente se essa retração autógena não for adequadamente controlada.

Para mitigar essa retração autógena é necessário recolocar a água nos poros capilares que foram secados pela auto-dissecação. Isso deve ser feito com uma fonte externa de água, de tal modo que não surjam tensões de tração e que a retração autógena não se desenvolva.

Experiências mostraram que com (w/c) de 0.30 a 0.35, a água externa (à estrutura) pode penetrar até os primeiros 50mm de concreto.

Além dessa distância, é difícil a água externa penetrar, porque a pasta de cimento é muito densa.

Mas, esses 50mm são muito importantes porque, usualmente, eles são o concreto de cobertura das barras de aço.

O uso de agregados leves saturados, como substituição parcial dos agregados de pedra, pode constituir uma fonte externa de água (cura interna).

Também tem sido proposto o uso de polímeros super-absorventes para prover água, e assim combater a auto-dissecação.

Outra maneira de combater a retração autógena consiste em introduzir, durante a mistura na betoneira, uma pequena quantidade de um aditivo químico expansivo que gerará uma expansão volumétrica igual à contração autógena.

	<p>Concreto de Alta Resistência – 2012 Prof. Pierre-Claude Aitcin Prof. Sydney Mindess Prof. Arezki Tagnit-Hamou</p>	<p>Notas de aula</p>	<p>Prof. Eduardo C. S. Thomaz</p>	<p>7 / 10</p>
---	--	----------------------	-----------------------------------	---------------

8.2 Cura com água, feita em função do fator (w/c) do concreto

O concreto deve ser curado de acordo com seu (w/c) .

Se o (w/c) é **maior que 0.42** o concreto contém bastante água para hidratar completamente todas as partículas de cimento. A retração autógena é, então, desprezível, se comparada com a retração por secagem.

Nesse caso o uso de um *spray* para formar uma **membrana impermeável** é apropriado para a cura, pois mantém a água dentro do concreto qualquer que seja o ambiente externo.

Se o (w/c) for **menor que 0.42**, a retração autógena ocorrerá, se não for garantida uma fonte externa de água.

Nesse caso é **um grande erro** cobrir o HPC com uma membrana impermeável que irá impedir a penetração de água externa.

Recomenda-se usar um *spray* de um **retardador de evaporação**, porque esse filme mono-molecular será lavado quando a fonte externa de água por usada mais tarde, durante a cura com água.

9. CONCLUSÕES DO PROF. AITCIN em 2012 :

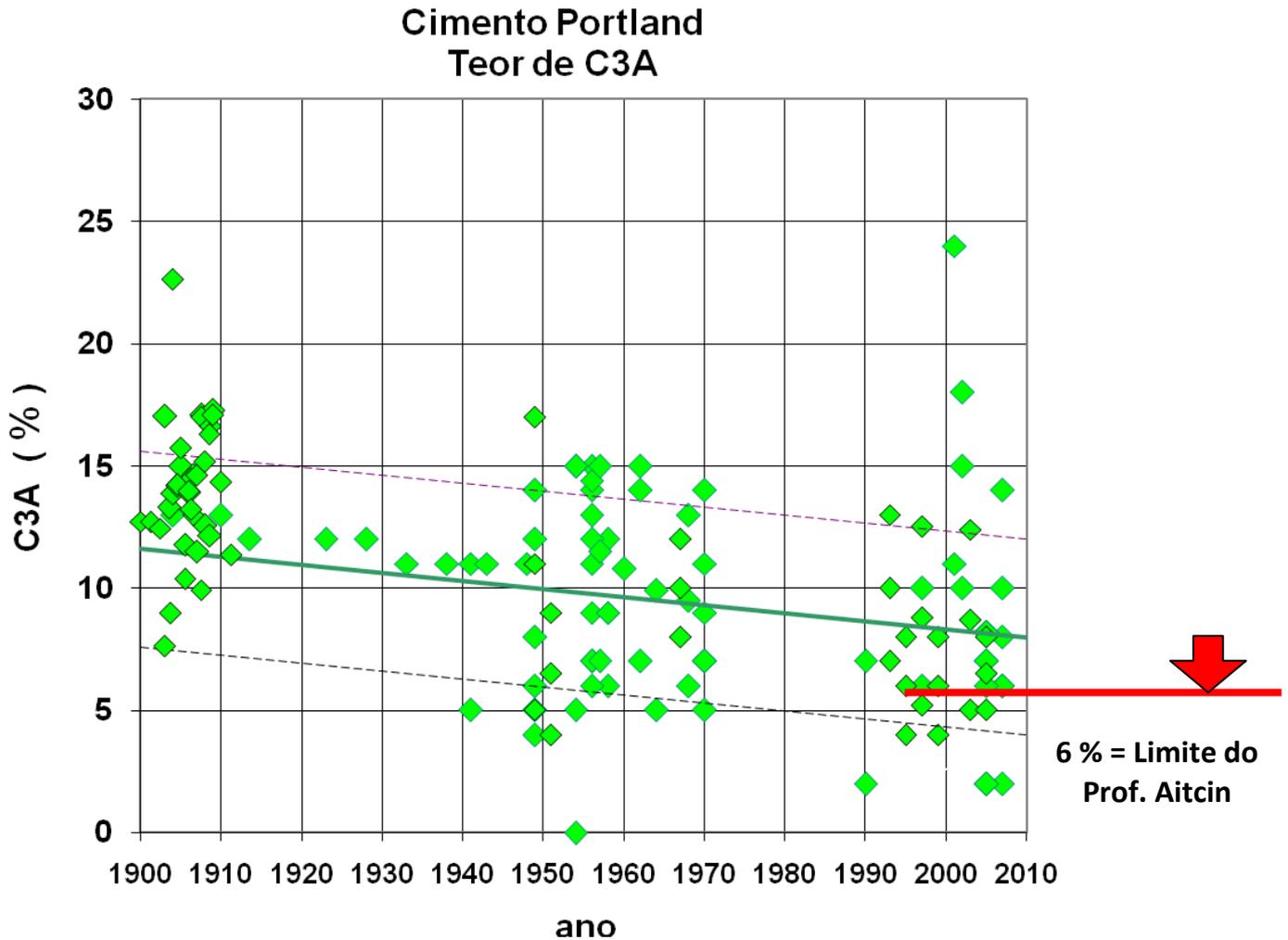
- Projetistas podem contribuir para o aumento da *qualidade* das estruturas de concreto projetando essas estruturas com HPC.
- Mas, essa mudança na resistência do concreto implica em que o cimento usado na obra deva ter um baixo teor de C3A (< 6%) , um teor moderado de álcalis (0,6% a 0,8%) e C3S < 60%.
- Isso é necessário para evitar problemas reológicos no concreto da obra.
- Além disso a **cura do HPC usando água** deve ser **obrigatória** e o construtor deve ser pago especificamente para curar **com água** a estrutura de concreto.
- A substituição de uma parte dos agregados de pedra por igual volume de agregado leve saturado reduz consideravelmente a retração autógena.
- *Observando os gráficos, feitos por E.C.S.Thomaz, e mostrados adiante, conclue-se que os cimentos comuns, em sua maioria, não devem ser usados para fazer um HPC .*

Referências

Aitcin , P. C. , Mindess, S. - 2011- “Sustainability of Concrete” Spon Press , London.
 Bentz,D.,P., Aitcin P.C. - .2008 - “ The hidden meaning of the water-to-cement ratio” Concrete International , Vol. 30, No5- June 2008 , pp. 51-54.



Gráfico feito por E.C.S.Thomaz



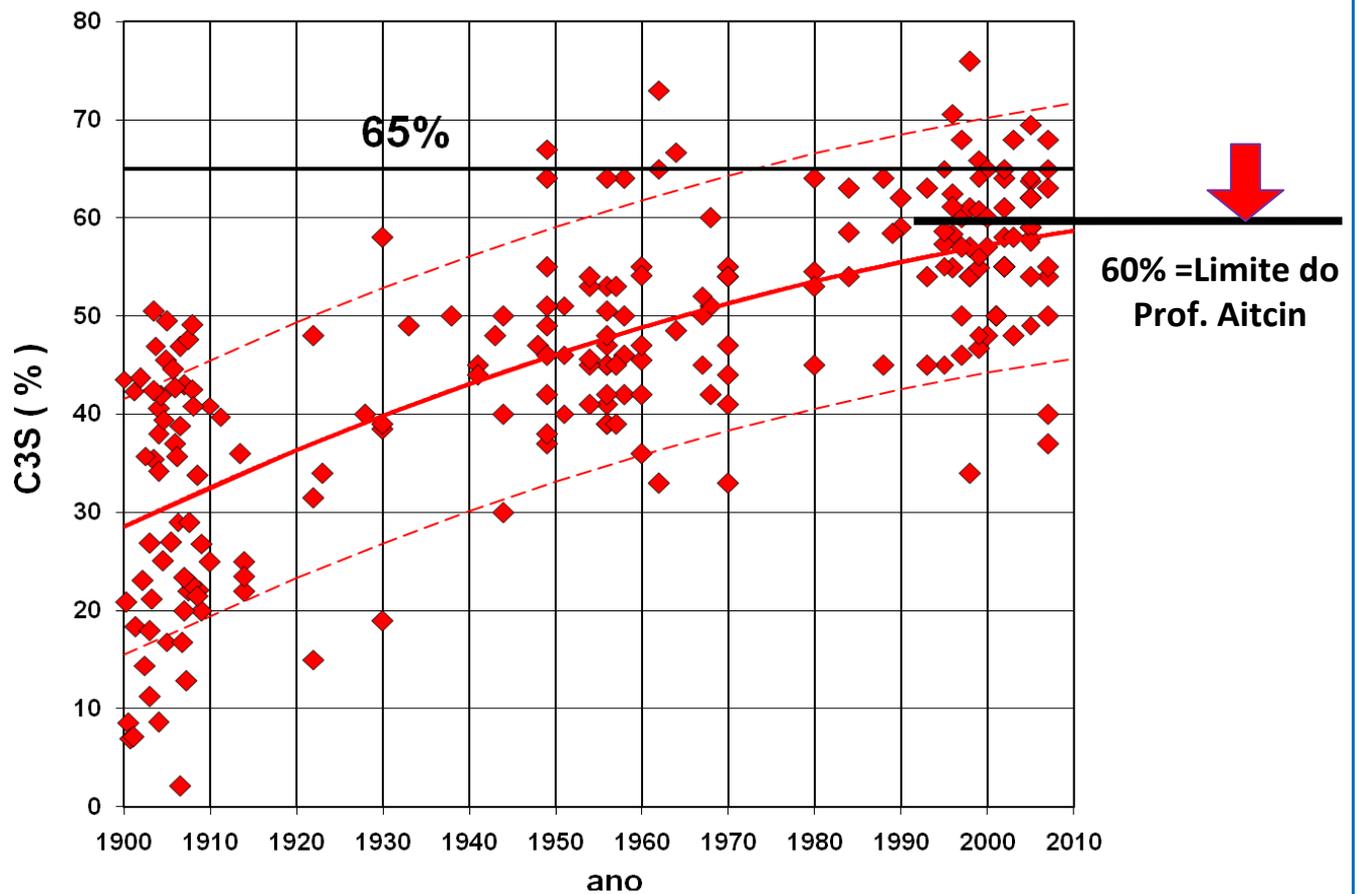
Poucos cimentos atuais têm esse baixo teor de C3A



Gráfico feito por E.C.S.Thomaz

Cimento Portland Comum : Teor de C3S

*C3S = endurecimento rápido,
alto calor de hidratação
alta resistência inicial*



Nem todos os cimentos atuais satisfazem essa limitação



Gráfico feito por E.C.S.Thomaz

CIMENTOS - FINURA BLAINE m²/kg

USA ASTM TYPE I e TYPE II (clinquer puro + gesso)
 Alemanha CEM I (clinquer puro + gesso) - CEM II (clinquer puro + gesso + escoria)
 Brasil CP I (clinquer puro + gesso) - CP II (clinquer puro + gesso + escoria)

