

Cimentos e Concretos

Há décadas participando e convivendo com projetos e obras de concreto armado ou de concreto protendido, observo o contínuo crescimento dos problemas de fissuração e de deterioração nessas obras de concreto. A procura dos motivos mostra ser necessária uma revisão nas características dos cimentos atualmente usados, uma vez que as pedras e areias usadas nos concretos são as mesmas, as fôrmas são similares e as técnicas de construção são, em geral, até mais avançadas.

...

A história se repete no dia a dia:

*A **estrutura** de concreto fissura.*

*O **calculista** é acusado de não ter projetado armadura suficiente.*

*O **construtor** é, a seguir, acusado por não ter curado o concreto adequadamente, de modo a evitar a fissuração por retração do concreto. Que retração?*

*A **concreteira** logo apresenta os resultados dos corpos de prova comprovando a resistência fck 28 do concreto.*

*A **cimenteira** comprova que o seu cimento satisfaz às exigências das normas*

Todos certos?

*O **proprietário** da obra exige correção das falhas. Sem custos.*

Todos reclamam e ninguém quer arcar com os custos.

A questão acaba na justiça.

*O **juiz** julga baseado na **norma**.*

*Eng. **perito** do juiz, o que diz a norma ?*

...

*O **cimento** do concreto da sua obra, é bom?*

É Você quem escolhe? Você sabe escolher?

Você tem todas as informações sobre os cimentos disponíveis?

Você tem todas as opções de escolha que Você gostaria de ter?

***Você** só se interessa pelo fck aos 28 dias ?*

...

Diversas opiniões são apresentadas mais adiante sobre os cimentos atualmente usados.

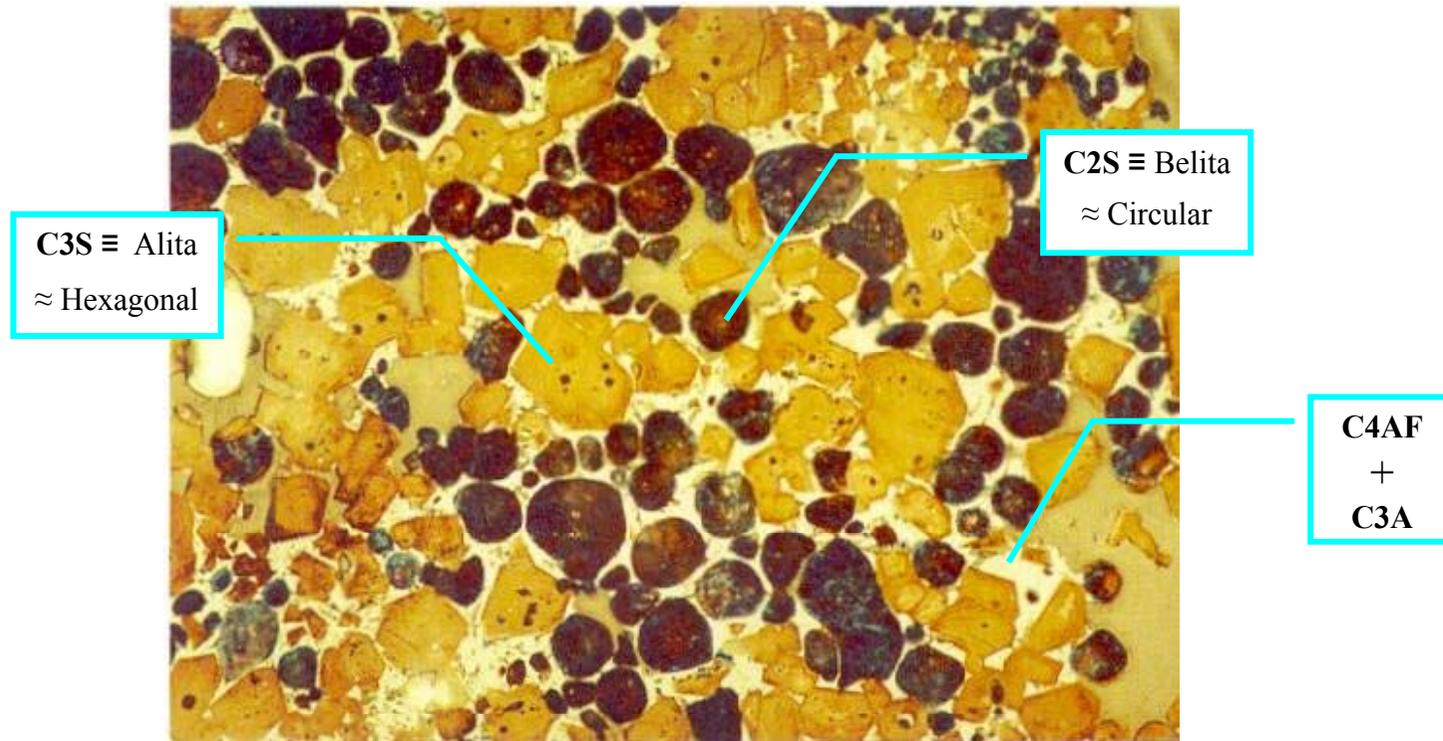
*A seguir **um resumo**.*

Cimentos e Concretos

Resumo das opiniões de diversos autores.

- *“Comparando com os concretos antigos, os concretos modernos tendem a fissurar mais facilmente, devido à maior retração térmica, à maior retração por secagem ... Tem ocorrido deterioração prematura de estruturas de concreto, mesmo quando se segue a melhor boa técnica na prática da construção.*
- *Isto mostra que alguma coisa está errada nas nossas normas, no que se refere às exigências feitas para garantir a durabilidade do concreto”.*
- ...
- *“Conseqüências: Aumento de manifestações patológicas, de ações na justiça em defesa do consumidor, acarretando o aumento de gastos com manutenção e indenizações aos usuários das obras”.*
- *Maiores gastos com manutenção estão exigindo ações de melhoria para atender à durabilidade”*
- ...
- *“Essas mudanças resultam no concreto moderno mais poroso, com maior permeabilidade, e que, como conseqüência, é mais sensível à carbonatação e mais propício à penetração de agentes agressivos.*
- ***O concreto moderno é um concreto menos durável”.***
- ...
- *“Muitos cimentos, que são considerados comuns hoje em dia, eram considerados de endurecimento rápido poucas décadas atrás”.*
- ...
- *“A prática das construções não acompanhou as mudanças ocorridas no cimento.*
- *Os cimentos atuais, muito finos e com alto teor de C3S, liberam calor muito rápido, e o concreto fica muito aquecido. Quando o concreto resfria rapidamente, fissura.”*
- ...
- *“Deveriam ser fixadas as propriedades finais, obtidas com cada cimento, como:*
- *Início e fim de pega com faixas estreitas de tempo.*
- *Taxa de liberação de calor de hidratação ao longo do tempo.*
- *Resistência aos 7 dias, aos 28 dias e aos 90 dias.”*
- ...
- ***“Tenho obras de mais de 50 anos com cobrimentos mínimos e em perfeito estado”.***
- ...
- *“Ou mudam os cimentos, ou mudam os métodos de execução das obras, ou as obras continuarão a se deteriorar”.*

Informação básica. *Como todos os comentários falam em C3S, C2S, C3A... vejamos o que são esses componentes do cimento Portland.*



Largura do campo da figura: 0,19 mm = 190 μm (≈ espessura de 2 folhas de papel)

O cimento Portland tem 4 componentes principais:

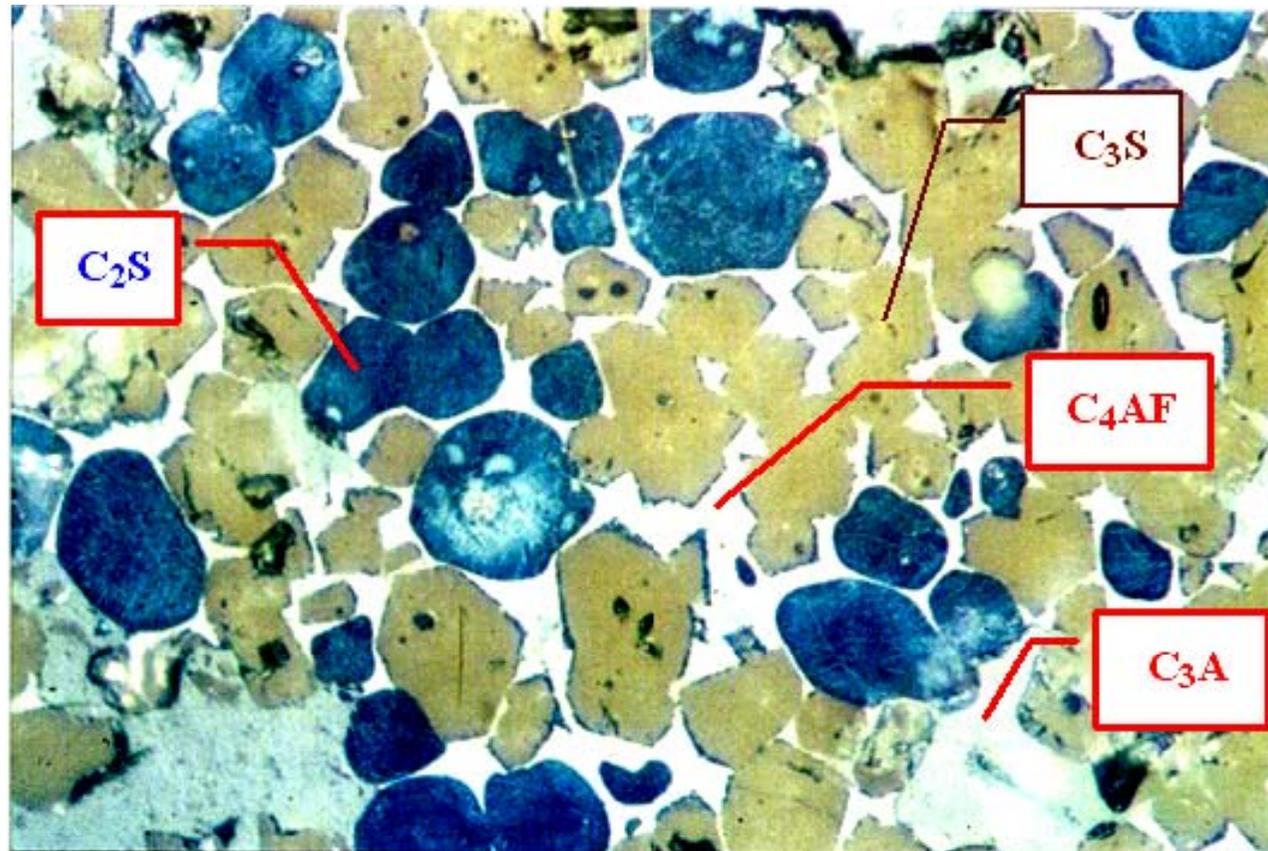


Terminologia usual:



Informação básica.

Clinker do Cimento Portland segundo Donald. A. St John



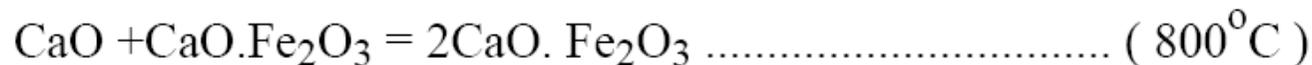
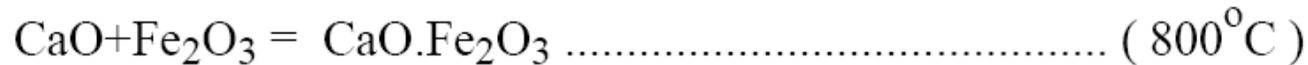
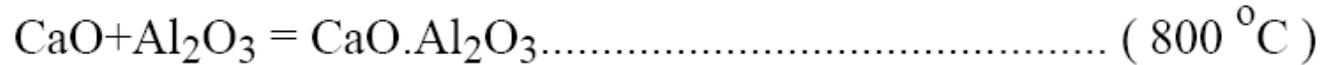
Largura do campo da figura=0.60 mm= 600 μ m (\approx espessura de 6 folhas de papel)



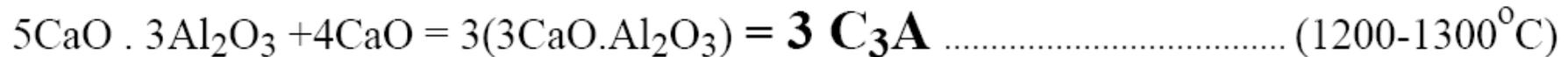
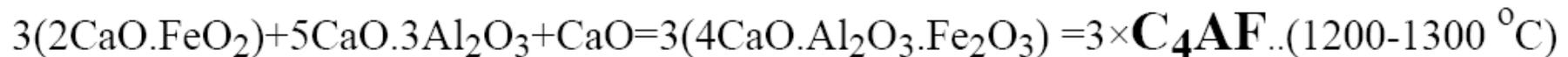
3 . Fabricação do Cimento :

Ver Cemnet –Cement Kiln Process Chemistry [92] e A.A.Boateng- Rotary Kilns- [50]

Zona de Decomposição no forno:



Zona de Transição no forno :



Zona de sinterização no forno :



Resfriamento rápido para que o C3S não volte a ser C2S :

Observação :

Fusão : C₂S : 2130 °C - Fusão congruente
 C₃S : 2150 °C - Fusão incongruente



Clinker do cimento

4. Meio Ambiente : Antecipando Comentários

Argumentos ambientais indicam a fabricação de cimentos com baixo teor de C3S e alto teor de C2S, justamente ao contrario do que se faz hoje em dia no mundo inteiro.

Para fabricar um cimento com **baixo teor de C3S** emite-se menos **CO2** para atmosfera do que para se fabricar cimento com alto teor de C3S.

O componente do cimento $C3S = (CaO)_3.(SiO_2)$, tendo mais Cálcio que o componente $C2S = (CaO)_2.(SiO_2)$, libera mais CO_2 para a atmosfera quando da decomposição do calcário $CaCO_3 = (CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2)$ durante a fabricação do cimento.

O C2S se forma a uma temperatura mais baixa ($1000^\circ C$) que a temperatura na qual se forma o C3S (1350 a $1450^\circ C$), necessitando pois de menos combustível e liberando menos CO_2 para a atmosfera.

O C3S é o componente que gera calor rapidamente, ao se hidratar, ao contrario do C2S. Causa problemas de fissuração , por retração térmica nos primeiros dias.

Segundo **J.H.Sharp** em “ *Industrial trial production of low energy cement, belite(C2S) cement* ”- *Cement & Concrete Composites* 25 (2003) : *A energia consumida durante a produção de clínquer com baixo teor de C3S é 500-540kJ/kg menor que a energia consumida produzindo o cimento usual com alto teor de C3S. A liberação de CO_2 para a atmosfera também é menor.*

Opiniões : *Veja adiante algumas opiniões sobre os concretos e os cimentos usados atualmente em todo o mundo.*

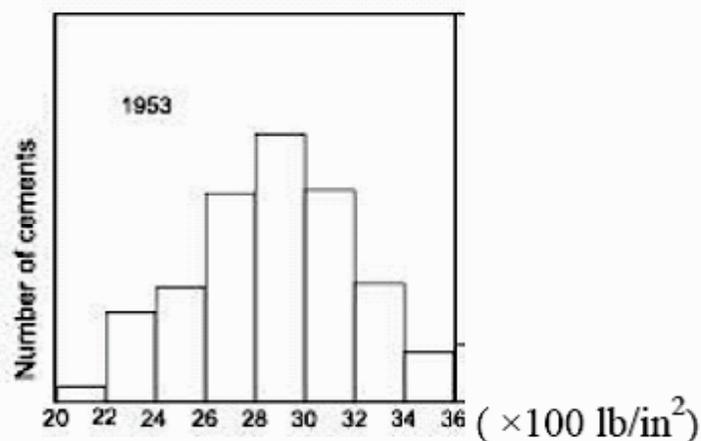
1 - Prof. P. Kumar Mehta & Richard W. Burrows

- **Fatos marcantes após 1975:**
- Melhoria da qualidade do adensamento com vibradores de maior eficiência.
- Uso de Plastificantes e Super-plastificantes.
- Uso de Adições: micro-sílica, cinzas, escórias.
- Tamanho dos grãos dos cimentos diminuiu 2 vezes.
- Liberação mais rápida do calor de hidratação.
- Betoneiras de eixos múltiplos, com maior eficiência na mistura. Mistura forçada.
- Bombeamento do concreto
- Concretos auto-adensáveis

Cimentos ASTM II (Prof. Mehta)

Variação das características ao longo dos anos.

Resistência em cubos, aos 7 dias, de vários cimentos II ASTM C-150

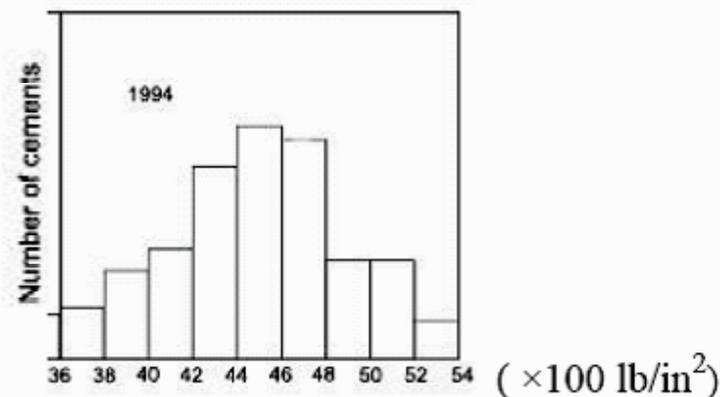


Ano 1953 :

A figura mostra que, até 1953, pelo menos 50% dos cimentos ASTM Tipo II tinham menos de 3000 lb/in^2 (21 MPa) de resistência aos 7 dias.

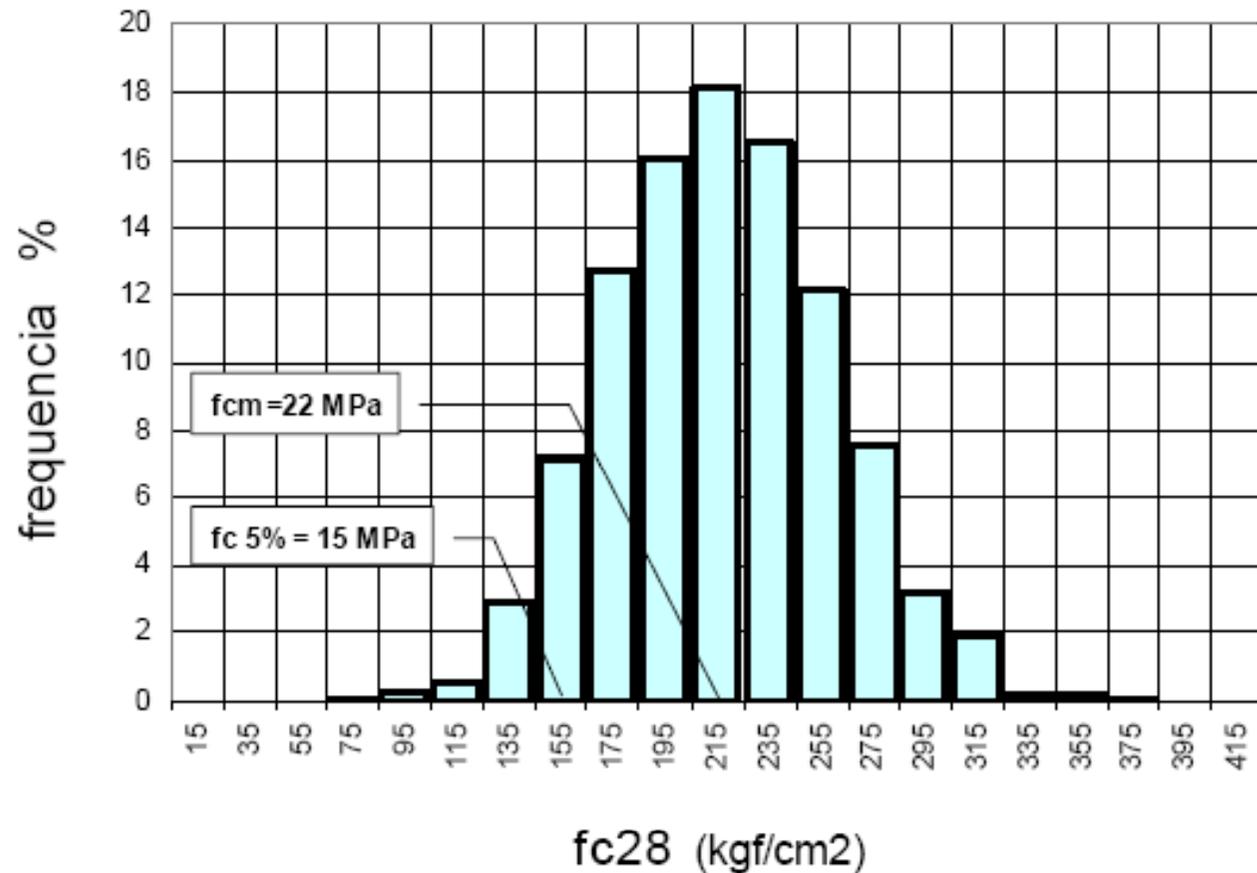
Ano 1994 →

Em 1994, nenhum deles tinha resistência menor que 3000 lb/in^2 (21 MPa).
Em 1994, cerca de 50% dos cimentos ASTM II tinham resistência, aos 7 dias, na faixa entre 4400 lb/in^2 e 5400 lb/in^2 ($31 \text{ MPa} - 38 \text{ MPa}$).



Hoje, 2001, o cimento disponível no comércio alcança, já entre os 3 dias e os 7 dias, a resistência mínima exigida pela ASTM para o dia 28.

Resistência do concreto INT - Rio de Janeiro - 1955
(1332 corpos de prova)

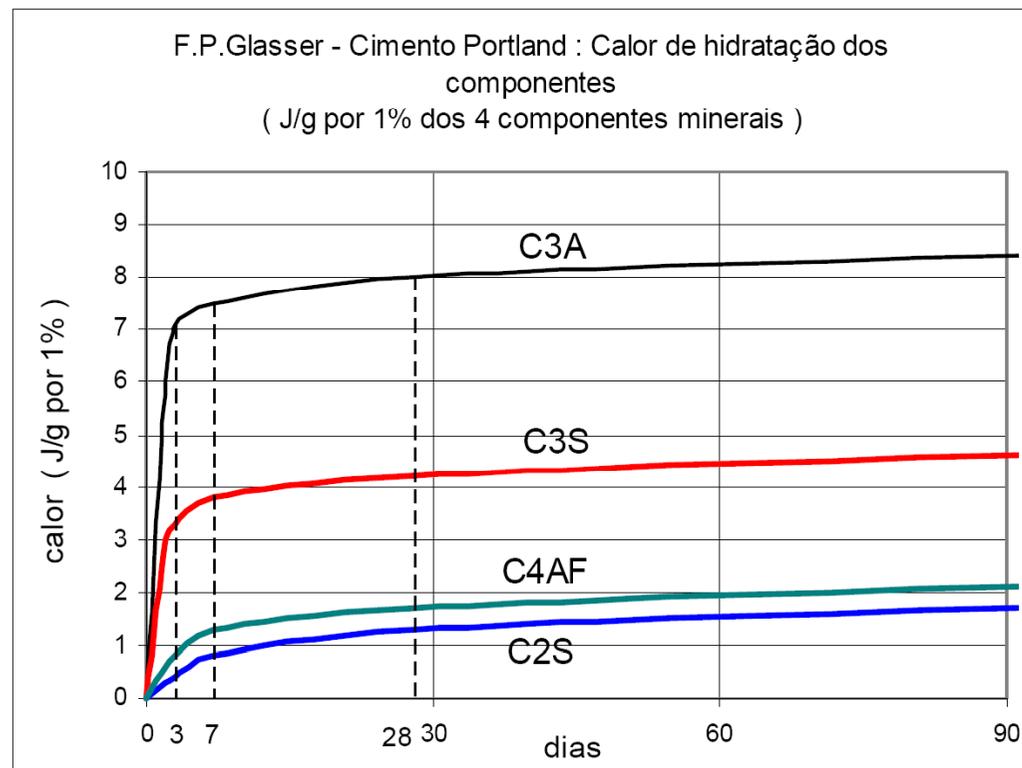


Comentários:

Na década de 50, no Rio de Janeiro e no Brasil, grandes obras em concreto armado foram executadas com $f_{ck28} = 15 \text{ MPa}$.

3 - F. P. Glasser – *Calor de hidratação dos componentes do cimento Portland.*
Thermodynamics of Cement Hydration
Entalpia de Hidratação dos compostos do Cimento
Materials Science of Concrete VII – 2005 - The American Ceramic.

Nomenclatura : $C_3S = (3.CaO).SiO_2$; $C_2S = (2.CaO).SiO_2$
 $C_3A = (3CaO).Al_2O_3$; $C_4AF = (4CaO).(Al_2O_3).(Fe_2O_3)$



As normas AASHTO M 85 e ASTM C 150 fixam, na nova edição 2007, um índice para limitar o calor de hidratação: $C_3S + 4.75 \times C_3A \leq 100$

Cimento Portland Comum : Teor de C2S

*C2S = endurecimento lento,
baixo calor de hidratação
baixa resistência inicial*

Prof. Eduardo Thomaz

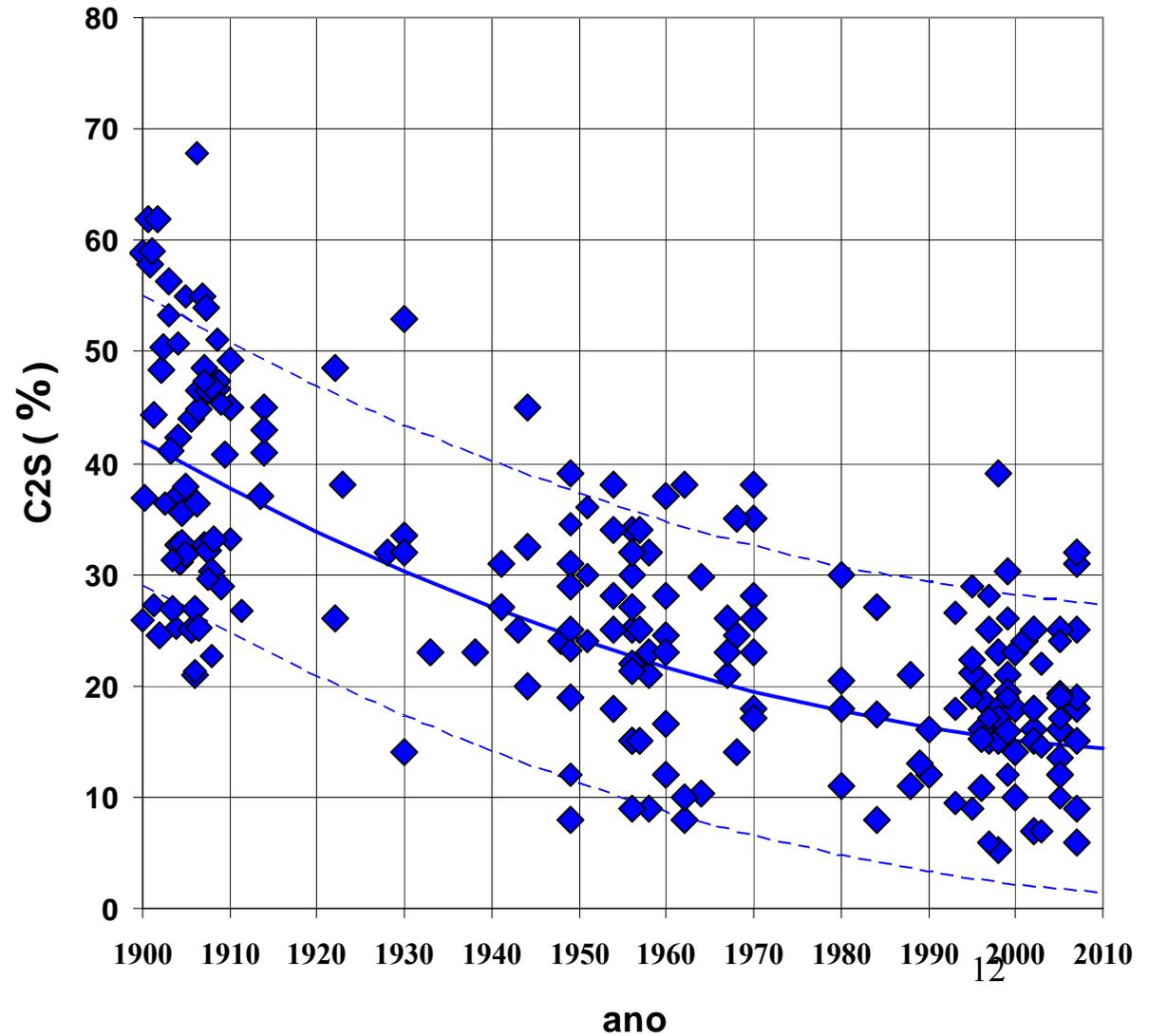
*Variação, ao longo dos anos, do
teor de C2S e de C3S nos
cimentos Portland.*

*Dados coletados nos livros e
artigos citados nas referências.*

Nomenclatura :

$C3S = (3.CaO). SiO_2$;

$C2S = (2.CaO). SiO_2$



Cimento Portland Comum Teor de C3S

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

Prof. Eduardo Thomaz

Variação, ao longo dos anos, do teor de C2S e de C3S nos cimentos Portland.

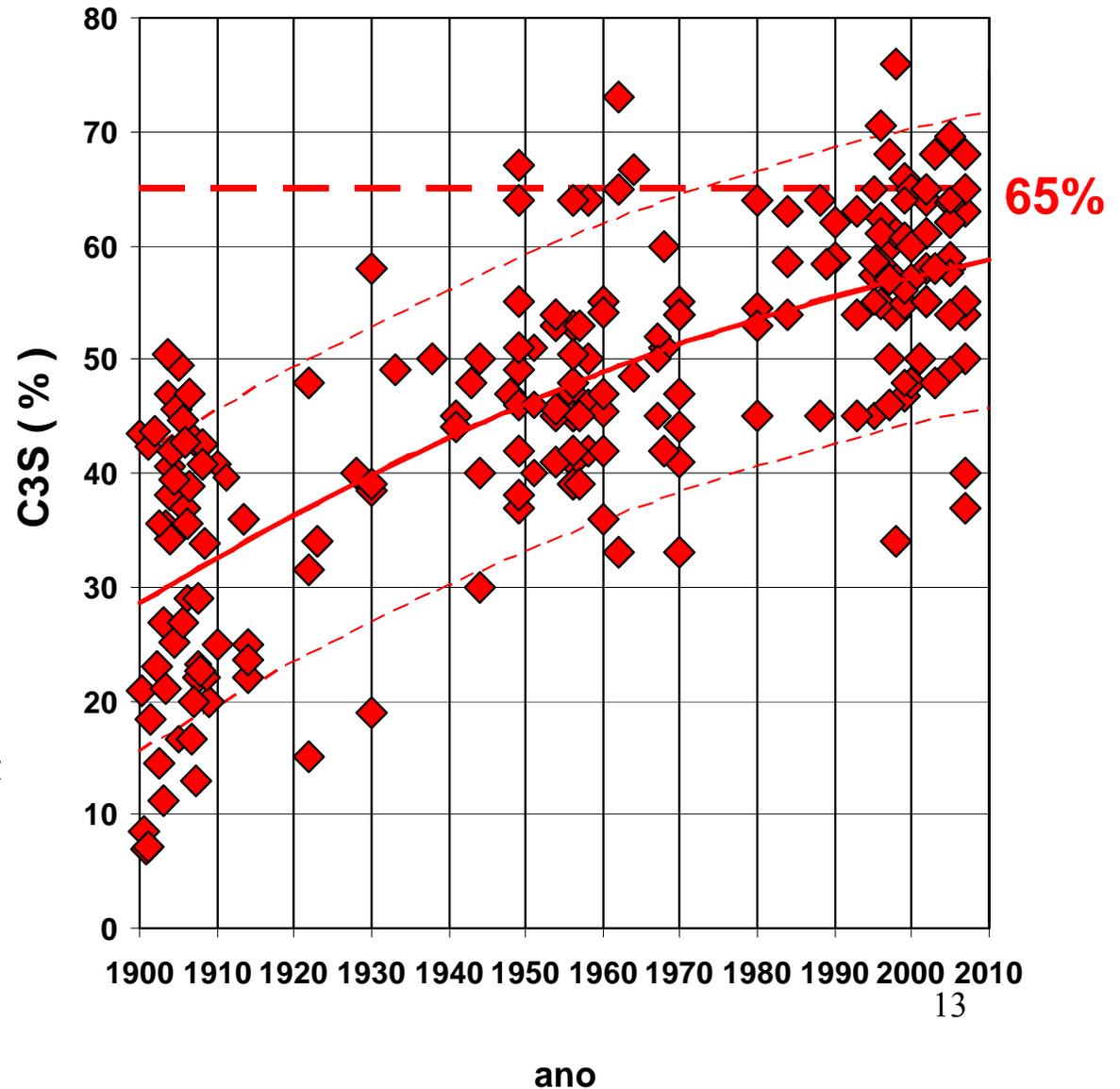
Dados coletados nos livros e artigos citados nas referências.

Nomenclatura :

C3S = (3.CaO). SiO₂ ;

C2S = (2.CaO). SiO₂

As misturas de matérias primas, adequadas para produzir clínquer com mais de 65% de C3S, são extremamente difíceis de “queimar”.



C3S × C2S × Anos

Prof. Eduardo Thomaz

Variação, ao longo dos anos, do teor de C2S e de C3S nos cimentos Portland.

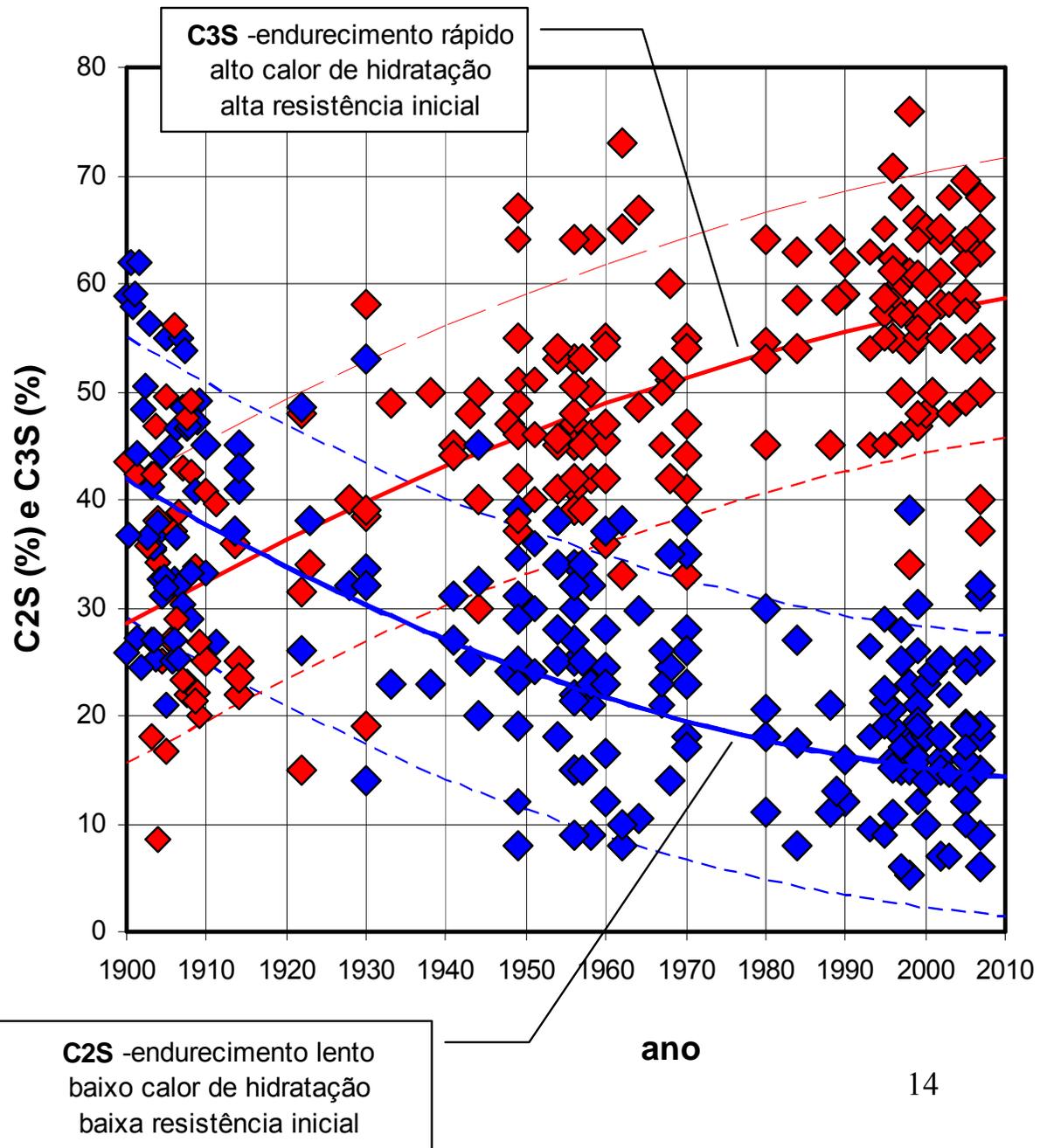
A soma (C3S + C2S) é praticamente constante ao longo dos anos.

O C2S vem sendo substituído pelo C3S

Nomenclatura :

C3S = (3.CaO). SiO₂ ;

C2S = (2.CaO). SiO₂



C3S × C2S × Anos

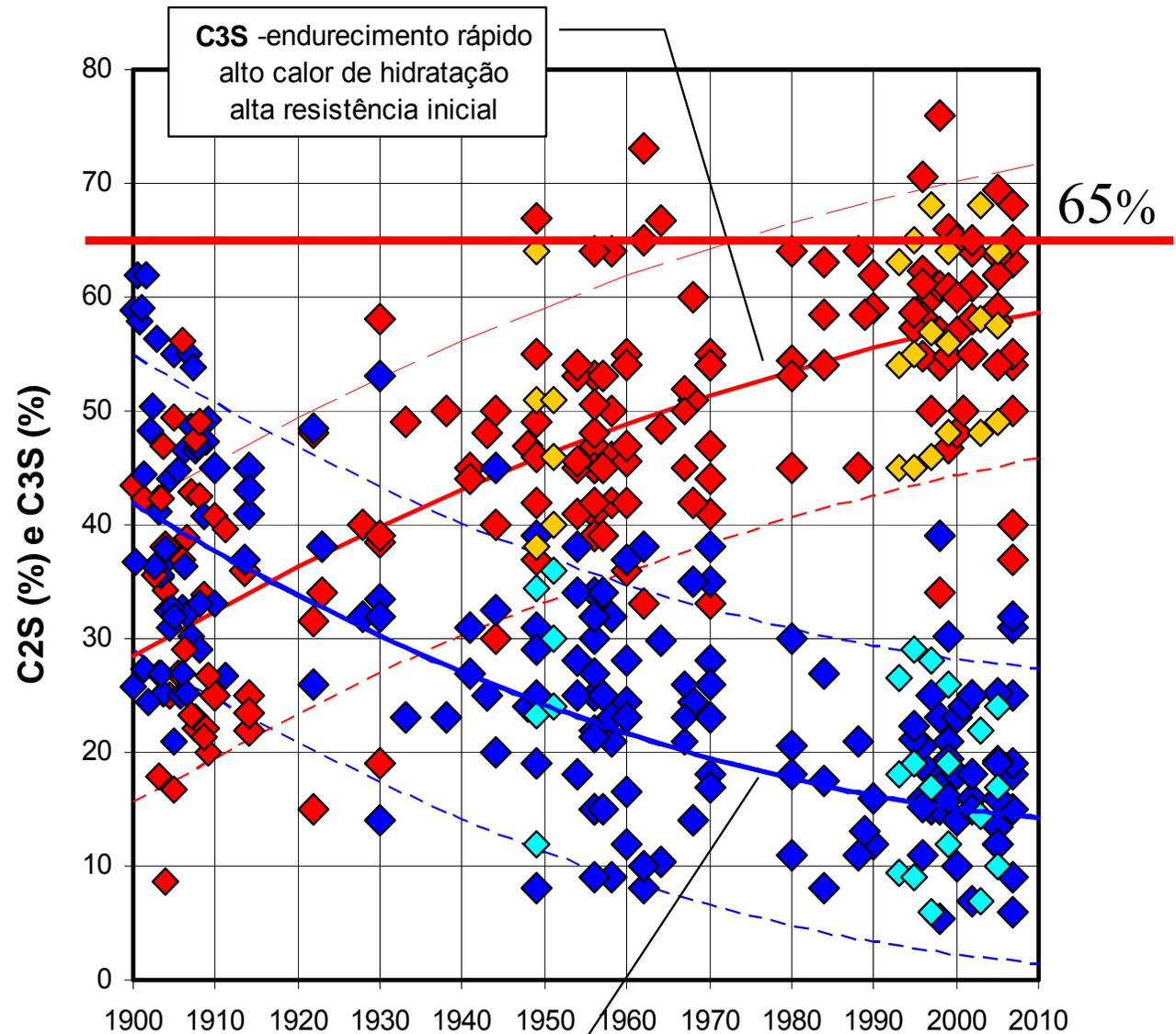
Prof. Eduardo Thomaz
*Varição, ao longo dos anos, do
teor de C2S e de C3S nos
cimentos Portland.*

**Pontos azul claro e abóbora
são da PCA 2008** →

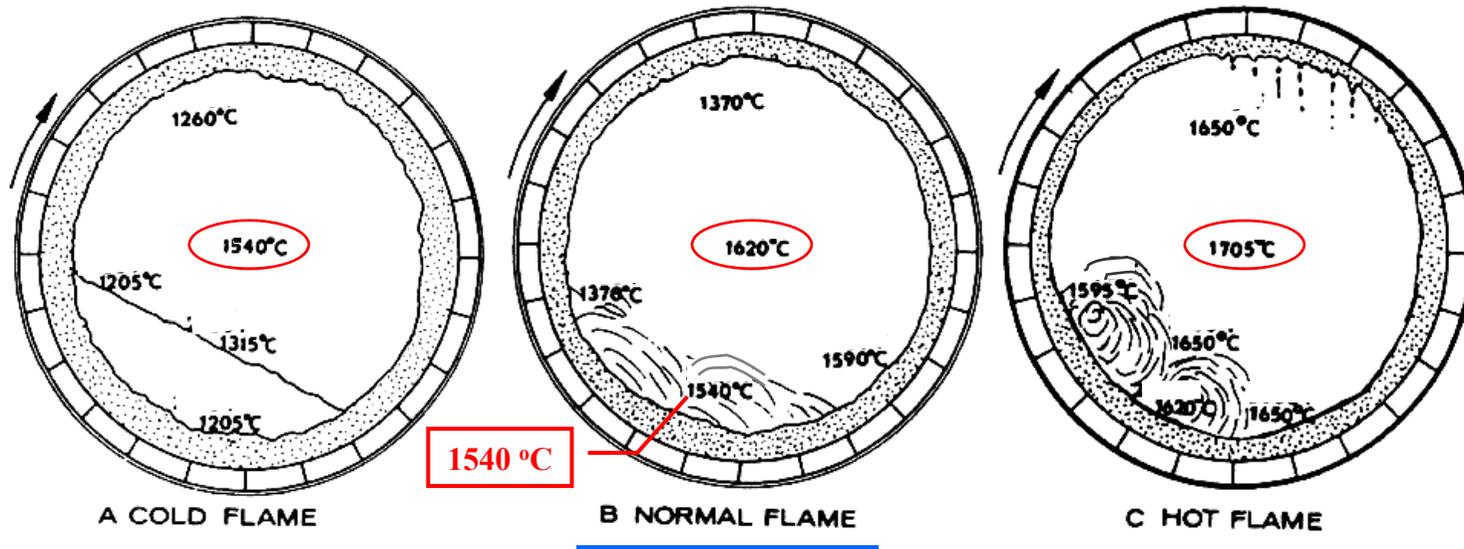
Nomenclatura :

$C3S = (3.CaO). SiO_2$;

$C2S = (2.CaO). SiO_2$



“The Rotary Kiln” - Kurt E. Peray



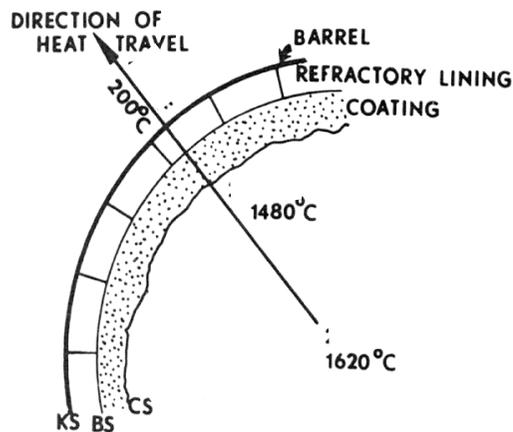
• Segundo Kurt E. Peray - *The Rotary Cement Kiln* [49] :

• As misturas adequadas para produzir clínquer com mais de 65% de C3S , i.e com muito CaO e muito SiO₂, são extremamente difíceis de “queimar” e geram pouco material fundido para formar o “revestimento móvel” (coating) das paredes dos fornos. Segundo [77] , o material fundido = $2,95 \times \text{Al}_2\text{O}_3\% + 2,2 \times \text{Fe}_2\text{O}_3\%$

• O revestimento fixo, feito com material refratário, é destruído.

• A perda de calor pela parede de aço do forno é grande, causando uma baixa eficiência térmica do forno.

• $\text{C3S} = (3.\text{CaO}). \text{SiO}_2$; $\text{C2S} = (2.\text{CaO}). \text{SiO}_2$



Kurt E. Peray - *The Rotary Cement Kiln*

Chemical Publishing Co. Inc. – New York

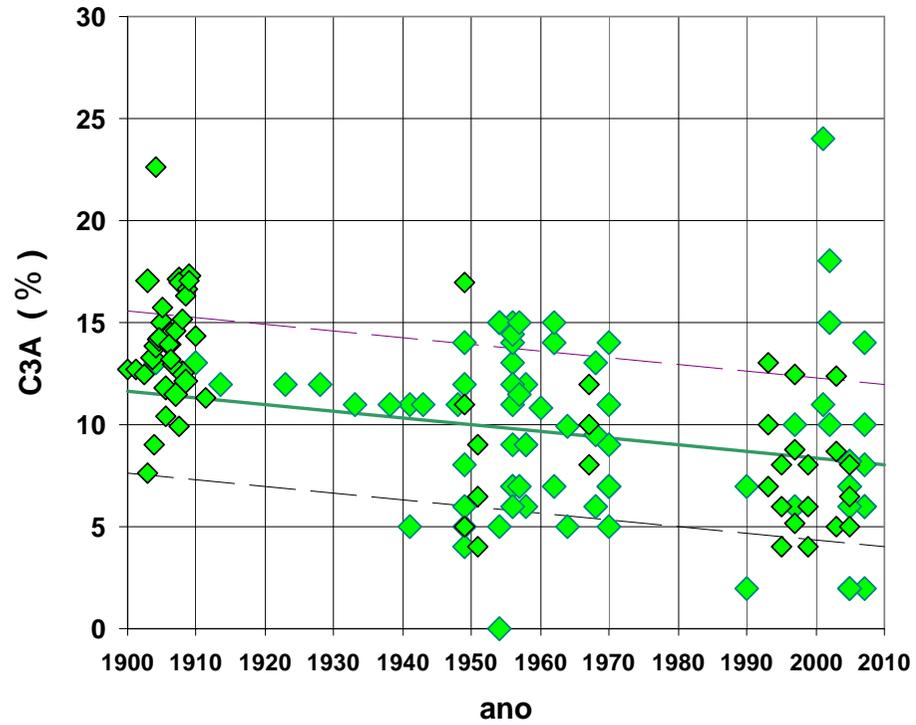
“
...

- Como discutido anteriormente, C3S (alite) é o constituinte mais importante do clínquer do cimento, que comanda a resistência inicial do cimento.
- *Alite se forma na zona de queima do forno pela combinação, na fase líquida, do C2S (belite) com a cal livre CaO disponível.*
- É importante “queimar” o forno de modo a obter a máxima quantidade de C3S e a mínima quantidade de cal livre CaO no clínquer.
- *À medida que essa reação se processa, os cristais de C3S (alite) crescem em tamanho ao mesmo tempo que os cristais de C2S (belite) encolhem progressivamente e a cal livre começa a desaparecer.*
- As misturas de matérias primas, usadas na alimentação dos fornos produzem “clínquers” com 52% a 62% de C3S.
- ***As misturas de matérias primas adequadas para produzir clínquer com mais de 65% de C3S são extremamente difíceis de “queimar”.***
- **Geram pouco material fundido para formar o “revestimento móvel” (coating) das paredes dos fornos. O revestimento fixo é feito com material refratário. A perda de calor pela parede de aço do forno é , então, grande, causando uma baixa eficiência térmica do forno.**

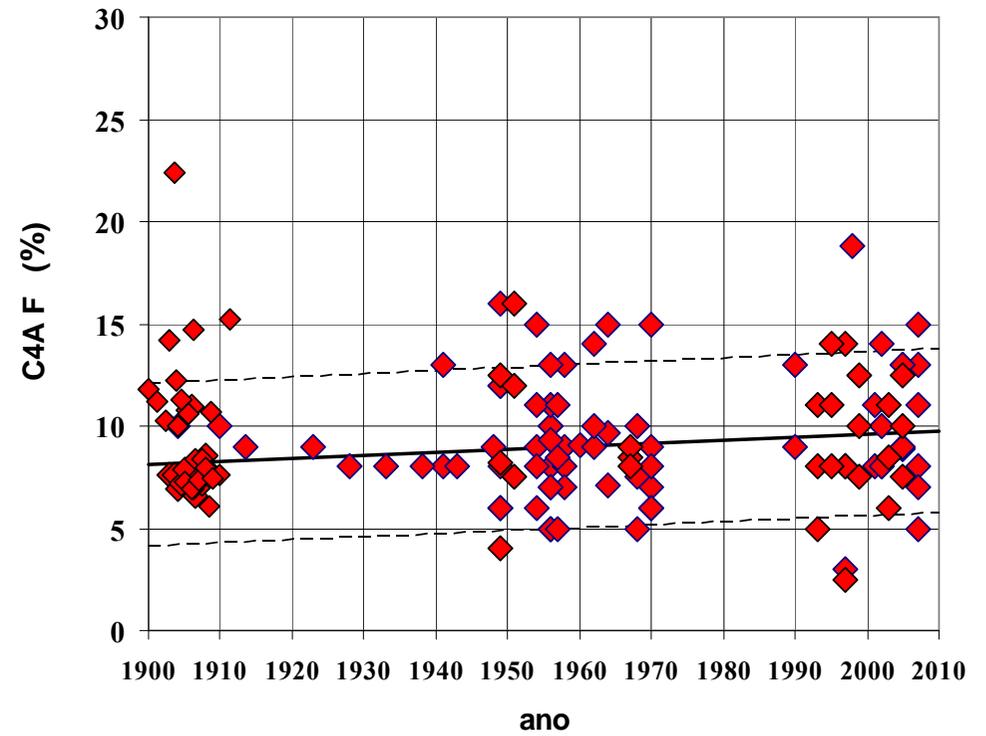
...”

Varição, ao longo dos anos, do teor de C3A e C4AF nos cimentos Portland

Cimento Portland Teor de C3A



Cimento Portland Teor de C4AF

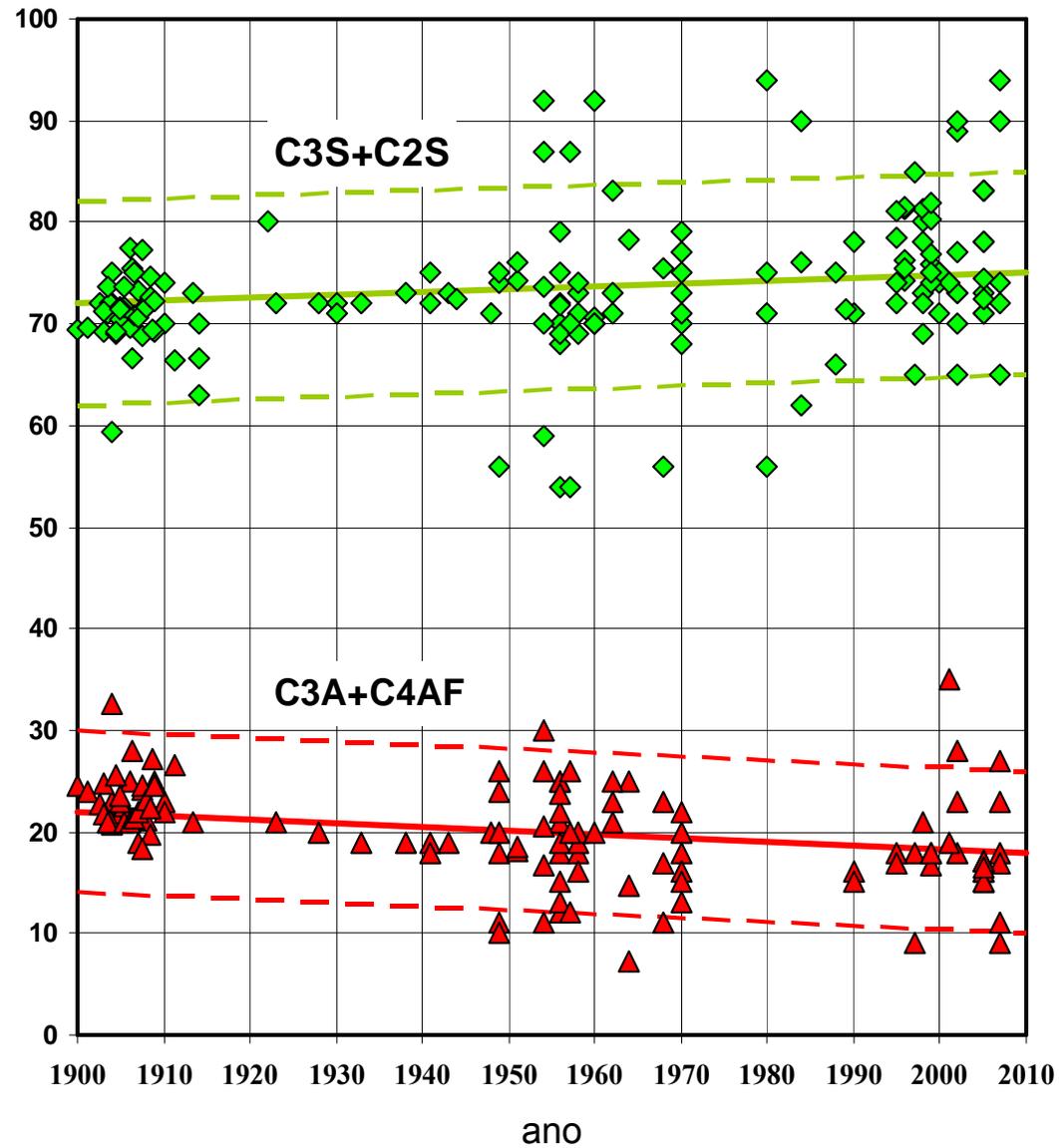


Cimento Portland

C3S+C2S (%) e C3A+C4AF(%)

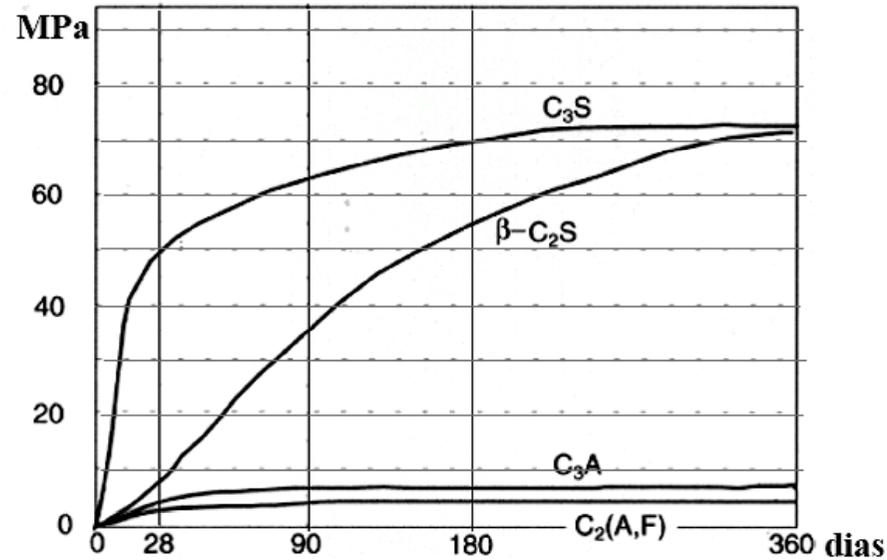
*A soma (C3S + C2S)
é praticamente
constante ao
longo dos anos.*

*O C2S vem sendo
substituído pelo C3S*

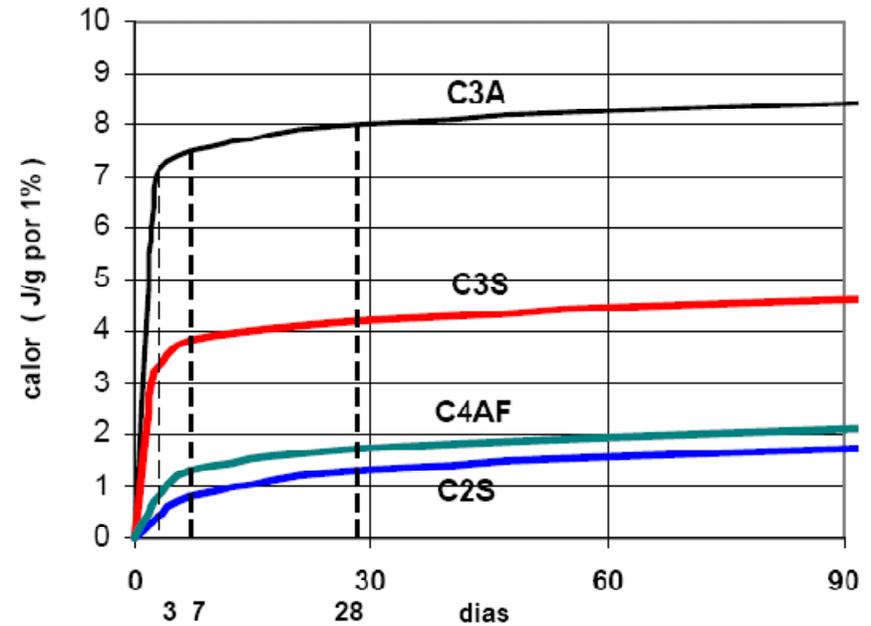


O dilema !

A resistência do C3S cresce rapidamente.
Ver Bogue [28]



O C3S ao ser hidratado libera muito calor.
Ver Glasser [34]



Concreto com alta resistência inicial e *quente*. Fissura ao resfriar rápido !

ou

Concreto com baixa resistência inicial e *frio*. Não fissura !

$(C3S/C2S) \times \text{Anos}$

Prof. Eduardo Thomaz

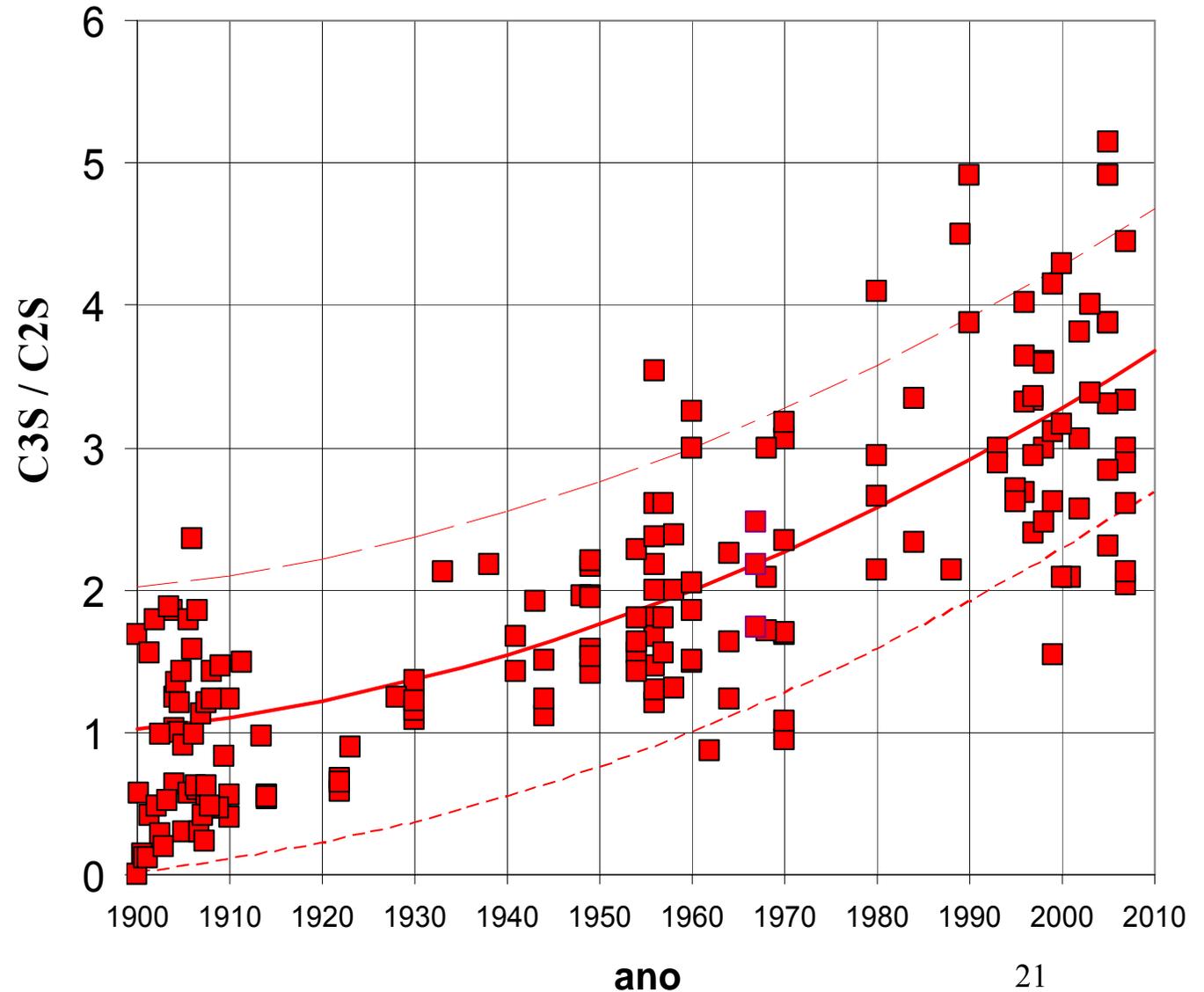
Varição, ao longo dos anos, da relação dos teores de C3S e de C2S nos cimentos Portland.

Dados coletados nos livros e artigos citados nas referências.

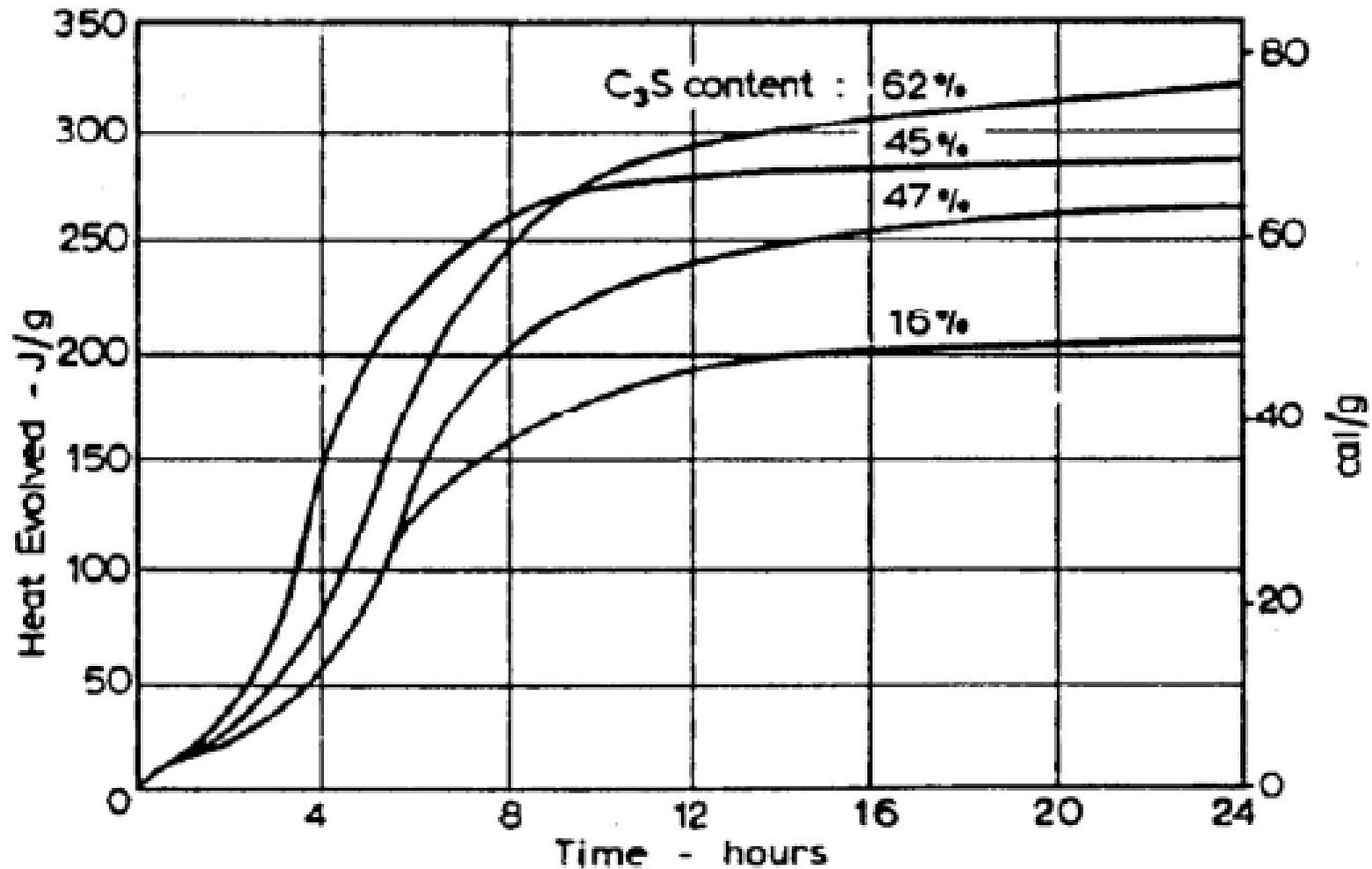
Nomenclatura :

C3S = $(3.CaO). SiO_2$;

C2S = $(2.CaO). SiO_2$



Calor de hidratação dos componentes do cimento



Influence of C_3S content on heat evolution (C_3A content approximately constant).

Termodinâmica

Calor total de hidratação do cimento : O calor de hidratação do cimento é a soma do calor de hidratação de seus componentes

$$\text{H cimento} = 500 \times \text{C3S}(\%) + 260 \times \text{C2S}(\%) + 866 \times \text{C3A}(\%) + 420 \times \text{C4AF}(\%) + 624 \times \text{SO3}(\%) \\ + 1186 \times \text{CaO livre}(\%) + 850 \times \text{MgO}(\%)$$

Exemplo:

$$\text{H cimento} = 500 \times 48,8(\%) + 260 \times 24,8(\%) + 866 \times 13,1(\%) + 420 \times 10,4(\%) + 624 \times 0,5(\%) \\ + 1186 \times 0,4(\%) + 850 \times 0,5(\%) = 478\text{J/g}$$

AASHTO M 85 e ASTM C 150 fixam, na nova edição 2007 : $C_3S + 4.75 \times C_3A \leq 100$

No exemplo : $48,8 + 4,75 \times 13,1 = 111,025 > 100 = \text{Cimento Não Aceito}$

Ensaio recentes na Alemanha comprovam a teoria da Termodinâmica.
VDZ-Tätigkeitsbericht 2005 – 2007

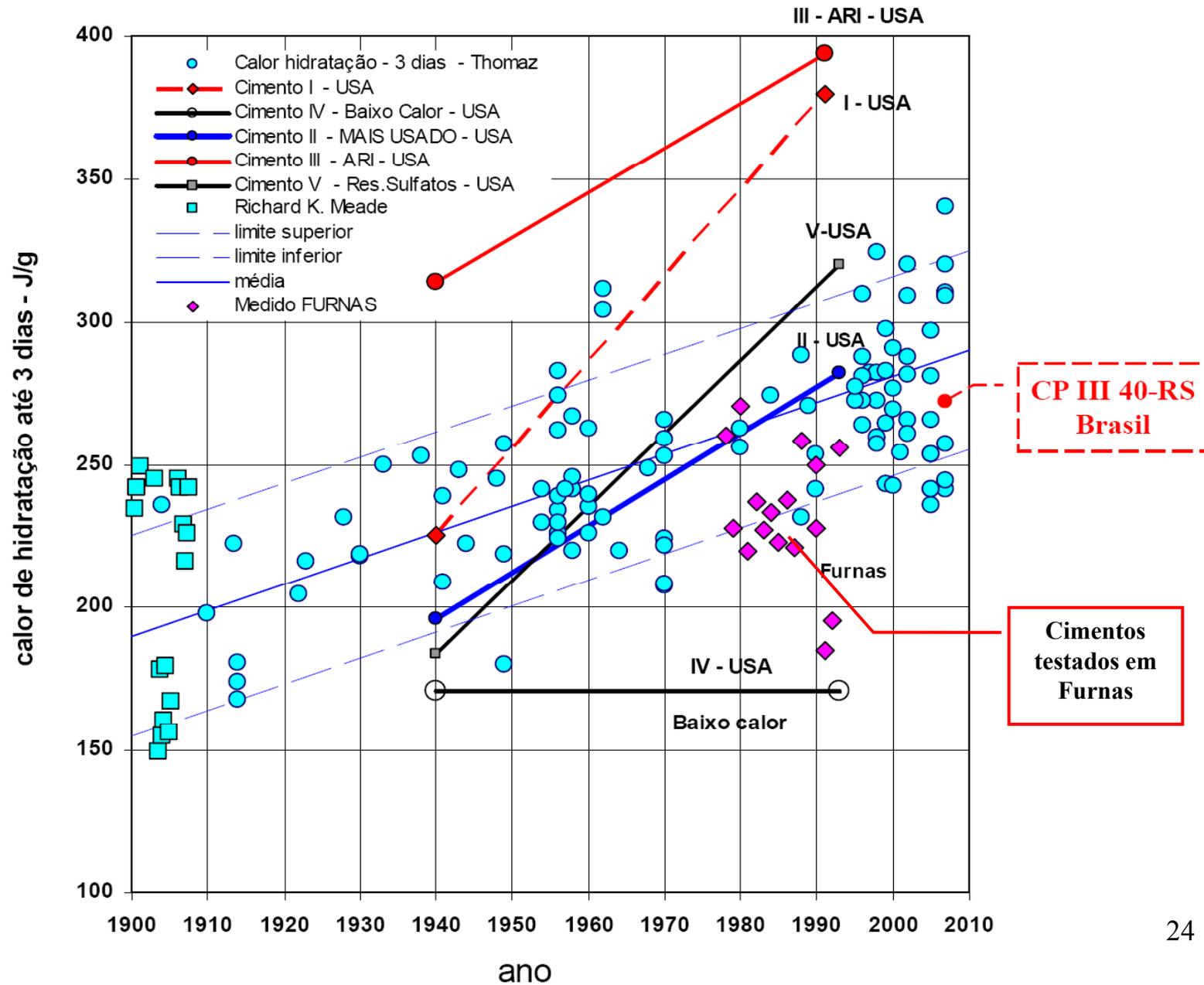
**Untersuchungen zur
Hydratation von Zement-
klinkerphasen ■**

Der Hydratationsverlauf eines Klinkerphasengemischs entspricht erstaunlich gut dem eines technischen Klinkers bzw. Zements gleicher Zusammensetzung.

Pesquisa sobre Hidratação das fases do Clinker do cimento

A variação da hidratação de uma mistura de fases do clinker corresponde incrivelmente bem à de clinker e de cimento com mesma composição

Calor de hidratação até os 3 dias segundo ACI Committee 225 - 1991



P. Kumar Mehta & Richard W. Burrows

- “... Muito adequados para os prazos curtos da indústria de construção, os cimentos atuais colocaram fora do mercado os antigos cimentos Portland com endurecimento lento, e que, portanto, eram mais duráveis.
- *É sabido que concretos feitos com cimentos portland, anteriores a 1930, desenvolviam a resistência muito lentamente porque eles eram moídos com grãos grossos. Os cimentos tinham uma superfície específica Blaine 195m² / kg.*
- Os cimentos continham uma quantidade relativamente pequena de silicato tricálcico, C3S, menos que 30 %.
- **Observação :** C3S = (3.CaO). SiO₂
- C2S = (2.CaO). SiO₂
- *Para obter altas resistências nas primeiras idades do concreto, para poder manter os rápidos prazos de construção, foram feitos novos aumentos da finura e do teor de C3S do cimento Portland comum.*
- **Em 1970, o teor de C3S do cimento Portland Tipo I da ASTM aumentou, nos U.S.A., para 50 % e a finura Blaine subiu para 300m²/kg .**
- *Hoje, os cimentos ASTM Tipo I e Tipo II podem ser encontrados com teor de C3S maior que 60% e com finura maior que 400 m²/kg.*

P. Kumar Mehta & Richard W. Burrows

- Várias inspeções de campo, durante o século 20, mostraram que após 1930, quando as resistências do cimento e do concreto aumentaram, seguiu-se um aumento dos problemas de deterioração.
- *Um aumento gradual do teor de C3S e o aumento da finura dos cimentos comuns permitiram a esses cimentos desenvolver altas resistências nas primeiras idades.*
- Comparando com os concretos antigos, os concretos modernos tendem a fissurar mais facilmente, devido à sua menor fluência, à maior retração térmica, à maior retração por secagem.
- ***Existe uma relação inversa entre uma alta resistência à compressão e a resistência à fissuração nas primeiras idades.***
- Existe uma forte relação direta entre a fissuração e a deterioração das estruturas de concreto quando expostas a severas condições de exposição.
- Tem ocorrido deterioração prematura de estruturas de concreto, mesmo quando se segue o estado da arte no método de construção.
- *Isto mostra que alguma coisa está errada nas nossas normas, no que se refere às exigências feitas para garantir a durabilidade do concreto.*

Eng. Adam Neville - Resistência do cimento e durabilidade

- *Aumento da resistência aos 28 dias, e também aumento da resistência aos 7 dias, de argamassas feitas com um determinado fator (água / cimento) .*

Grande aumento do teor médio de C3S de 47% em 1960 para 54% em 1970.

- *Houve uma redução correspondente do teor de C2S de modo que o teor total dos dois silicatos de cálcio permaneceu constante em torno de 70% a 71 %.*
- *Mudanças nos métodos de fabricação do cimento, vantagens de um cimento mais “forte”,*
 - *redução de teor de cimento para uma dada resistência,*
 - *remoção mais cedo das formas e construções mais rápidas.*

Esses benefícios, infelizmente, vieram associados a desvantagens.

- *A resistência f_{c7} dias é maior hoje.*
- *Maior calor de hidratação nas primeiras idades.*
- *A taxa de crescimento entre 7 e 28 dias mudou em consequência da mudança da relação C3S / C2S .*
- *Para um fator água cimento de 0.60: Em 1950 , $f_{c28} / f_{c7} = 1.60$ Em 1980 , $f_{c28} / f_{c7} = 1.30$*
- ***O crescimento da resistência, após os 28 dias, é muito reduzido, de modo que esse crescimento não é confiável no projeto de estruturas.***

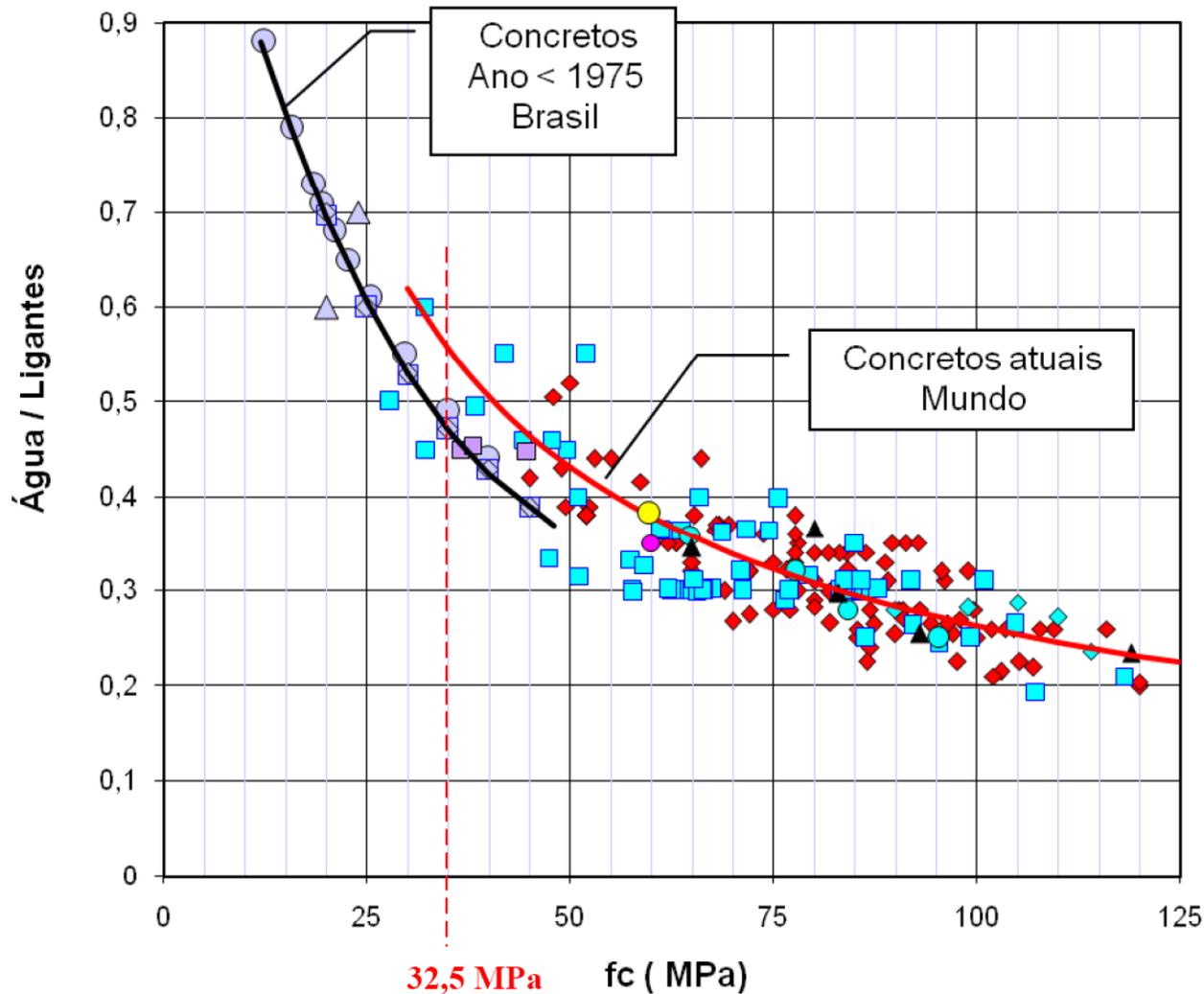
Adam Neville - Resistência do Cimento x Durabilidade

- Um exemplo da mudança da resistência aos 28 dias, entre os anos de 1979 e 1984: Um concreto com uma resistência cúbica de 32,5 MPa requeria um fator água/cimento 0,50 em 1970 e era produzido com água/cimento 0,57 em 1984 .
- *Supondo que, para que a trabalhabilidade permanecesse a mesma, fosse mantida a mesma quantidade de água, 175 kg/m³, seria possível reduzir o teor de cimento de 350 kg/m³ para 307kg/m³.*
- De um modo geral, entre 1950 e 1980, para um concreto com mesma resistência e mesma trabalhabilidade, foi possível reduzir o teor de cimento em 60kg a 100 kg por metro cúbico de concreto, e ao mesmo tempo aumentar o fator água cimento em 0,09 a 0,13.

Adam Neville – Resistência do Cimento x Durabilidade

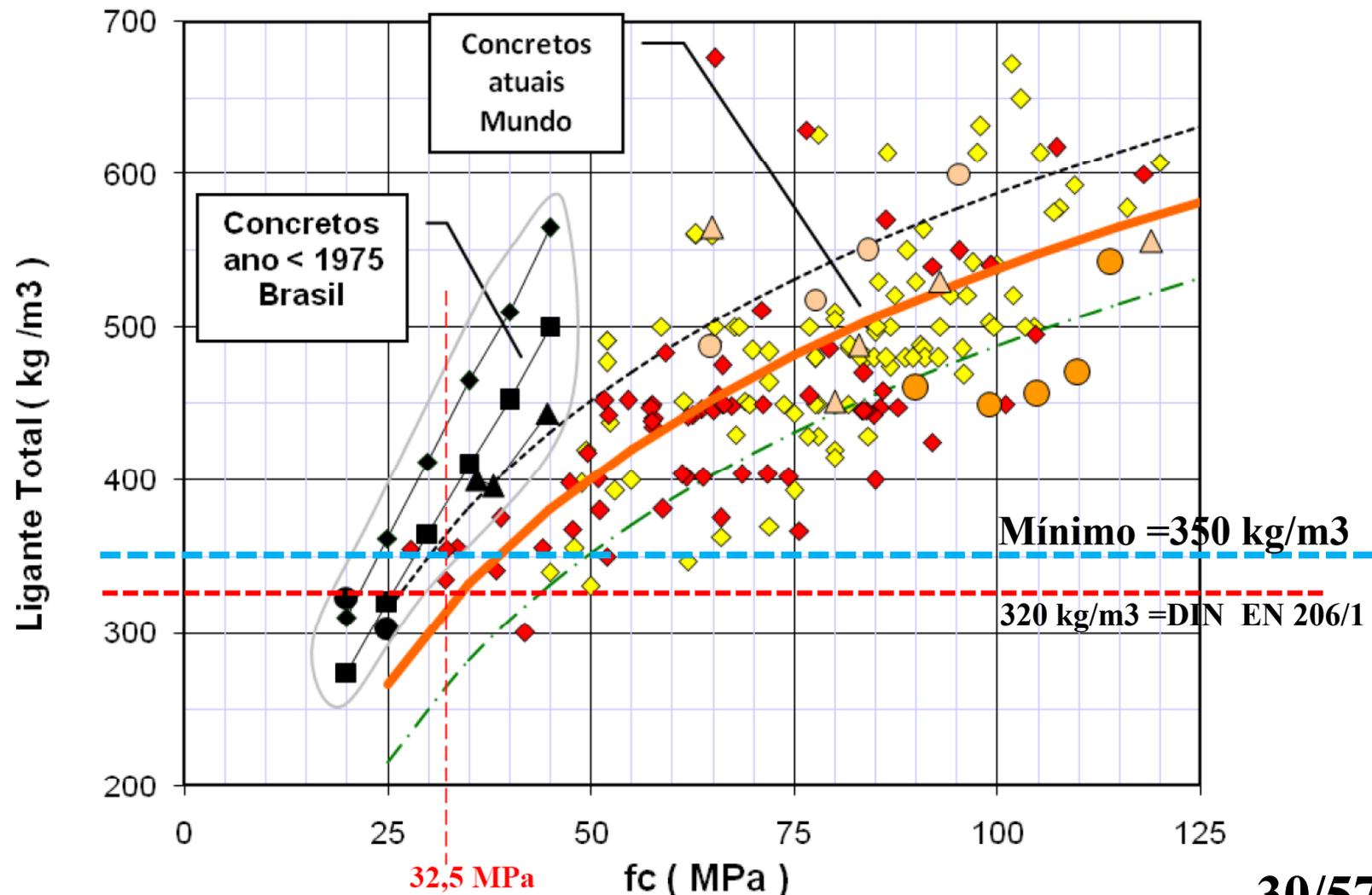
Em 1974 , um concreto com uma resistência de 32,5 MPa requeria um fator água /cimento = 0,50 em 1970. Em 1984 era produzido com água/cimento=0,57

Razão (Água / Ligantes) X Resistência à compressão (f_c).



Adam Neville – Resistência do cimento x Durabilidade

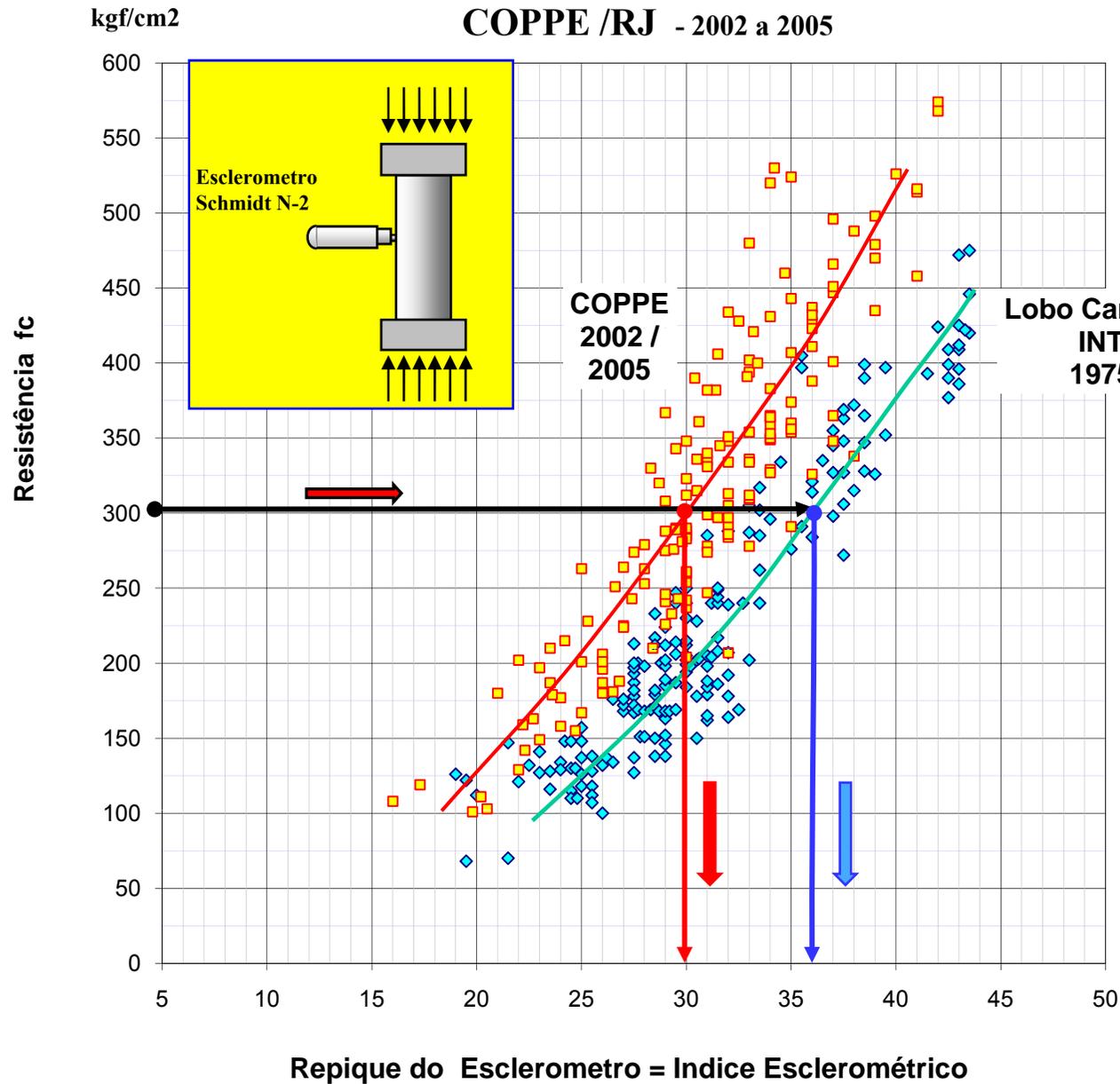
- Supondo que, para que a trabalhabilidade permanecesse a mesma, fosse mantida a mesma quantidade de água, 175 kg/m^3 , seria possível reduzir o teor de cimento de 350 kg/m^3 para 307 kg/m^3 .



Esclerometria - Prof. Lobo Carneiro - INT / RJ - 1975

x

COPPE /RJ - 2002 a 2005



- Segundo a ACI 228,1989,

“a energia do repique do esclerometro está relacionada com a rigidez do concreto”.

- **Maior rigidez maior repique !**

- Os resultados parecem indicar que os concretos de 1975, feitos com o **CP I** (só clínquer + gesso), **eram mais rígidos, mais compactos**, que os concretos atuais.

- Comentário : Para uma mesma resistência f_c , usava-se em 1975 um fator Água/Cimento menor do que hoje em dia.

Adam Neville – Resistência do cimento x Durabilidade

- **Um concreto de hoje, tendo a mesma resistência, aos 28 dias, do que um concreto antigo, pode ser feito com um fator água/cimento maior e um teor de cimento menor.**

“ O concreto atual é um concreto menos durável que o antigo ”

- *Além disso, hoje em dia, não há um crescimento significativo da resistência do concreto após 28 dias, o que elimina a melhoria, no longo prazo, da qualidade das estruturas de concreto, o que garantia antigamente, ao usuário, uma segurança adicional, mesmo quando não considerada no projeto.*

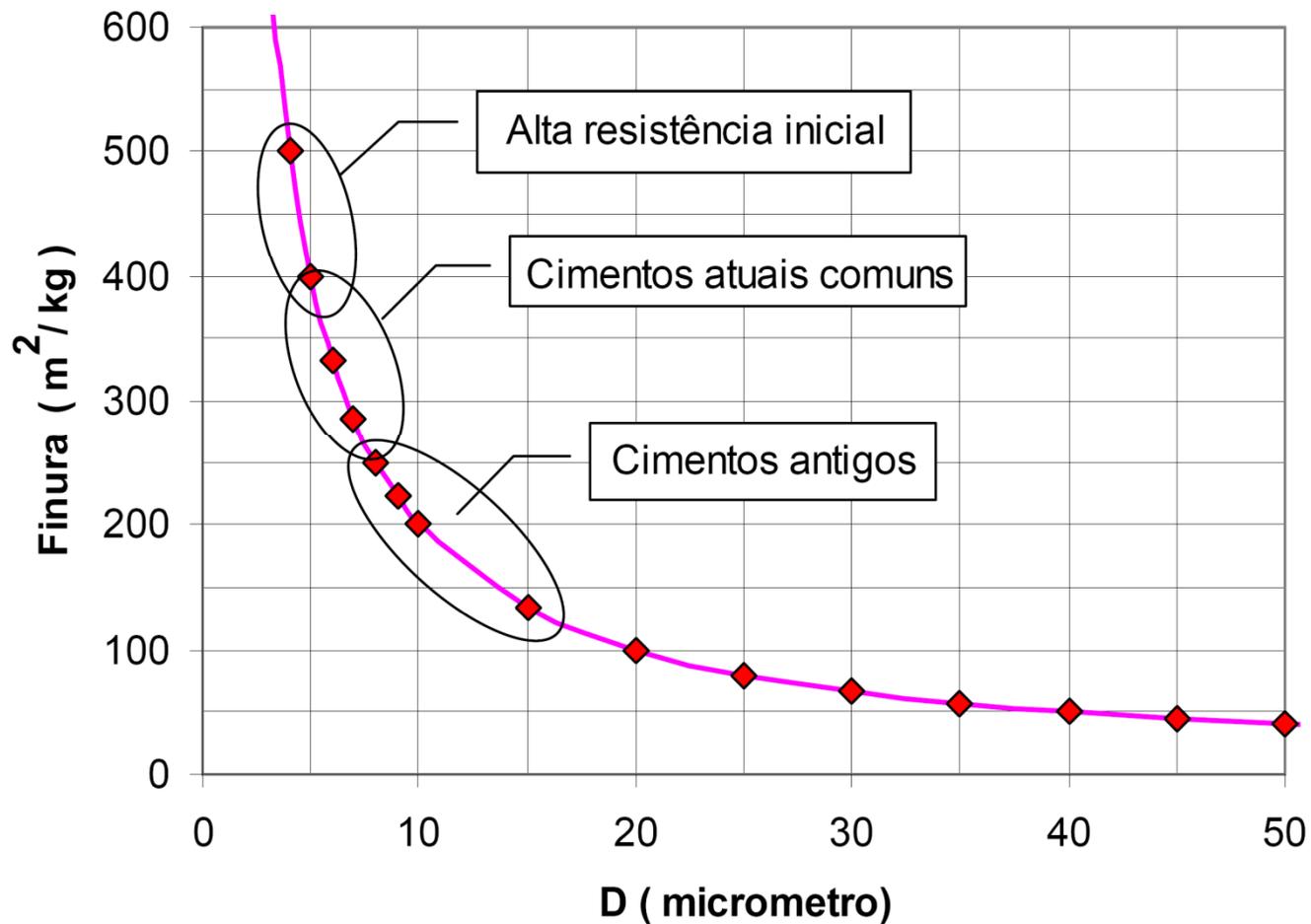
- **O rápido ganho de resistência, dos concretos atuais, permite a remoção mais rápida das formas. Com essa retirada precoce das formas, a cura úmida efetiva cessa numa idade inicial muito baixa do concreto.**

Eng. Navarro Adler / RJ

- **Concordo : “ O concreto de hoje é menos durável que o antigo”.**
- **Tenho obras de mais de 50 anos, com cobrimentos mínimos, em perfeito estado.**
- **Com o advento do CPIII passei a ser chamado para visitas em obras, para constatar a deterioração muito precoce.**
- A nossa Norma 6118R tenta apenas “ *tapar o sol com a peneira* ” impondo recobrimentos exagerados, mesmo para peças internas da edificação (no caso de prédios) , exigindo um maior consumo de concreto.

$$\text{Finura} = \frac{\text{área do grão}}{\text{peso do grão}} = \frac{\pi D^2}{\frac{\pi D^3}{6} \times \gamma_{\text{cimento}}} = \frac{6}{D \times \gamma_{\text{cimento}}}$$

Finura x Tamanho do grão



FINURA do CIMENTO

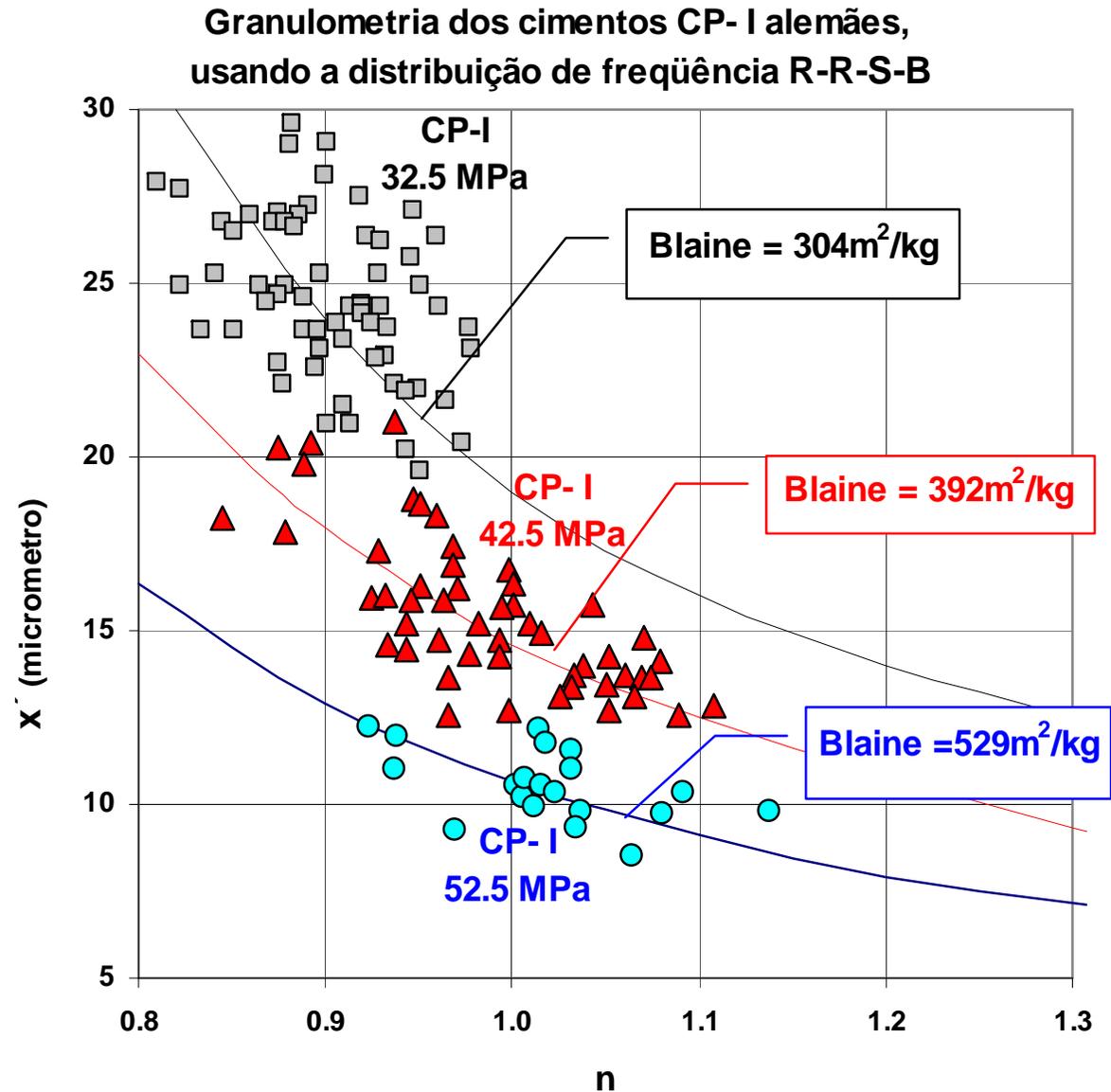
O mesmo clínquer :

moído fino, produz o CP-I 52,5MPa

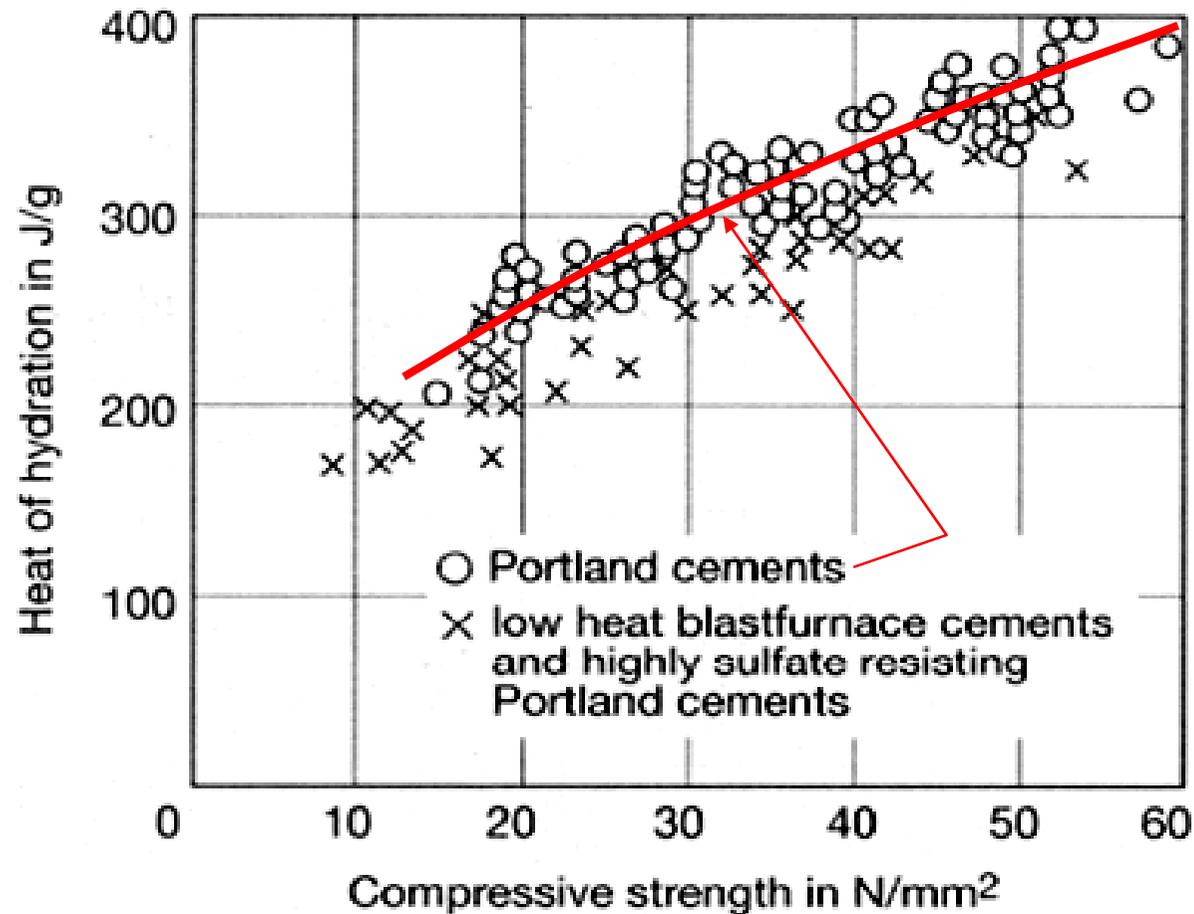
moído grosso, produz o CP-I 32,5MPa

Distribuição RRSB:

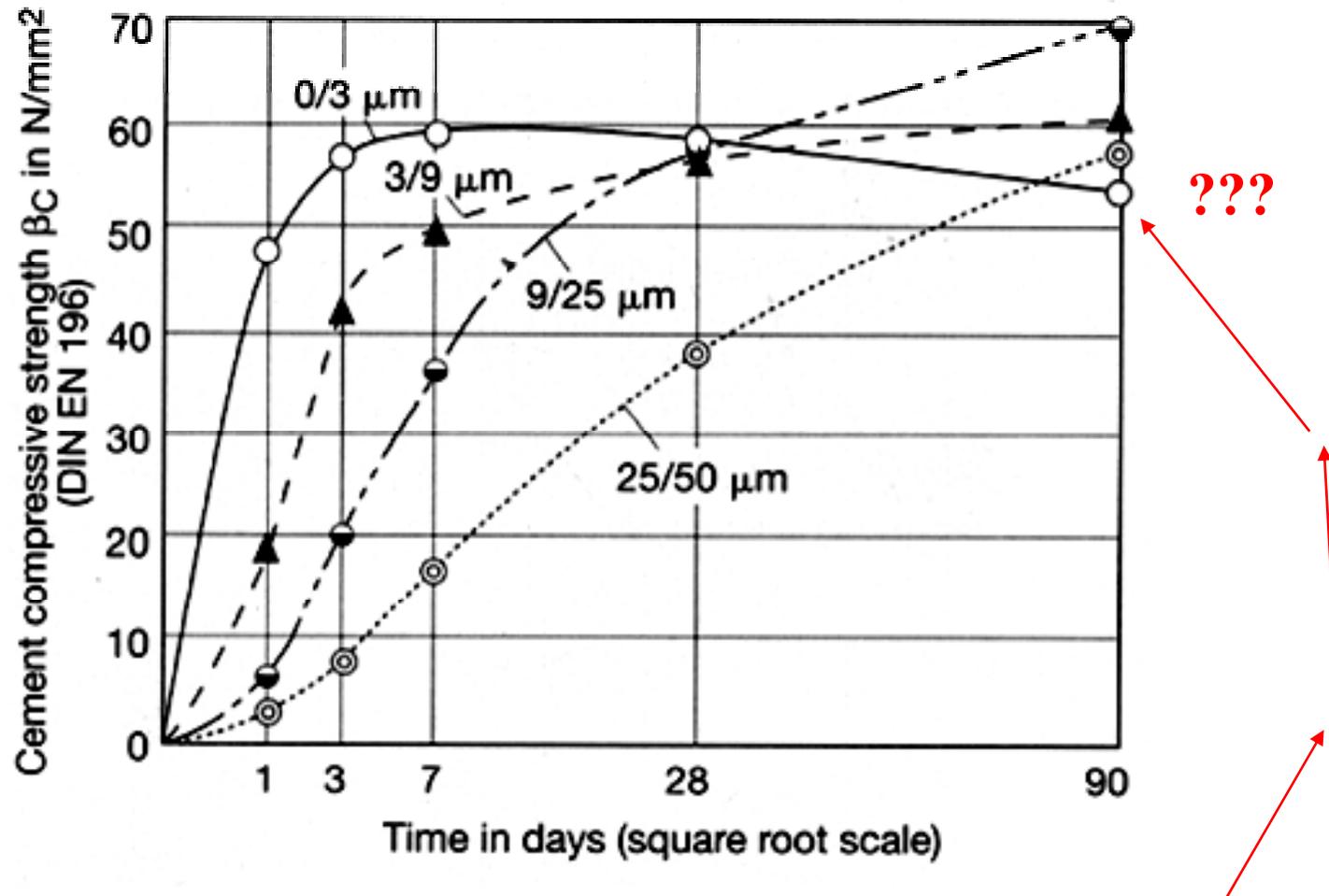
$$Q(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{x'}\right)^n\right]$$



- A hidratação é o fenômeno químico.
- A hidratação libera calor.
- A hidratação gera produtos que endurecem o cimento e aumentam a sua resistência



Quanto mais fino o cimento mais rápido ele se hidrata e ganha resistência, mas ...



O cimento muito fino perde resistência com o tempo !!!

Efeito da Finura na resistência

Quanto mais fino o cimento mais rapidamente ele se hidrata e libera calor.

O cimento antigo, tinha grãos grossos e demorava mais a se hidratar, elevando menos e mais lentamente a temperatura do concreto lançado.

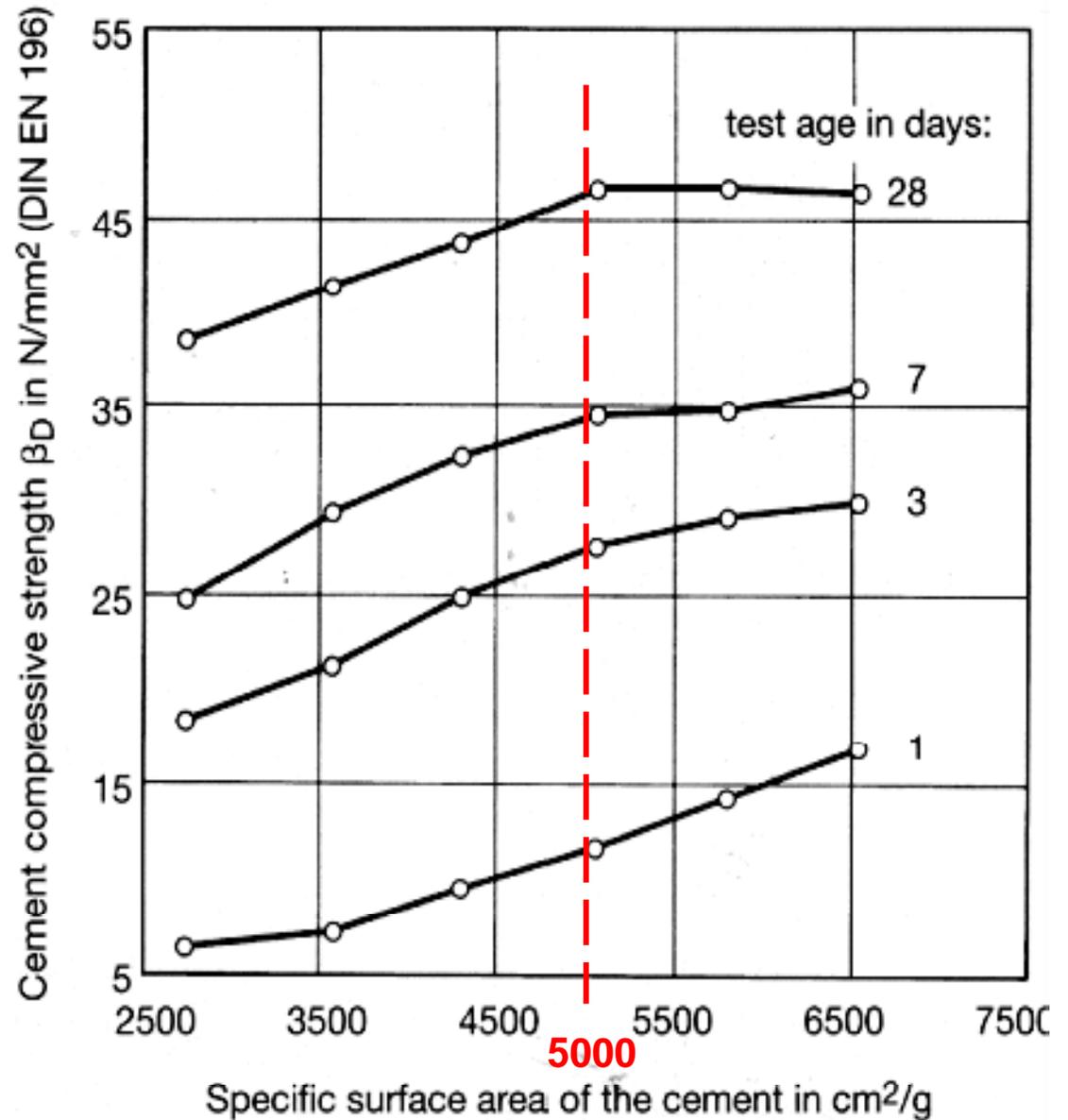
As tensões de tração eram menores.

A finura do cimento era 150 a 200m²/ kg, hoje é 400 a 500m²/ kg,

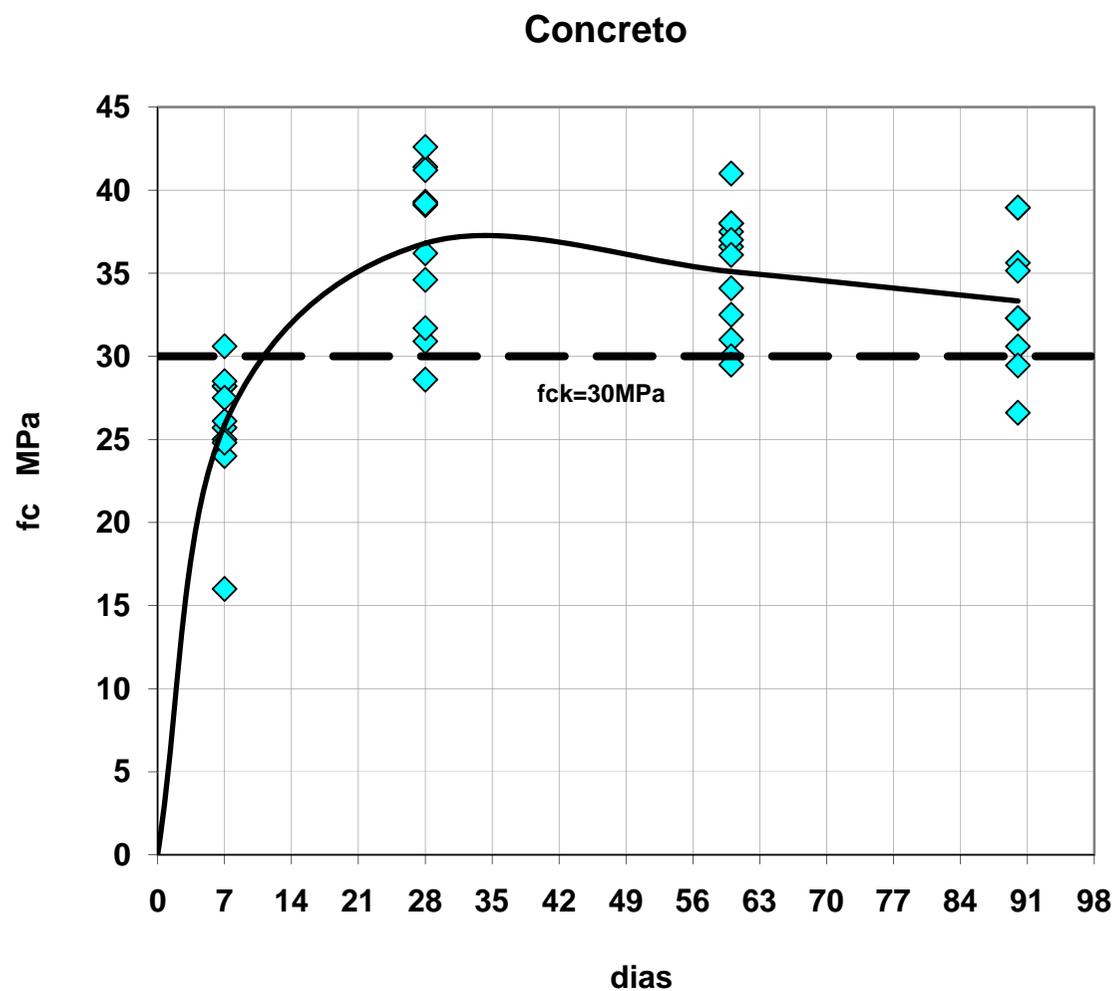
Diminuir o tamanho de grão, aumentando a superfície específica do cimento acima de 5000cm²/g não tem efeito adicional na taxa de crescimento de resistência.

Por esse motivo os cimentos atuais tem no máximo 5000cm²/g.

Moer o clínquer do cimento além desse limite é desperdício de energia e dinheiro.

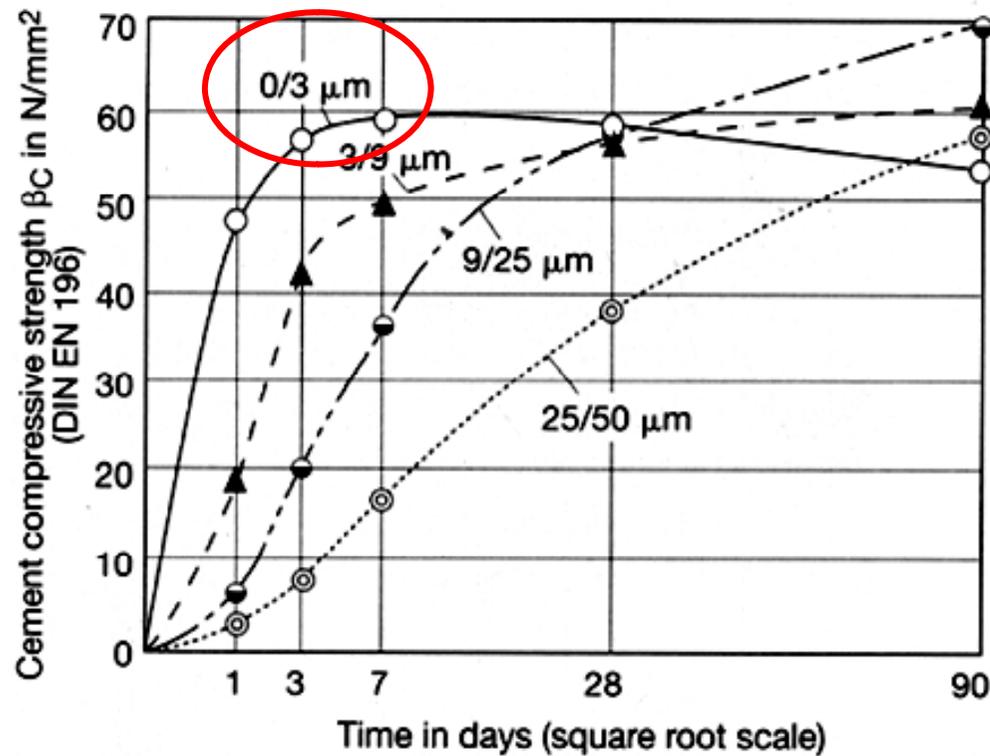


Em obra recente, com excelente controle, após 2 meses observou-se diminuição da resistência dos corpos de prova do concreto .

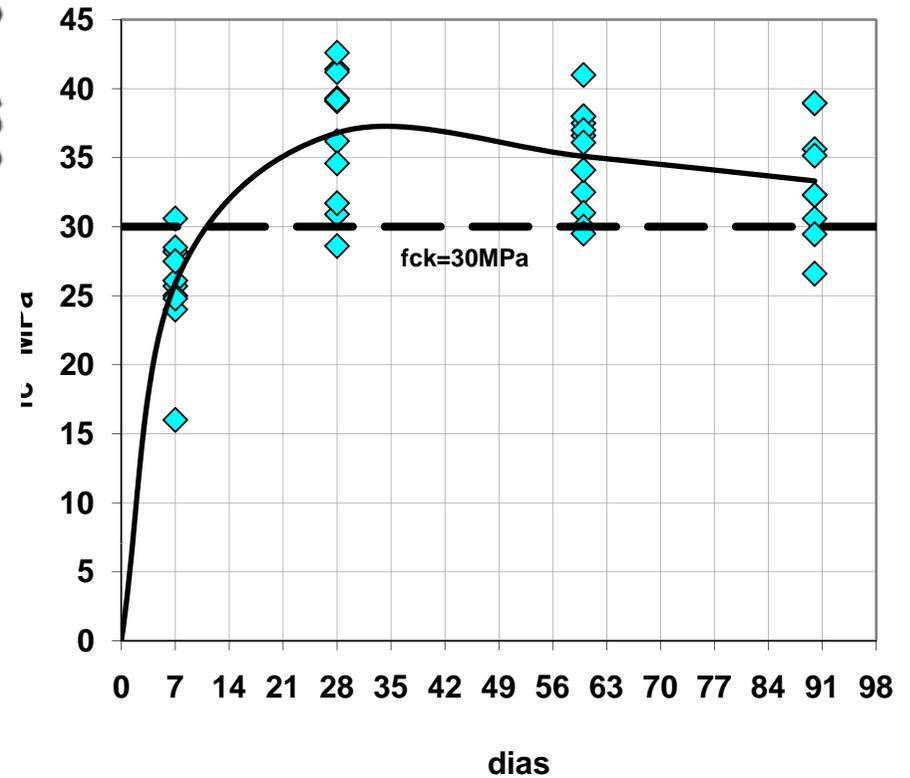


A curva de “Resistência × Tempo” do concreto dessa obra citada é similar à curva do cimento muito fino.

Cimento



Concreto



Fissuração em blocos de estacas

E. Thomaz : Experiência pessoal

- *Há algumas décadas atrás usávamos blocos de estacas com armadura apenas na face inferior e com a ancoragem desses ferros em apenas uma parte das faces laterais.*

- Os blocos, apesar de terem grandes dimensões e um grande volume de concreto, não aqueciam nem fissuravam nas faces sem armadura.

- *Esses problemas surgiram e se agravaram a partir da década de 70.*

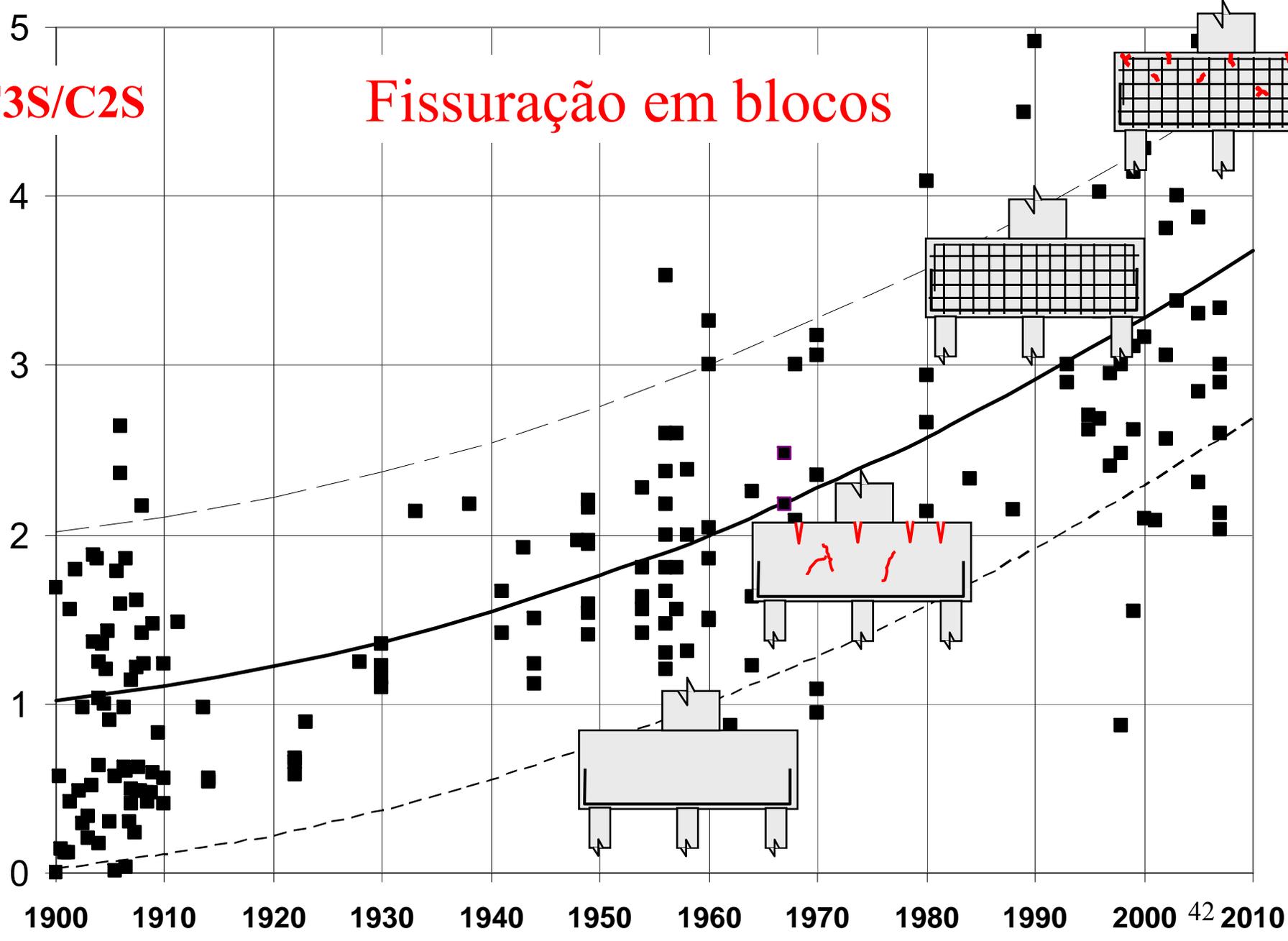
- Hoje em dia, mesmo com armaduras em duas direções e em todas as faces dos blocos, corre-se o risco de ver os blocos cheios de fissuras.

- Em blocos grandes, usa-se concreto resfriado com gelo. Caso contrário ocorrem fissuras, principalmente na *face superior, não protegida pelas formas.*

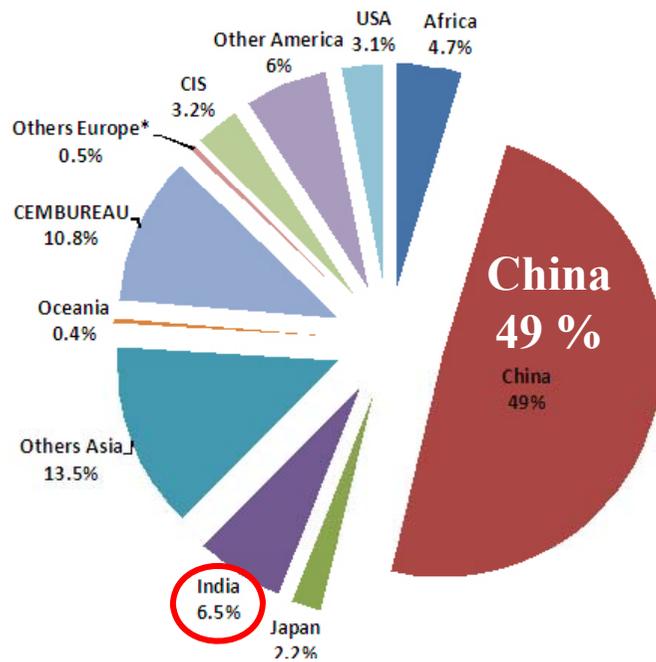
1958 C3S / C2S = 2,0	1975 C3S / C2S = 2,4
1990 C3S / C2S = 2,9	2008 C3S / C2S = 3,6 41

C3S/C2S

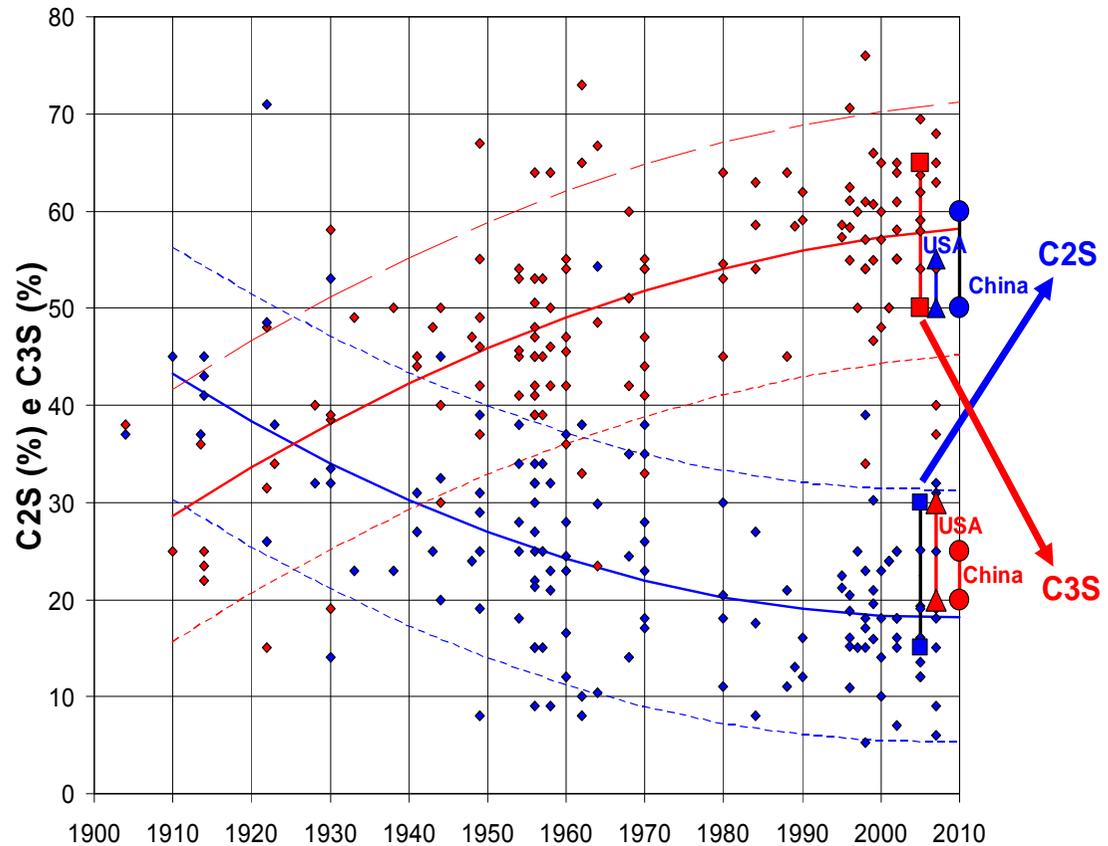
Fissuração em blocos



Cimento Chinês com baixo teor de C3S



Produção mundial de cimento

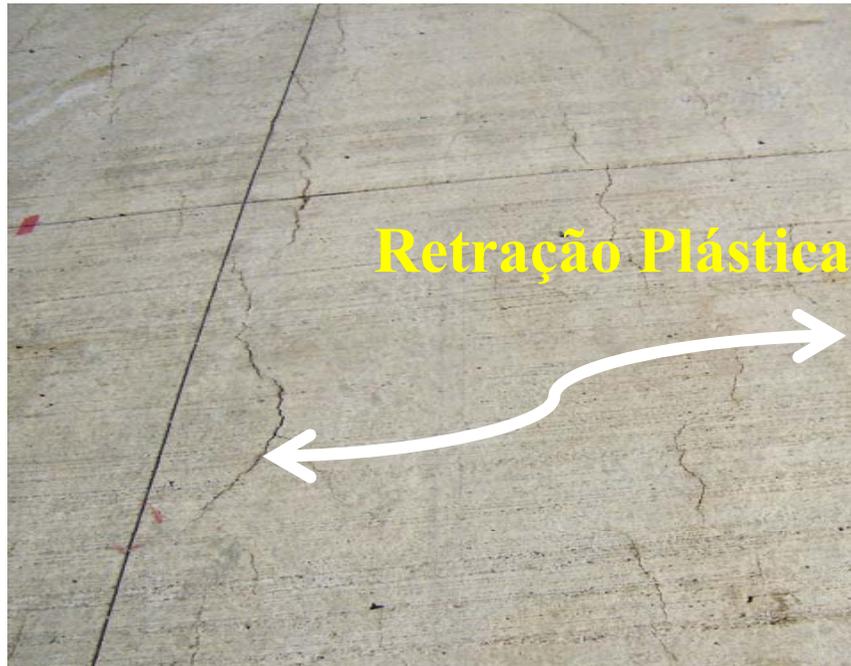


Os pontos mostrados no gráfico com triângulos são os teores de C2S e C3S do cimento IV da ASTM C 150. Esse cimento IV é o cimento de baixo calor de hidratação nos USA. É pouco usado. Demora.

Verifica-se que o *novo cimento chinês*, mostrado com círculos, é semelhante ao cimento americano de baixo calor de hidratação.

Importante : O report on *Early Age Cracking* - January **2010**, do comitê ACI₄₃₁ recomenda diminuir o C3S e aumentar o C2S !

Pavimentos de concreto nas rodovias são sensíveis à alta temperatura de lançamento, ao resfriamento rápido, à secagem rápida e à má cura.



Chemical Admixtures

Plastic Shrinkage Cracking

- ∞ When the bleed water does not compensate the water loss due to evaporation, shrinkage occurs.
- ∞ When plastic shrinkage is restrained, surface cracking occurs.
- ∞ Elements and structures with high surface/volume ratios, such as pavements, tunnel linings and bridge decks, are prone to cracking.

P.K.Mehta and P.J.Monteiro,
Concrete: Microstructure, Properties, and Materials

Atenção :

- Como a **escória** só reage lentamente, se não houver uma cura prolongada, **com água**, a resistência do concreto, feito com cimentos tipo **CPII** e **CPIII**, será baixa, pois não haverá a hidratação completa da escória do cimento e a porosidade do concreto será grande.

(Ver Zement-Taschenbuch **2008**)

- Cimentos com **escória** são eficazes em reduzir as deformações térmicas, **mas** esse benefício é perdido pela falta de resistência à tração nas primeiras horas. (Ver ACI -231R -10 Report on Early Age Cracking - January **2010**)

Sugestão aos construtores :

*Para usar os cimentos atuais, com alto teor de C3S, é necessário usar uma tecnologia de execução mais sofisticada, como o **resfriamento dos concretos, antes do lançamento nas formas.***

Alemanha : *Nos concretos das Auto-estradas é **praxe** o resfriamento prévio do concreto.*

India : *No **verão** não se constroem estradas de concreto devido à alta temperatura.*

Sugestão aos construtores :

*Impedir o **resfriamento** e o **ressecamento** rápidos do concreto, protegendo a superfície com mantas ou esteira de palha encharcada.*



Manter úmida a superfície do concreto !

Como a **escória** só reage lentamente, se não houver uma cura prolongada, **com água**, a resistência do concreto, feito com cimentos tipo **CPII** e **CPIII** , será baixa.

Em **pavimentos de estradas** a cura **com água**, deve ser mantida até que a resistência do concreto atinja **70 % fck** . ***Corpos de Prova junto ao pavimento !***

Sugestão aos fabricantes dos cimentos :

ACI 231R-2010 – Early-Age Cracking : Causes , Measurements, Mitigation

- **Diminuir o teor de C3S !** ACI 231R-2010
- **Aumentar o teor de C2S !** ACI 231R-2010
- **Usar cimentos com grãos mais grossos !!** ACI 231R-2010

E.Thomaz : Apresentar nos sacos de cimentos as características que interessam aos engenheiros construtores e projetistas .

- *Apresentar o teor de escória. Composição da escória*

Componente	C3S	C2S	C3A	C4AF	Cloro	SO4	MgO	CaO livre
Teor %	55	21	10	11	0,01	1.2	1.1	0.6

Início de pega	Fim de pega	Finura (m ² / kg)	Idade				
			3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	
2h 20min ± 15min	4h 20min ± 15min	300	Resistência à compressão MPa	30	40	50	58
			Calor de hidratação J/g	170	230	280	320

Um bom motivo: *Para projetar um pavimento de concreto, de modo a não haver fissuras nas primeiras idades, é necessário conhecer o cimento !* 46

**Pavimento de concreto
Programa HIPERPAV
Federal Highway Administration**

File Edit View Strategy Tools Help

Project Info Strategies

EA JPCP Cement

Strategy	Status
New Strategy 1	Modified

Strategy Information

- Design
 - Geometry
 - Dowels
 - Slab Support
- Materials and Mix Design
 - Cement**
 - PCC Mix
 - PCC Properties
 - Maturity Data
- Construction
- Environment
- Analysis
- Evaporation Rate Analysis

**INPUT
Cimento**

ACI 231R-2010

Para projetar um pavimento em concreto é necessário conhecer o cimento a usar

Cement Definition

ASTM Cement Type Classification:
Type I

User-Defined Oxides
This option is not intended for use with Blended Cements. Blended Cements may be specified through user-defined mixture proportions of the blended mineral admixtures.

User-Defined Bogue Compounds

Compound	Content (%)
Alite (C3S)	48.7
Belite (C2S)	24.8
Aluminate (C3A)	11.9
Ferrite (C4AF)	8.0
Magnesia (MgO)	2.4
(SO4)	2.9
Free Lime (Free CaO)	0.8
Other	0.5
Total	100

Blaine Fineness Index

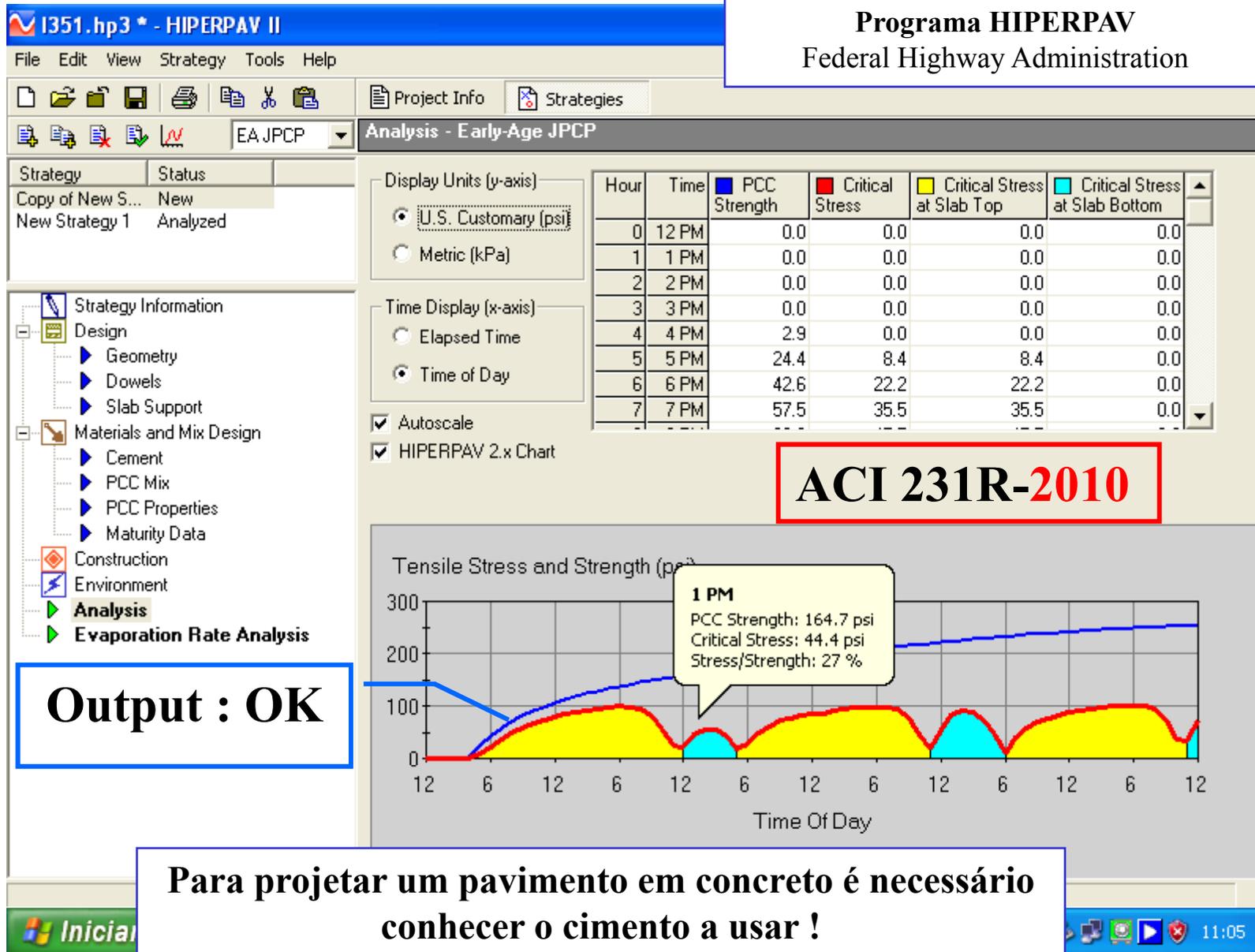
Estimate from Cement Type

User-Defined

381 m²/kg

Windows Taskbar: Iniciar, Terra Mail - Caixa de ..., IBRACON 2008 Final, Untitled * - HIPERPAV II, PT, 10:47

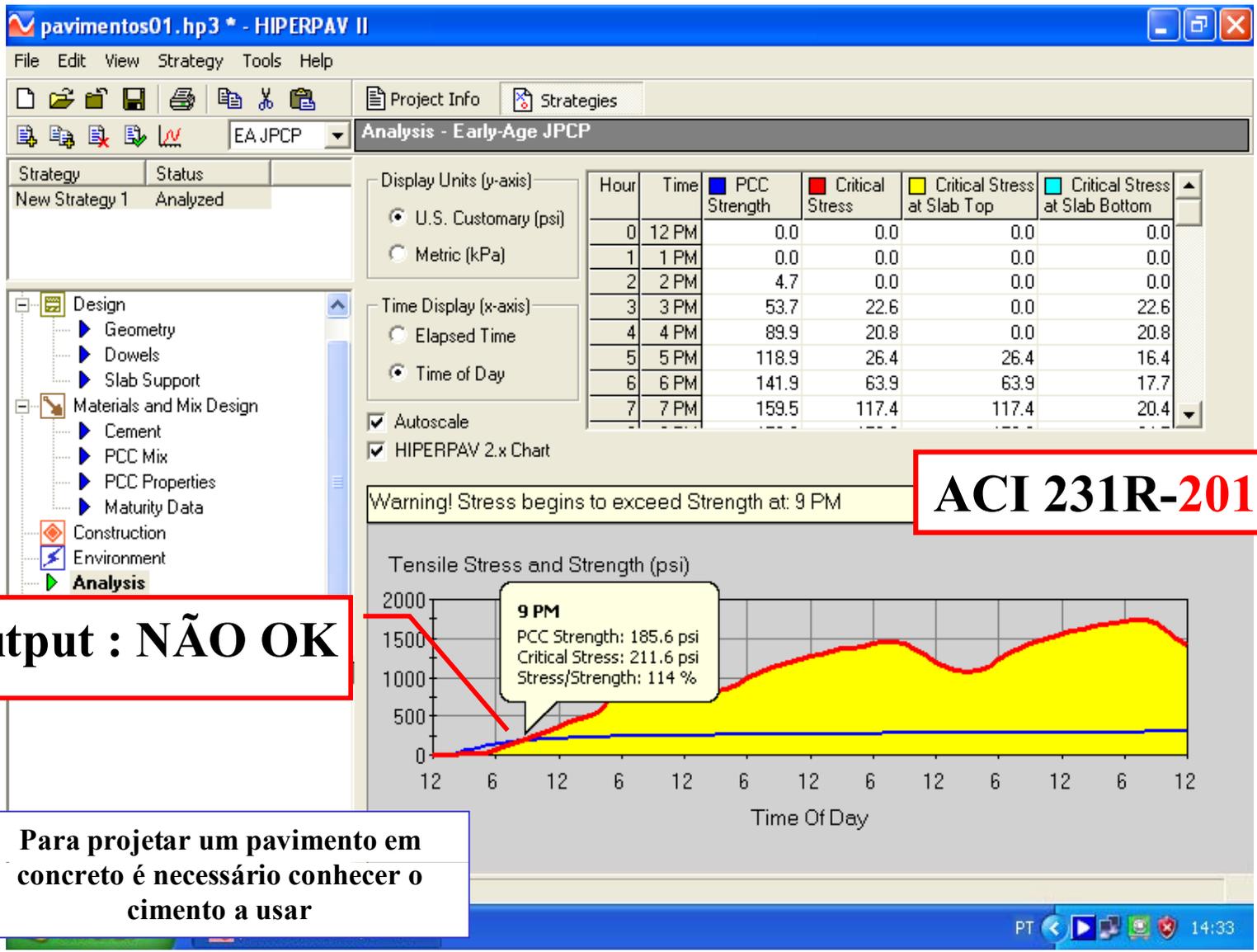
Pavimento de concreto
Programa HIPERPAV
 Federal Highway Administration



ACI 231R-2010

Output : OK

**Para projetar um pavimento em concreto é necessário
 conhecer o cimento a usar !**



**Tensão atuante maior que a resistência à tração !
Cortar as juntas antes !**

Sugestão complementar para normalização dos cimentos :

- *Apresentar nos sacos de cimentos, ou em “bulas” que acompanhem o produto, as características que interessam aos engenheiros construtores e projetistas .*

- **Exemplo :**

Componente	C3S	C2S	C3A	C4AF	Cloro	SO4	MgO	CaO livre
Teor %	55	21	10	11	0,01	1.2	1.1	0.6

Início de pega	Fim de pega	Finura (m²/ kg)
2h 20min ± 15min	4h 20min ± 15min	300

*Em **negrito** os informes recebidos de uma empresa. (números fictícios)*

<i>Idade</i>	<i>3 dias</i>	<i>7 dias</i>	<i>28 dias</i>	<i>90 dias</i>
Resistência à compressão MPa	30	40	50	58
Calor de hidratação J/g	<i>170</i>	<i>230</i>	<i>280</i>	<i>320</i>

Nos USA só existem cimentos de clínquer puro (e gesso), sem escoria, sem fly ash , sem tudo.... Perfazem 92% do total fabricado . Ver link [88].

Os cimentos são só de clínquer (e gesso) e quem quiser que coloque escoria de alto forno, cinzas volantes, micro-sílica ... a seu bel prazer.

4. Types of Portland Cement, 4.3 Type I

ASTM C 150 Type I Portland Cement

- General use
- Ready-mix is biggest customer
- Most common (more than 90% of cement used is Type I or II)



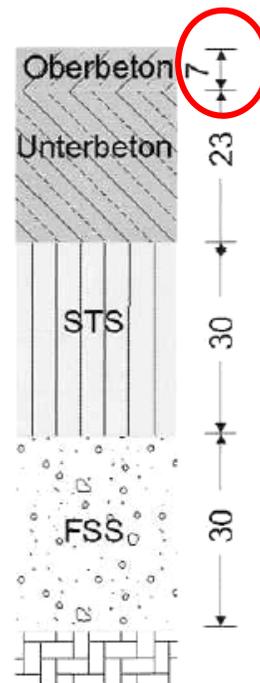
- Nos **USA** , 80 % da produção de cimento é feita por fábricas de cimento estrangeiras/ internacionais. Ver link [87].
- Elas fabricam, nos USA, cimentos só com clínquer. **CPI e CPII**. Ver link [88].
- Essas empresas também estão aqui no Brasil e não fabricam o cimento **CP I** Ver [90].
- Aqui, no Brasil, essas mesmas empresas, praticamente só fabricam cimentos com escoria. **CP II e CP III** Ver [90]
- **No Brasil não se fabrica mais o cimento CPI (só clínquer puro)**. Ver [90]
- **Nos USA esses cimentos perfazem 92% do total produzido**. Ver link [88].

Betonfahrbahndecken

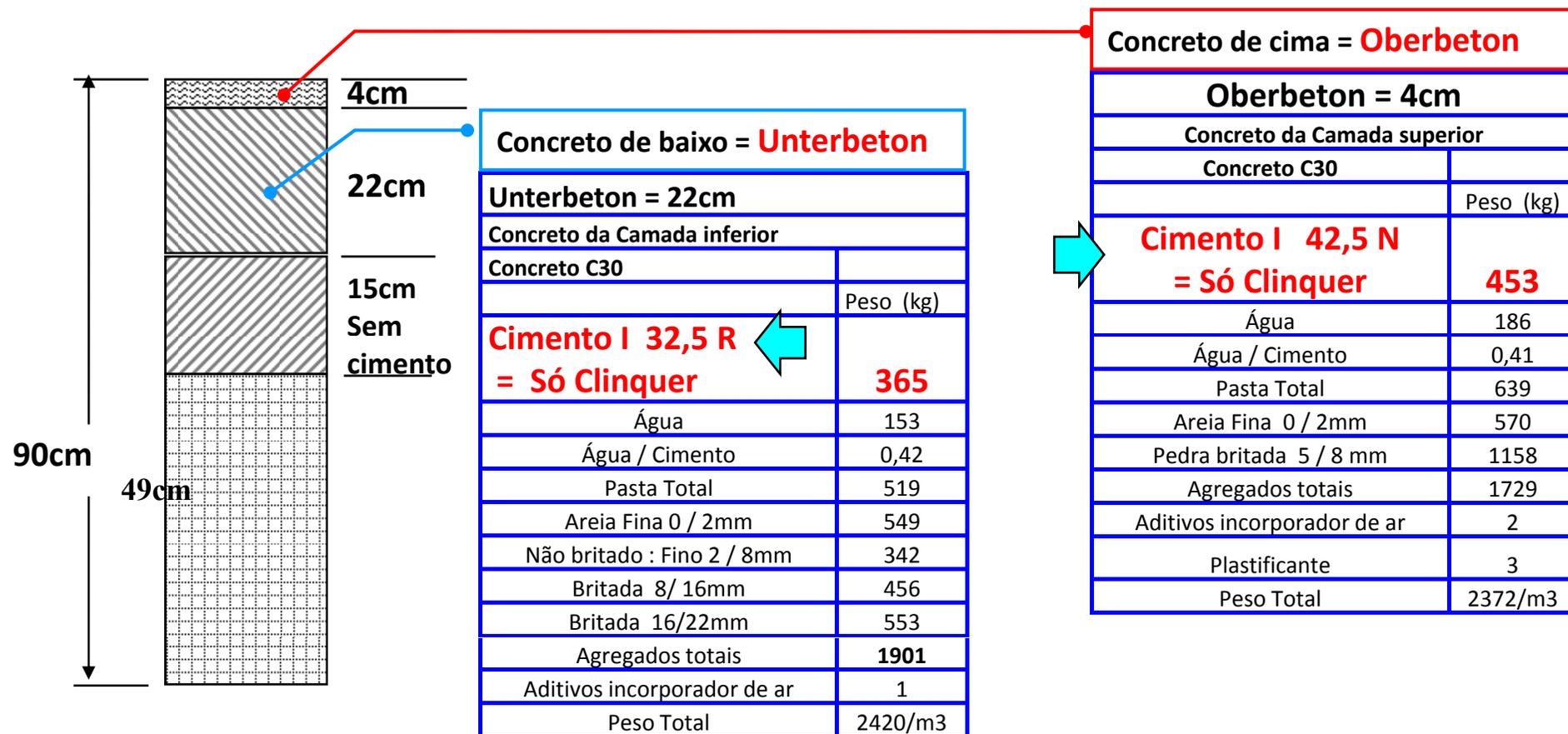
Auto-estradas Alemãs em Concreto

MODERNER BETONSTRABENBAU IN DEUTSCHLAND

Dr.-Ing. Walter Fleischer



Auto-estradas Alemães - 2009



- Cimento deve ser o **CEM I 32,5 ou 42,5 só clinquer**. (ZTV) Outro cimento só com prévia autorização.
- Só com ensaios de aderência (pneu ↔ concreto), ruído, abrasão, resistência à compressão, durabilidade, a autorização pode ser concedida. (ZTV)
- A empreiteira é a responsável pela manutenção da pista, durante prazo fixado em contrato.(ZTV)
- O concreto deve **ser resfriado** antes do lançamento. (Breitenbücher)
- **A cura deve ser demorada para que a permeabilidade seja mínima.** (Breitenbücher)
- O corte das juntas deve ser feito logo que possível (Breitenbücher)

Exigências das normas alemãs DIN EN 197-1 ou DIN 1164-10 para cimentos de concretos para Auto-Estradas .

- Só Usar Cimento **CEM I 32,5 MPa** ou **CEM I 42,5 = Só Clinquer + Gesso (ZTV)**
- Para cimentos que não sejam **CEM I** é necessária uma **autorização** específica do Contrante, baseada em comprovações experimentais (Zulassung).

CEM I 32,5 MPa : Limitação indireta do calor de hidratação nas primeiras horas :

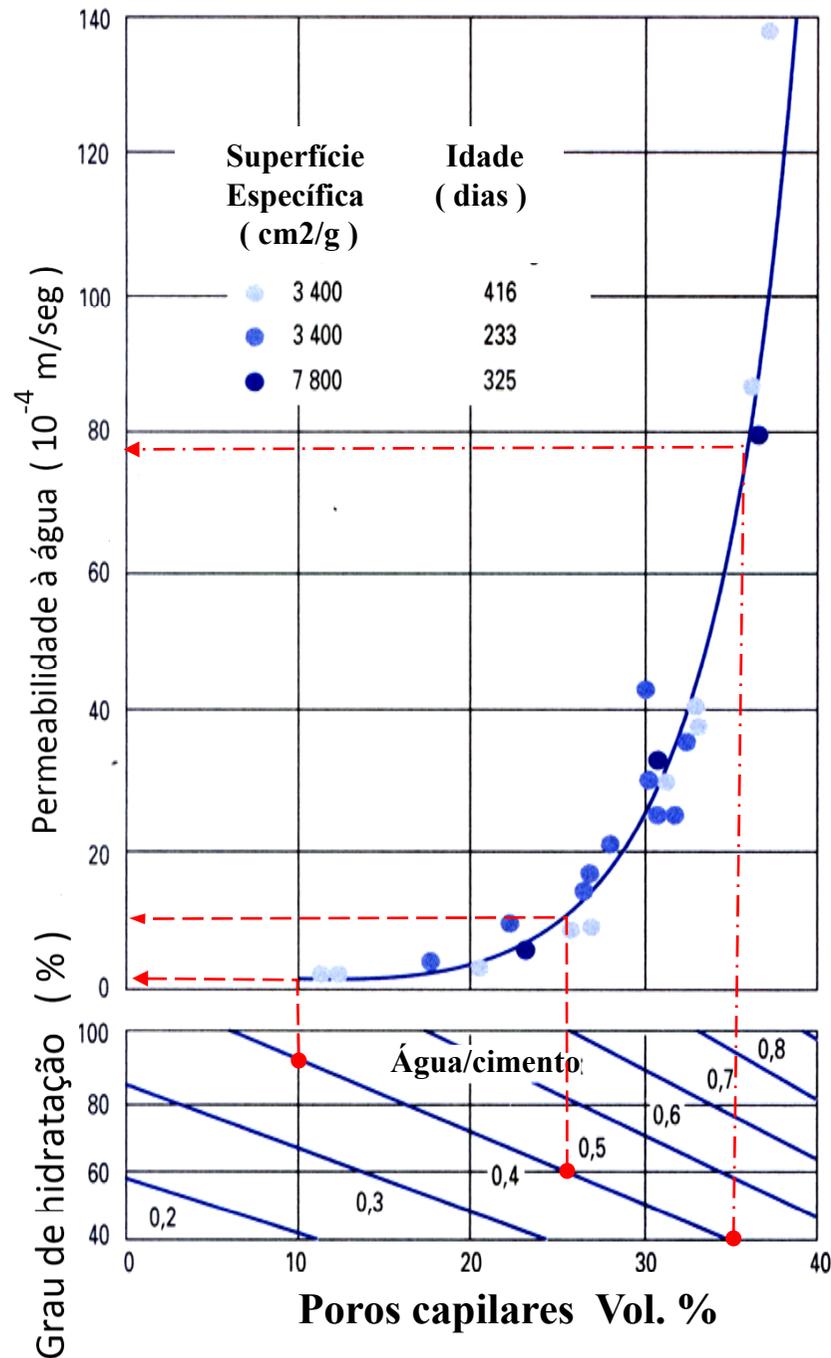
- Na_2O -Equivalente [Massa %] = Na_2O (sódio) + 0,658 K_2O (potássio) \leq **0,80 %**
- Água de molhagem \leq **28,0 Massa %**.....[CEM I estradas : 25,0 %]
- **fc.2dias** : Resistência à compressão \leq **29,0 MPa**.....[CEM I estradas : 22 MPa]
- **fc.28dias** : Resistência à compressão $>$ **32,5,0 MPa**.....[CEM I estradas : 49 MPa]
- Superfície específica Blaine \leq **3500 cm²/g**[CEM I estradas : 2880 cm²/g]

OBSERVAÇÃO:

BRASIL :

CPII-E = Escoria até 34 % tem **3846 cm²/g**[CEM II=3160 cm²/g]

CP III = Escoria até 70 % tem **3819 cm²/g**[CEM III=3650 cm²/g]



Permeabilidade à água

da pasta endurecida de cimento
em função da porosidade capilar
(Água/cimento × Grau de hidratação)

CURA :

Como a **escória** só reage lentamente, se não houver uma cura prolongada, **com água**, não haverá a hidratação completa da escória do cimento. A resistência do concreto feito com cimentos tipo **CPII** e **CPIII**, será baixa e a porosidade do concreto será grande.

CURA :

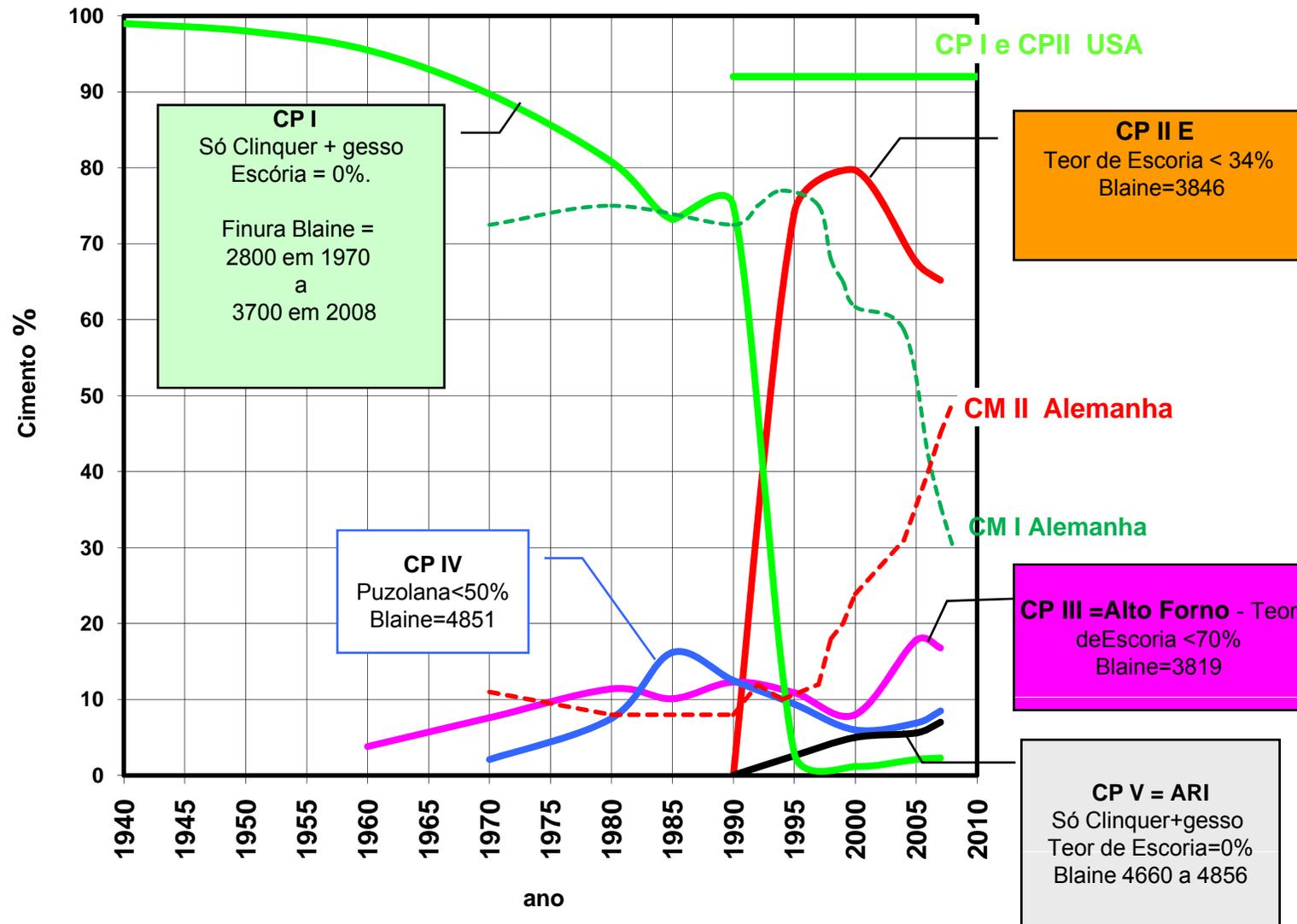
A cura de obras em geral deve ser mantida até que a resistência do concreto atinja **50 % fck**
Corpos de Prova junto à estrutura e com a mesma cura .

CURA :

Em pavimentos de estradas e de pisos industriais a cura **com água**, deve ser mantida até que a resistência do concreto atinja **70 % fck**. *Corpos de Prova junto ao pavimento e com a mesma cura .*

Ver *Zement-Taschenbuch 2008 pag. 473* 55

Produção de Cimento no Brasil , Alemanha e USA (%)

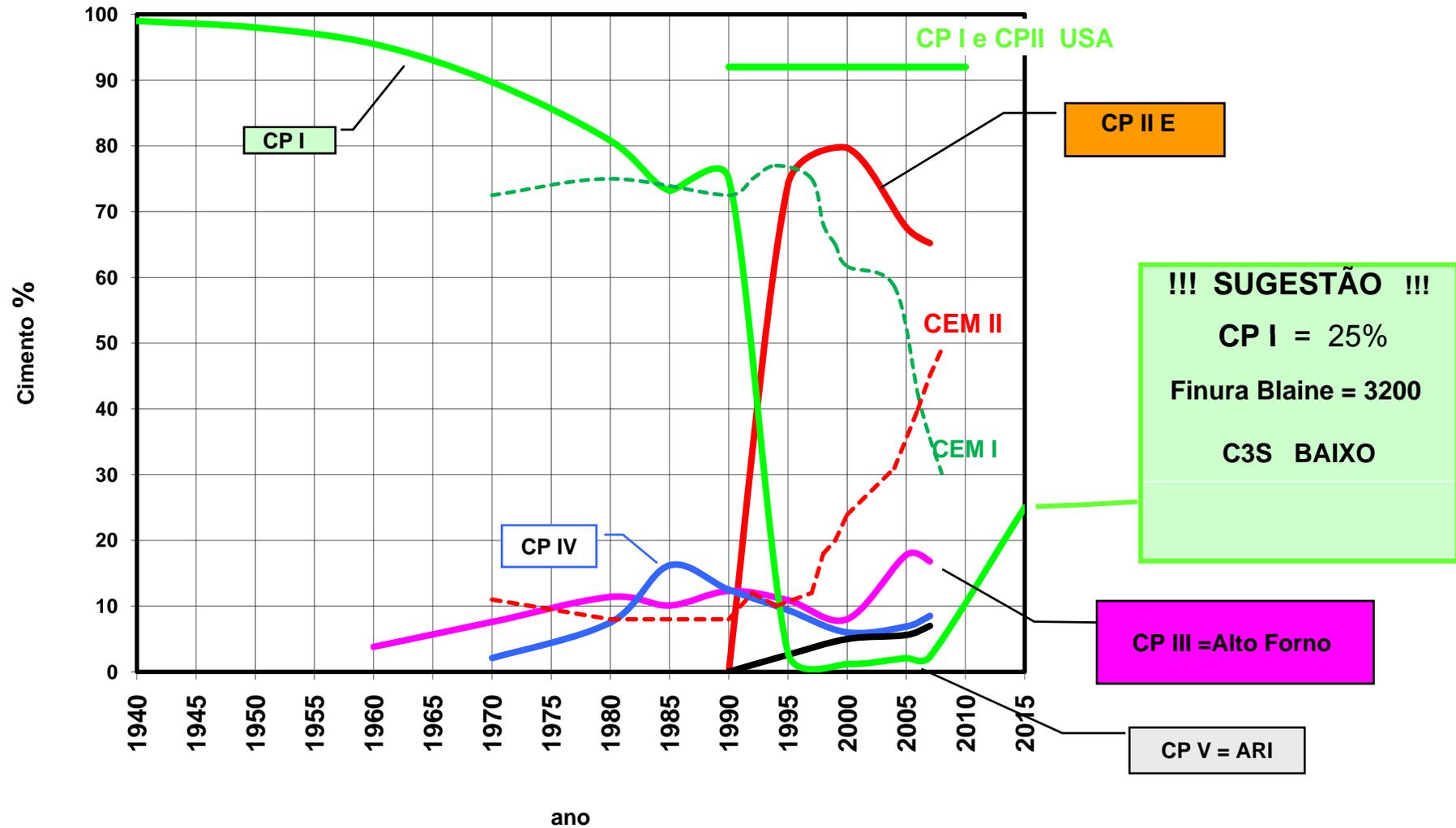


Comentário extra : Na Alemanha :

- Pavimento de estradas com cimentos CEM I (só cliquer + gesso)- ZTV-2001.
- Injeção de bainhas de cabos de protensão só com cimentos CEM I (DIN – EN 447).

Ver Zement Taschenbuch - 2008 pag 600 .

Produção de Cimento no Brasil , Alemanha e USA (%)



Sugestão : Voltar a produzir o cimento CP I com algumas características fundamentais:
 Finura Blaine $\approx 3200 \text{ cm}^2/\text{g}$; Baixo teor de C3S ; Baixa Taxa de Liberação do Calor de Hidratação nos primeiros 3 dias.