



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:

1. *A estrutura de concreto fissa.*
2. *O projetista é acusado de não ter projetado armadura suficiente.*
3. *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?*
4. *A firma concreteira logo apresenta os resultados dos corpos de prova comprovando a resistência do concreto, satisfazendo o fck 28 do projeto.*
5. *A firma cimenteira comprova que o seu cimento satisfaz às exigências das normas*
6. *Todos certos?*
7. *...*
8. *O proprietário da obra exige correção das falhas. Sem custos.*
9. *Todos reclamam e ninguém quer arcar com os custos.*
10. *A questão acaba na justiça. A justiça julga baseada na norma.*
11. *Mas, o que diz a norma ?*

...

...

12. *O cimento do concreto da sua obra, é bom?*
13. *É Você quem escolhe? Você sabe escolher?*
14. *Você tem todas as informações sobre os cimentos disponíveis?*
15. *Você tem todas as opções de escolha que Você gostaria de ter?*
16. *Você só se interessa pelo fck aos 28 dias ?*

...

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

A seguir um resumo.



Resumo das opiniões de diversos autores.

1. *“Comparando com os concretos antigos, os concretos modernos tendem a fissurar mais facilmente, devido à sua menor fluência (deformação lenta) e à maior retração térmica, à maior retração por secagem e ao maior módulo de elasticidade. 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”.

...

2. *“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”

...

3. *“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”.

...

4. *“Muitos cimentos, que são considerados comuns hoje em dia, eram considerados de endurecimento rápido poucas décadas atrás”.*

...

5. *“A prática das construções não acompanhou as mudanças ocorridas no cimento. Os cimentos atuais, muito finos e com alto teor de C3S e C3A, liberam calor muito rápido, e o concreto fica muito aquecido. Quando o concreto resfria rapidamente, fissura.”*

...

6. *“Deveriam ser fixadas as propriedades finais, obtidas com cada cimento, como:*

- *Início e fim de pega com faixas estreitas de tempo.*
- *Variação da taxa de liberação de calor de hidratação ao longo do tempo.*
- *Resistência aos 7 dias e aos 28 dias.*
- *Valor mínimo da relação ($f_{c90\text{dias}} / f_{c28\text{dias}}$) etc... ”*

...

7. *“Ou mudam os cimentos, ou mudam os métodos de execução das obras, ou as obras continuarão a se deteriorar”.*

8 – No final desse trabalho, pagina 51, as mais recentes opiniões dos engenheiros brasileiros.. .



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

1. Informação básica.

O cimento Portland tem 4 componentes principais:

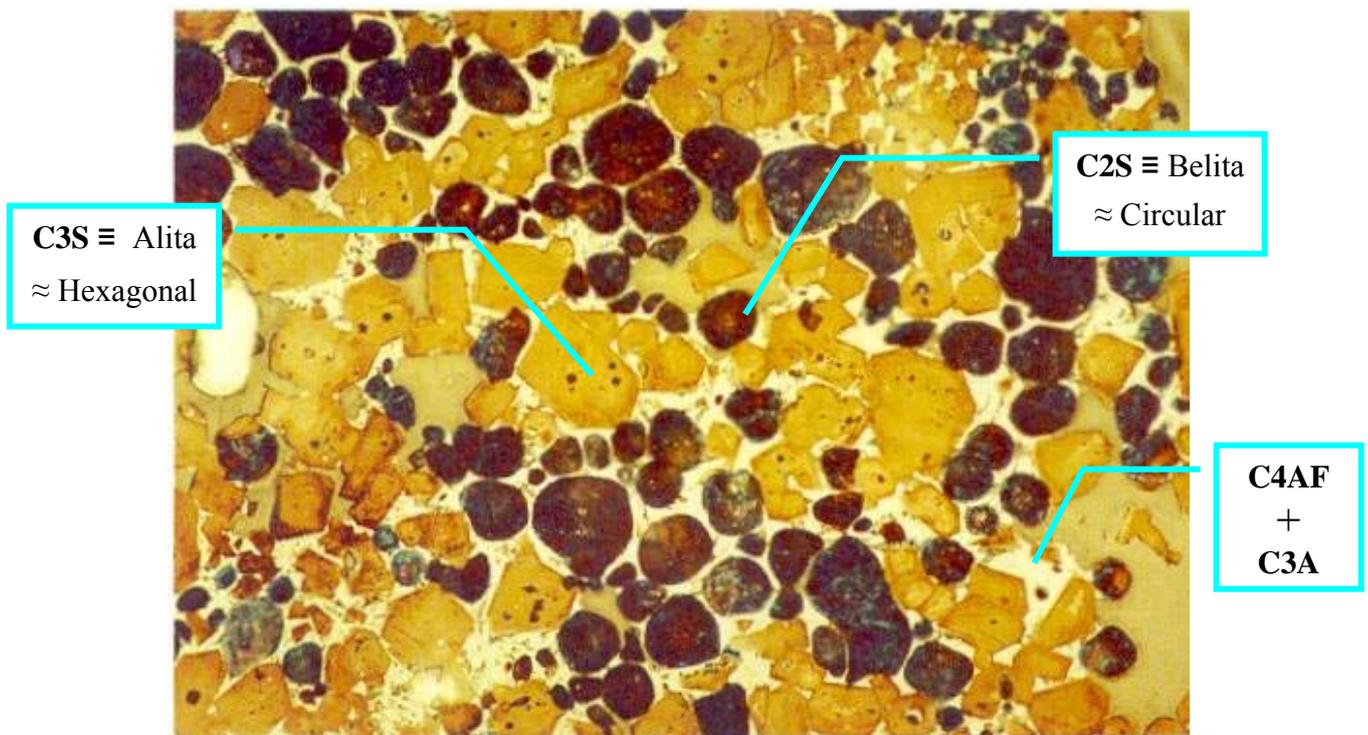
C3S = (3.CaO). (SiO₂) ; **C2S** = (2.CaO). (SiO₂) ;

C4AF = (4.CaO).(Al₂O₃).(Fe₂O₃) ; **C3A** = (3CaO).(Al₂O₃)

Terminologia usual:

C = CaO A = Al₂O₃ S = SiO₂ H = H₂O F = Fe₂O₃

Clinquer do Cimento Portland segundo Lea's Chemistry of Cement Ver [41].



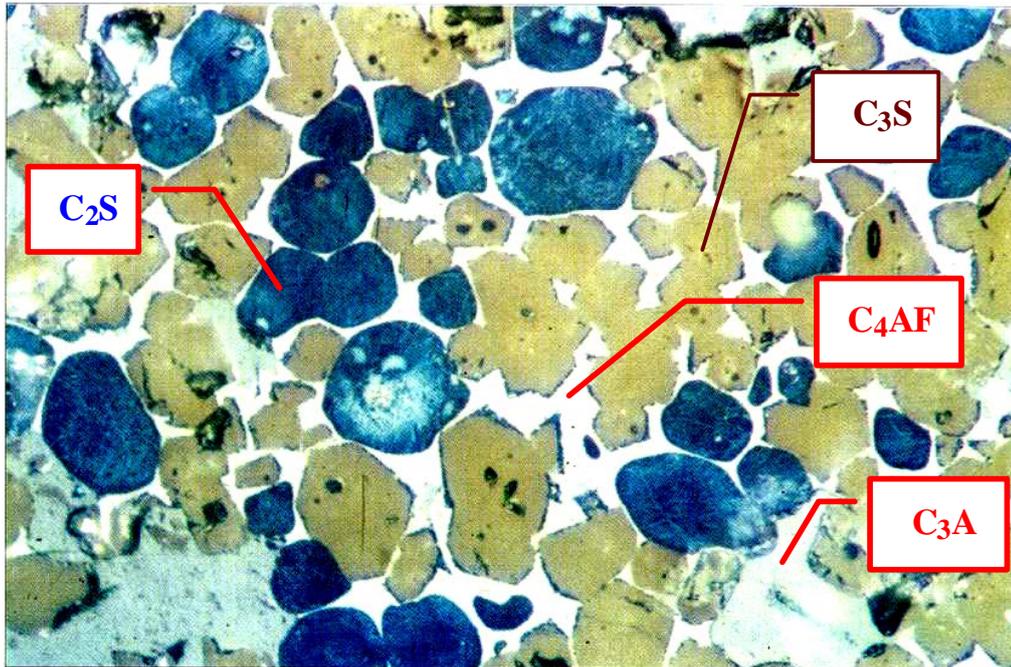
Micrografia ótica, luz refletida, do clínquer do cimento Portland não hidratado. Ver [41].

1. *Largura do campo da figura: 0,19 mm = 190 μm (≈ espessura de 2 folhas de papel)*
2. *Os cristais amarelados, mostrando forma hexagonal, são C3S (Alita).*
3. *Os cristais marrons, escuros e arredondados, são C2S (Belita).*
4. *A massa entre os grãos de C3S e C2S é composta de ferrita C4AF e de C3A*
5. *Pode-se observar a predominância dos cristais de C3S(Alita).*
6. *O segundo componente mais freqüente são os cristais de C2S (Belita).*



2. Informação básica.

Clinker do Cimento Portland segundo Donald. A. St John – 1998 Ver [19]



Micrografia ótica do clínquer do cimento Portland (não hidratado).

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

Castanho = C3S = Alita

Azul = C2S=Belita

A matriz é composta de:

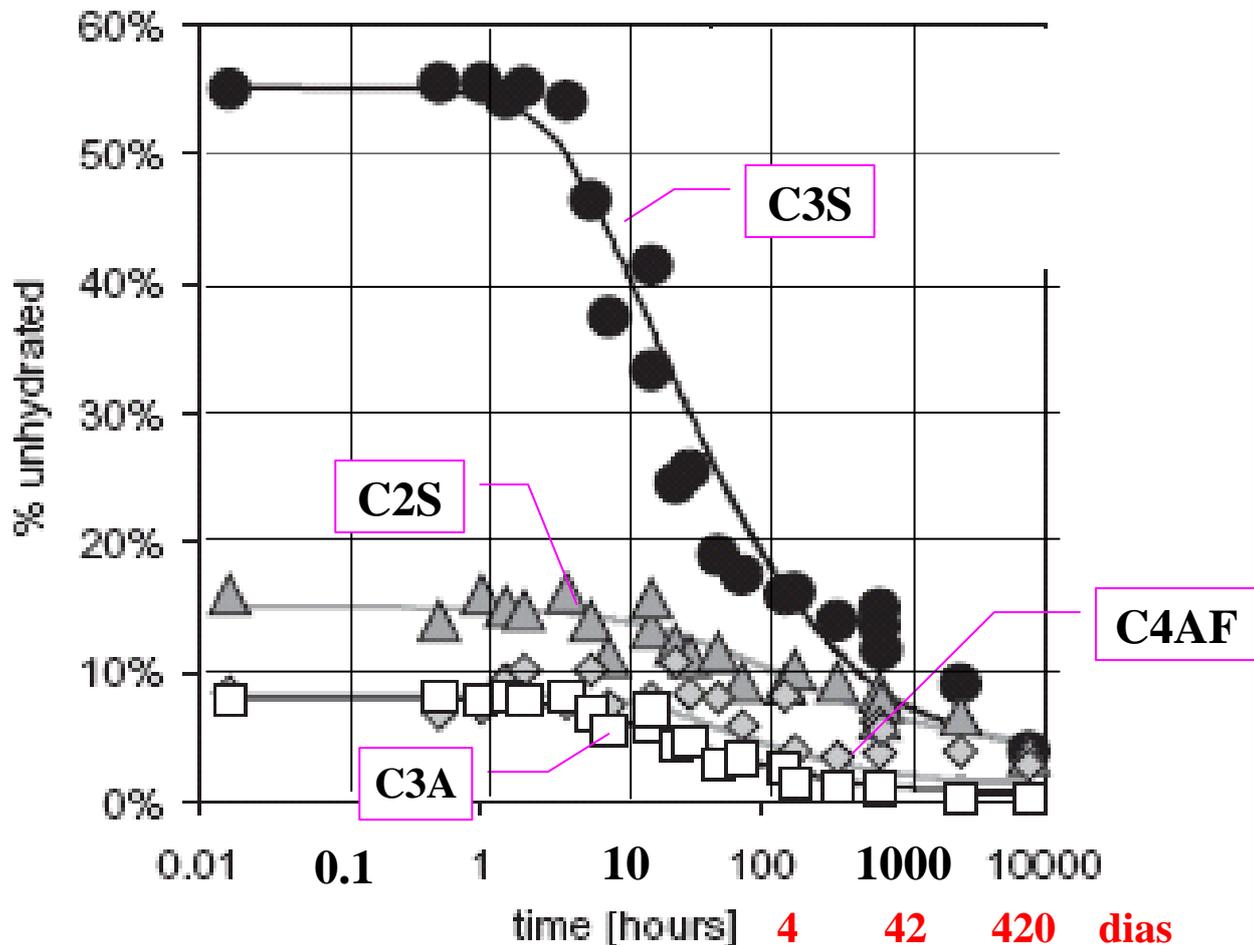
- 1. Cinza Claro = C3A = Tri-cálcio Aluminato*
- 2. Branco = C4AF= Ferrita = Cálcio Alumino-Ferrita*

Terminologia :

C = CaO A = Al₂O₃ S = SiO₂ H = H₂O F = Fe₂O₃ \bar{S} = SO₃



3. Lothenbach Barbara – [75] – Thermodynamic modeling of the hydration of Portland cement. - 2006



Hidratação dos componentes do clínquer ao longo do tempo em uma pasta de cimento com um fator água / cimento = 0,50.

Avaliação semi-quantitativa através de padrões XRD.

A composição para o tempo zero corresponde à composição básica do clínquer do cimento.

C3S = 56 %

C2S = 15 %

C3A = 9 %

C4AF = 9 %

...

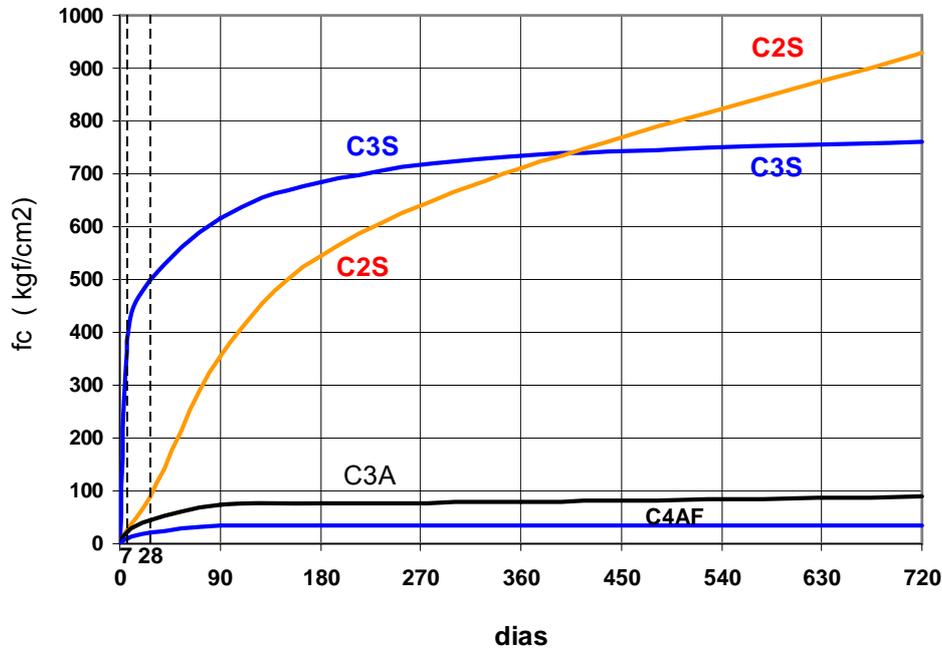
...



O dilema !

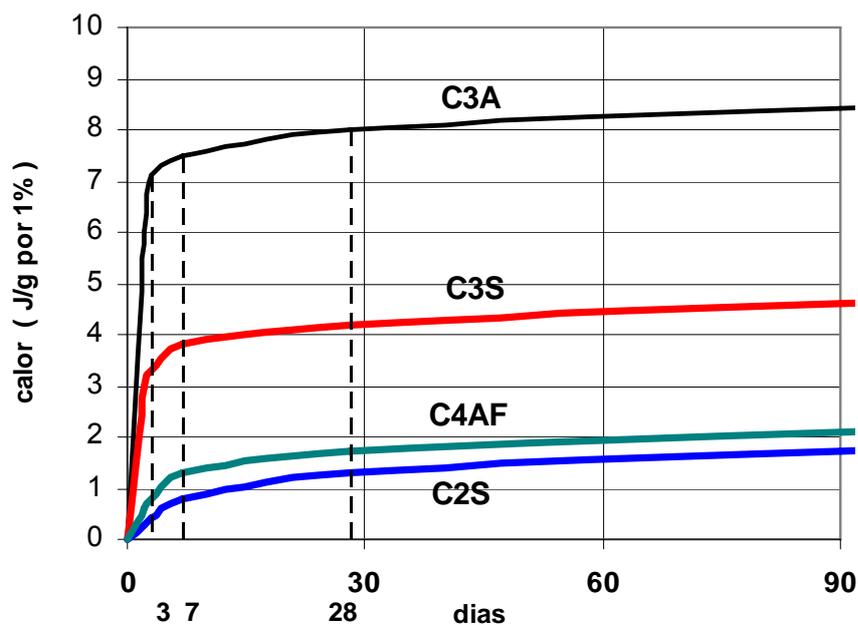
A resistência do C3S cresce rapidamente.

Resistência dos Componentes C3S - C2S - C3A -C4AF
do Cimento Portland segundo Bogue [28]



O C3S ao se hidratar libera muito calor. Ver [34]

F.P.Glasser - Calor de hidratação dos componentes
(J/g por 1% dos 4 componentes minerais)



O dilema !

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

ou

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



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

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

Concrete technology for sustainable development – ACI - Concrete International - November 1999 , Vol. 21 , No 11, pp 47-53

Building durable structures in the 21st century– The Indian Concrete Journal – July 2001

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.

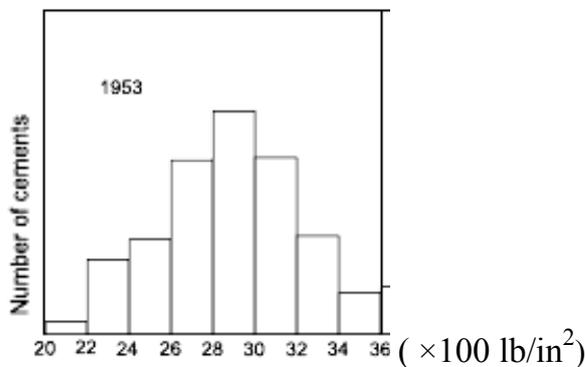
Bombeamento do concreto

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



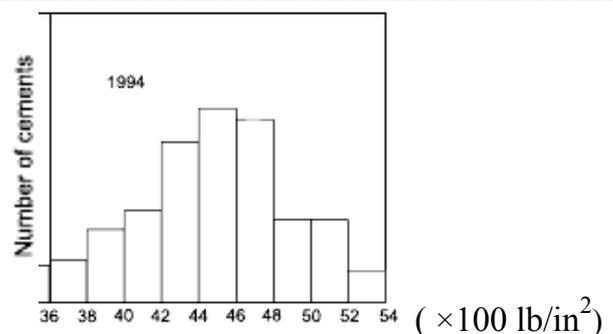
← Ano 1953 :

A figura mostra que, até 1953 , pelo menos 50% dos cimentos ASTM Tipo II tinham menos de 3000 lb/in² (21 MPa) de resistência aos 7 dias.

Ano 1994 →

Em 1994 , nenhum deles tinha resistência menor que 3000 lb/in² (21 MPa).

Em 1994, cerca de 50 % dos cimentos ASTM II tinham resistência, aos 7 dias, na faixa entre 4400 lb/in² e 5400 lb/in² (31MPa - 38MPa).



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.



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.

“ Os autores, P. Kumar Mehta & Richard W. Burrows, tiraram as seguintes conclusões da prática das construções de concreto no século 20 ”.

“
...

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 $\sim 195\text{m}^2/\text{kg}$.

Os cimentos continham uma quantidade relativamente pequena de silicato tri-cálcico, C_3S , menos que 30 %.

Observação : $\text{C}_3\text{S} = (3.\text{CaO}).\text{SiO}_2$

$\text{C}_2\text{S} = (2.\text{CaO}).\text{SiO}_2$

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 C_3S do cimento Portland comum.

Em 1970, segundo Price W.H., o teor de C_3S do cimento Portland Tipo I da ASTM aumentou, nos U.S.A., para 50 % e a finura Blaine subiu para $300\text{m}^2/\text{kg}$.

Hoje, os cimentos ASTM Tipo I e Tipo II podem ser encontrados com teor de C_3S maior que 60% e com finura maior que $400\text{m}^2/\text{kg}$.

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 C_3S 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 e ao maior módulo de elasticidade.

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.

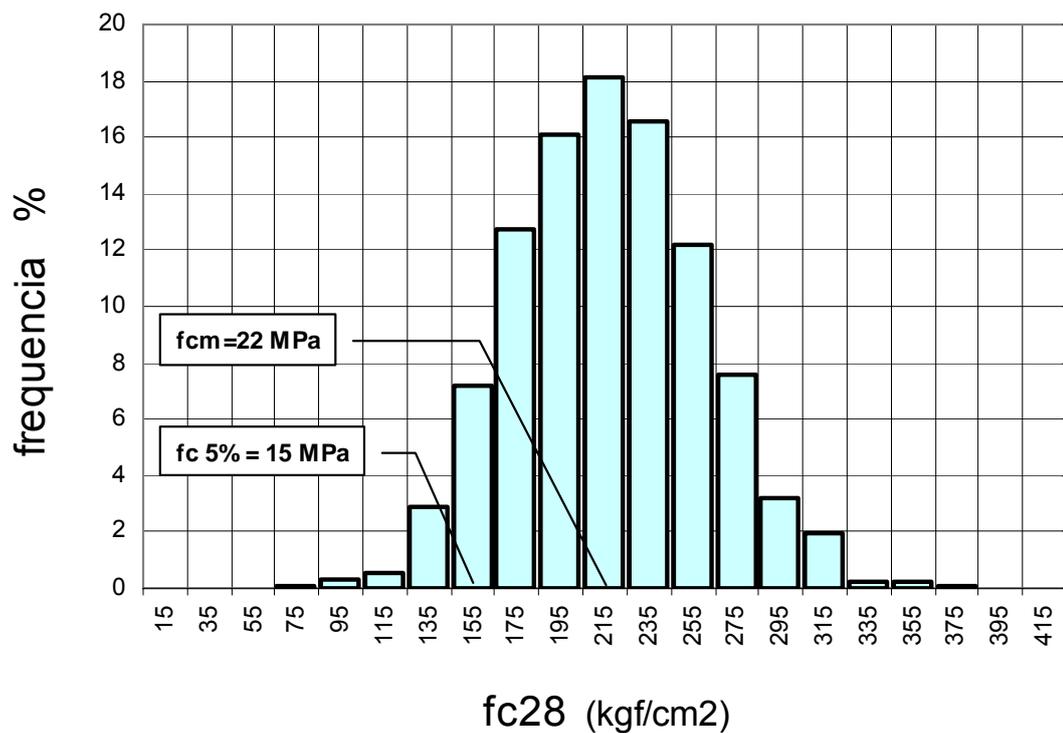
Isto mostra que alguma coisa está errada nas nossas normas, no que se refere às exigências feitas para garantir a durabilidade do concreto.

...”



2 - Samuel Chamecki - *Curso de Estática das Construções – Editora Científica – RJ – 1956*

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 $f_{ck28} = 15 \text{ MPa}$. Vide Estádio do Maracanã.

Na década de 60, no Rio de Janeiro e no Brasil, pontes e viadutos em concreto protendido foram construídos com $f_{ck28} = 24 \text{ MPa}$.



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.

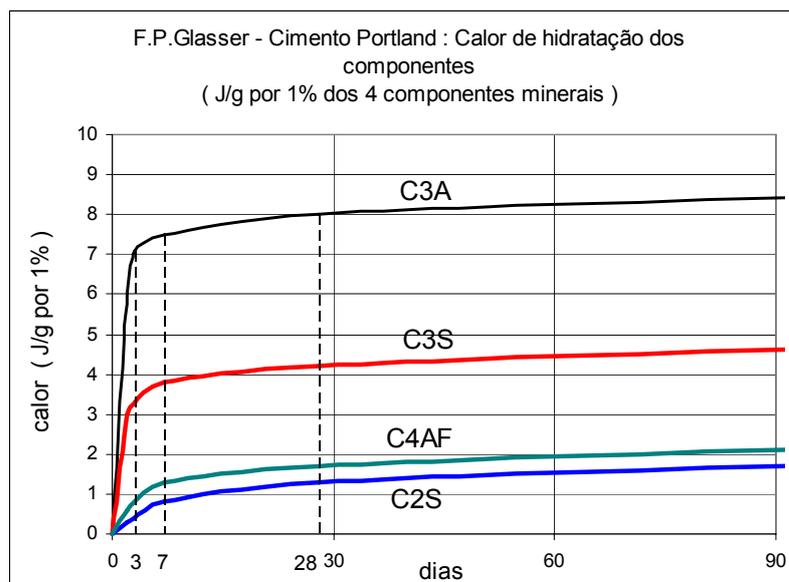
Nomenclatura : C3S = (3.CaO). SiO₂ ; C2S = (2.CaO). SiO₂
C3A =(3CaO).Al₂O₃ ; C4AF = (4CaO).(Al₂O₃).(Fe₂O₃)

Componentes dos cimentos	Teor %	Calor (kJ / kg)	
C3S	37 a 68	517	+ H ₂ O → C-S-H e C-H
β-C2S	6 a 32	262	+ H ₂ O → C-S-H e C-H
C3A	2 a 14	1144	+ H ₂ O + gesso → C4ASH12
C3A	2 a 14	1672	+ H ₂ O + gesso → etringita
C4AF	5 a 15	419	+ H ₂ O + C-H → hidro-granada

Observação : C-S-H = 1,7CaO.SiO₂.4H₂O; C-H = CaO. H₂O = Ca (OH)₂

O componente do cimento C3S, com grande calor de hidratação, está com teor cada vez maior no cimento Portland, em detrimento do C2S.

Daí surge um calor excessivo nos concretos. Ao esfriar, o concreto retrai e fissura.



Quanto maior o teor de C3S e de C3A, maior o calor de hidratação do cimento.

+++

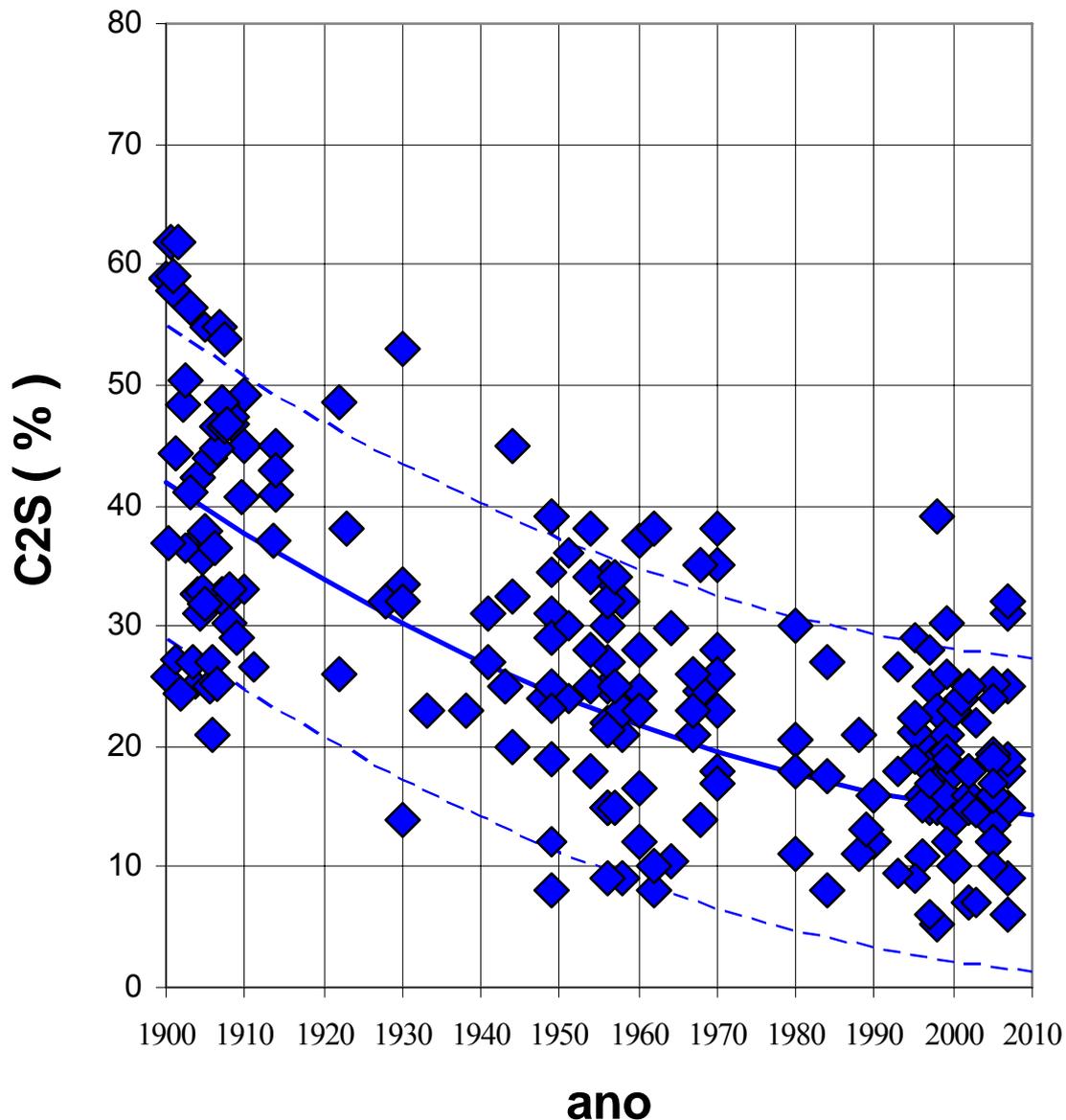


4a – Prof. Eduardo Thomaz *Varição, ao longo dos anos, do teor de C2S nos cimentos Portland. Dados coletados nos livros e artigos citados nas referências.*

Nomenclatura : $C_2S = (2.CaO).SiO_2$

Cimento Portland Comum : Teor de C2S

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



O teor de C2S, que tem baixo calor de hidratação, vem diminuindo ao longo dos anos.
A substituição do C2S pelo C3S gera sérios problemas de liberação rápida de calor.

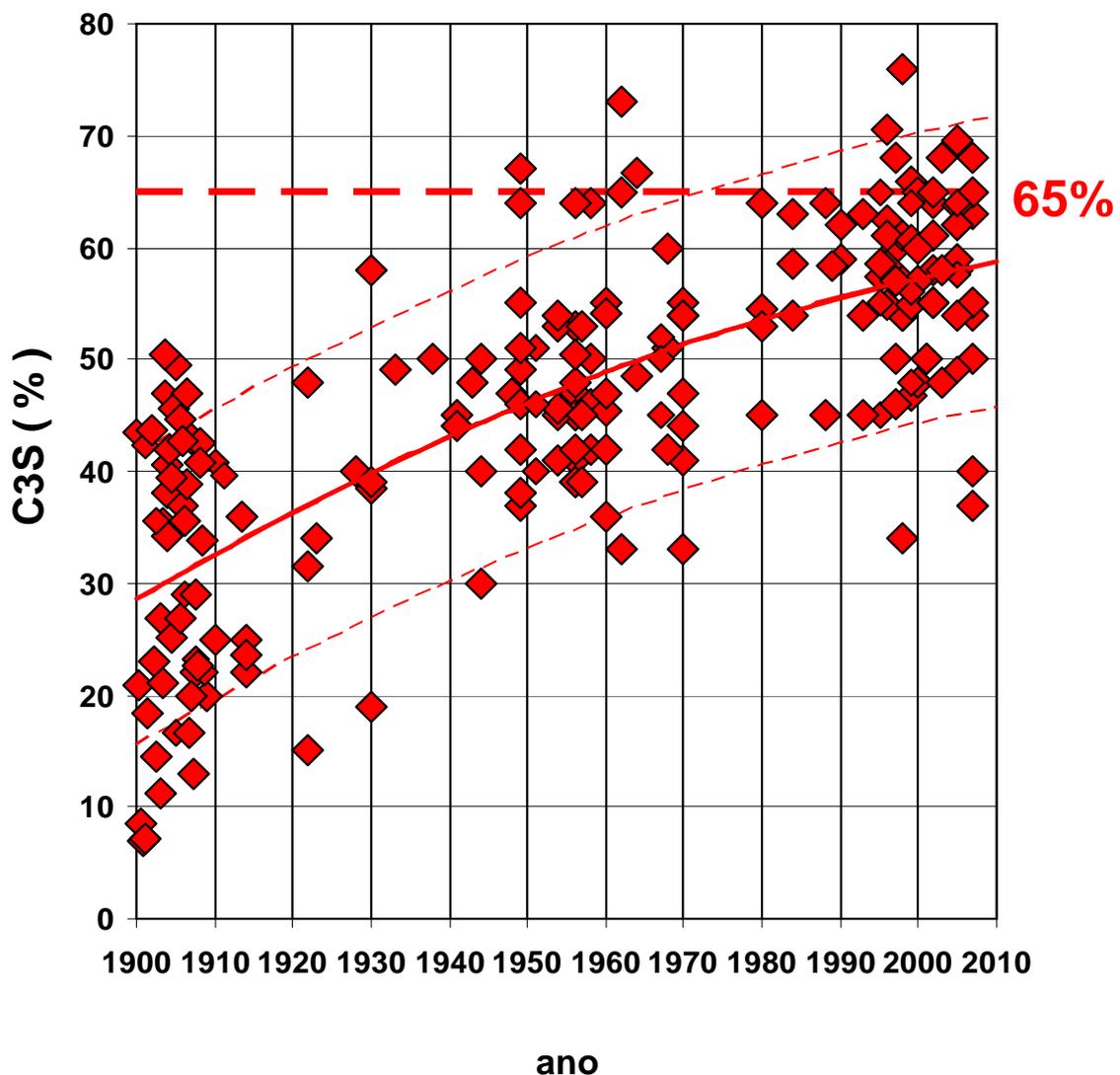


4b – Prof. Eduardo Thomaz *Variação, ao longo dos anos, do teor de C3S nos cimentos Portland. Dados coletados nos livros e artigos citados nas referências.*

Nomenclatura : $C3S = (3.CaO). SiO_2$

Cimento Portland Comum : Teor de C3S

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



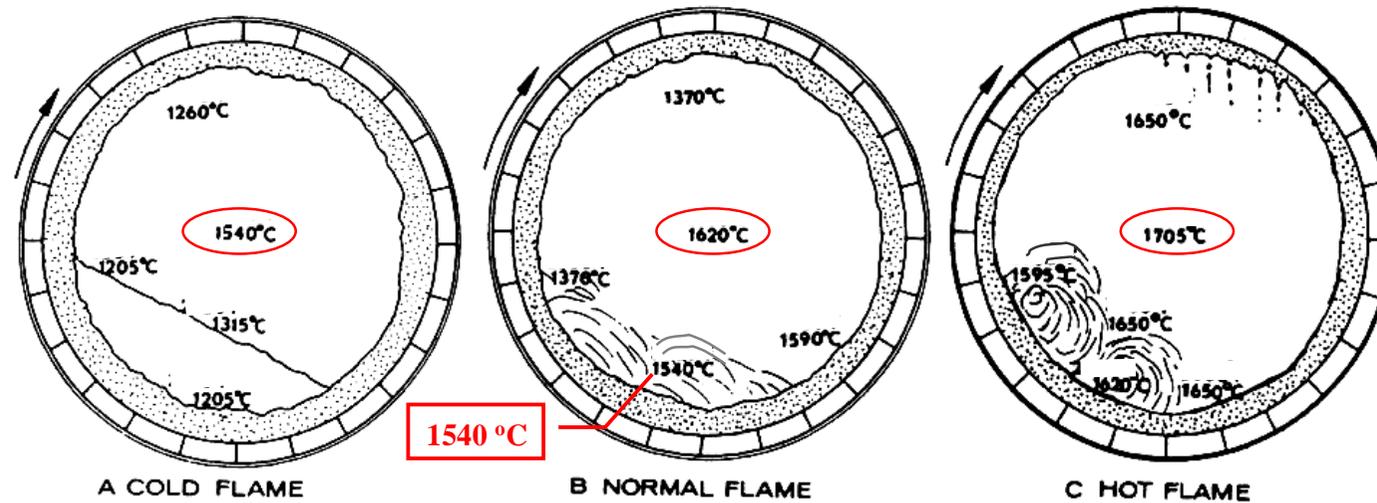
O teor de C3S vem aumentando ao longo dos anos o que gera sérios problemas de liberação rápida de calor. Existem poucos cimentos com teor de C3S = 70%.

Segundo Kurt E. Peray - *The Rotary Cement Kiln* [49] : *As misturas adequadas para produzir clínquer com mais de 65% de C3S são extremamente difíceis de “queimar” e geram pouco material fundido para formar o “revestimento móvel” (coating) das paredes dos fornos.*

O revestimento fixo, feito com material refratário, é destruído. A perda de calor pela parede de aço do forno é, então, grande, causando uma baixa eficiência térmica do forno.



“The Rotary Kiln” - Kurt E. Peray



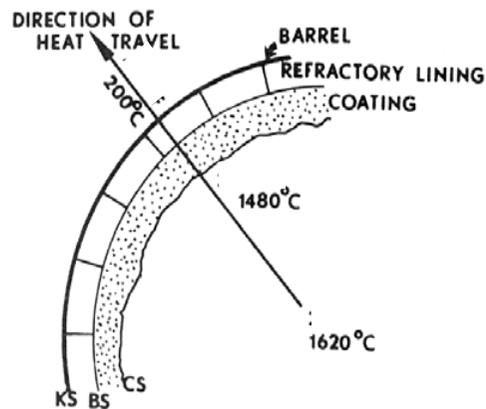
•Segundo Kurt E. Peray - *The Rotary Cement Kiln* [49] :

•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.

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

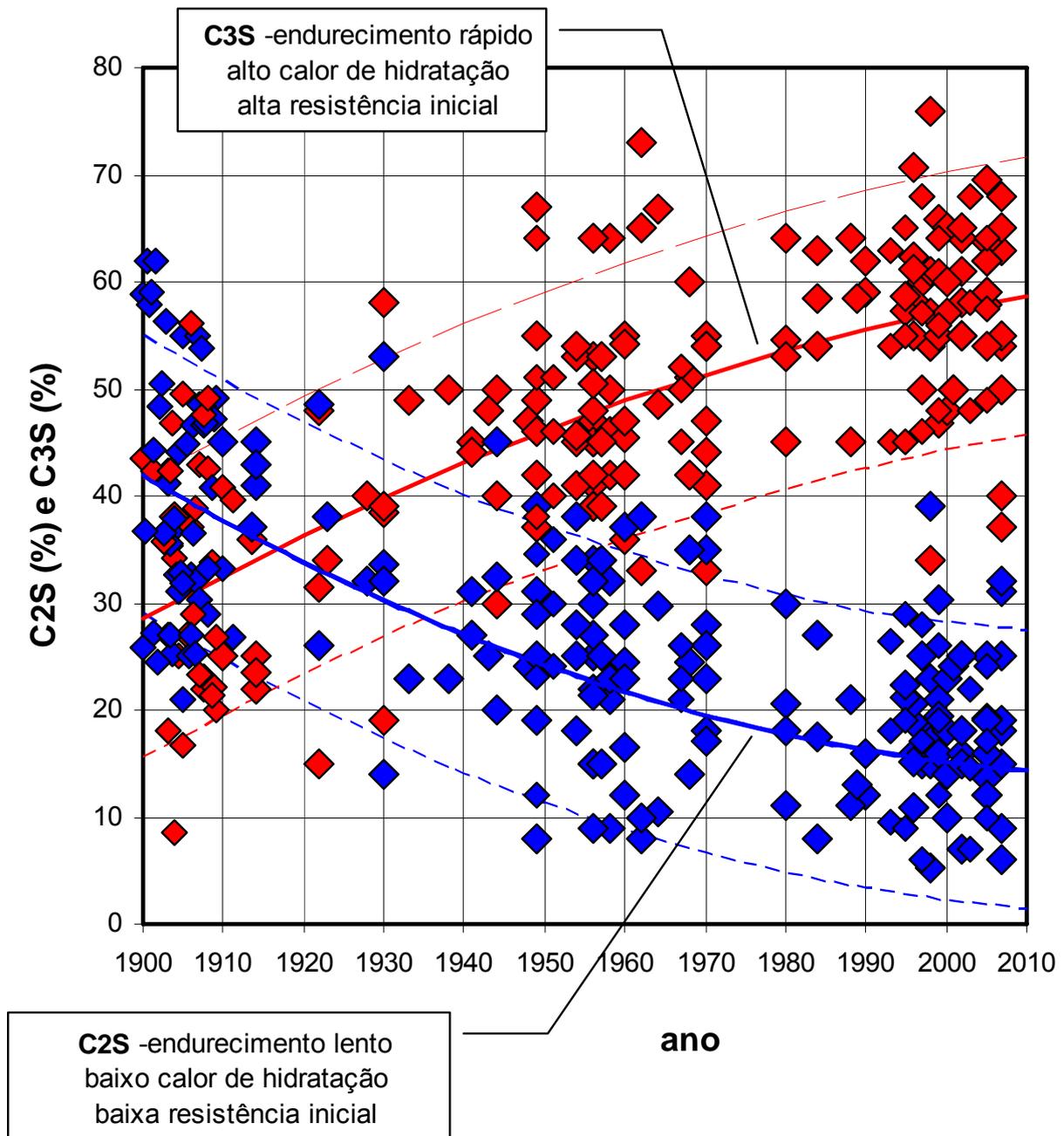




4c – Prof. Eduardo Thomaz *Variação, ao longo dos anos, do teor de C2S e de C3S nos cimentos Portland. Dados coletados nos livros e artigos citados nas referências.*

Nomenclatura : C3S = (3.CaO). SiO₂ ; C2S = (2.CaO). SiO₂

Cimento Portland Comum : Teor de C2S e C3S



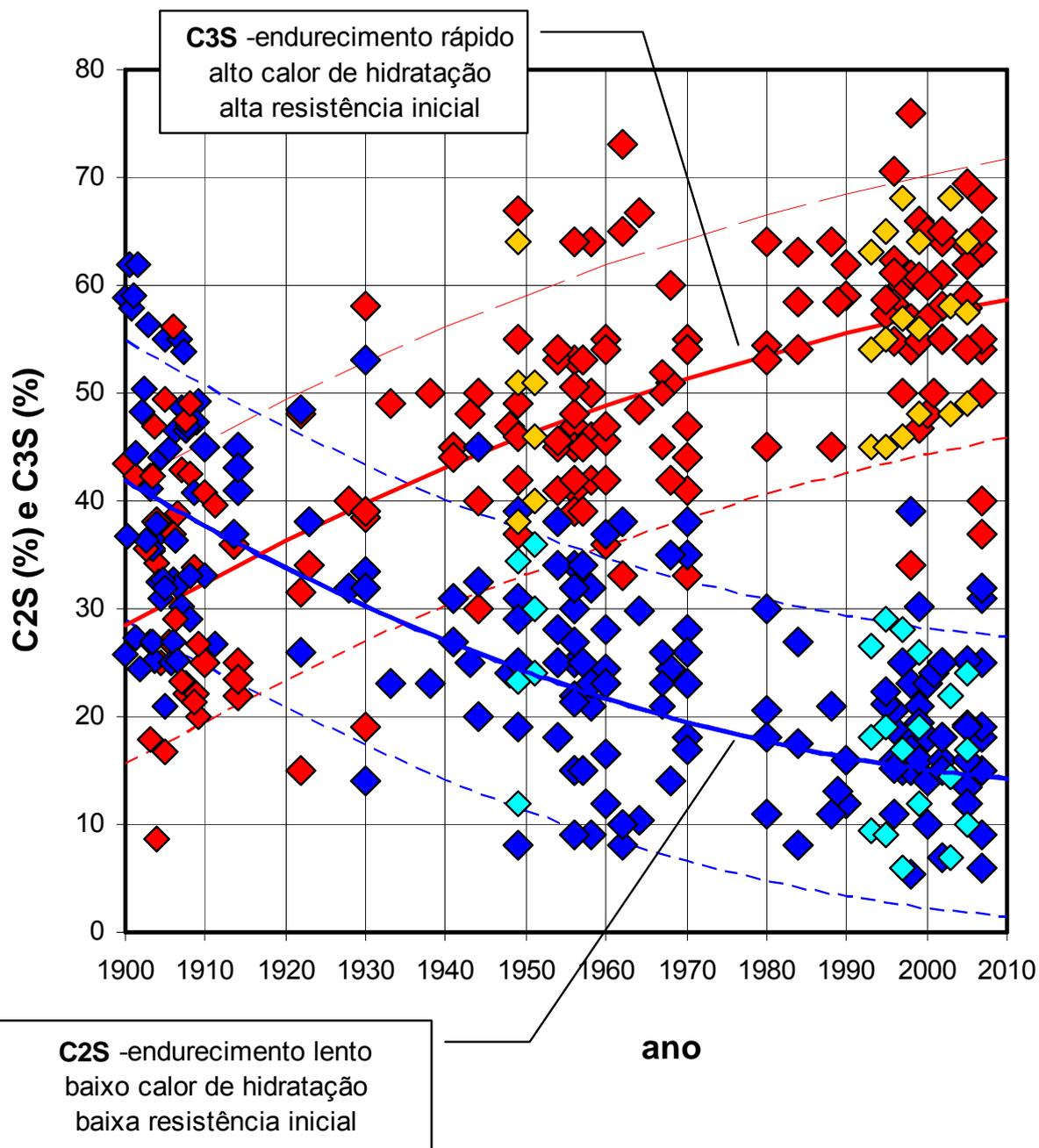
Caso não haja uma tecnologia de execução altamente sofisticada e cara, o concreto terá fissuras e outras falhas.



4d – Prof. Eduardo Thomaz - *Variação, ao longo dos anos, do teor de C2S e de C3S nos cimentos Portland.*

Dados da Portland Cement Association – *publicados em 2008*

Cimento Portland Comum : Teor de C2S e C3S



Observação : Pontos azul claro e amarelo são da Portland Cement Association, publicados em 2008.

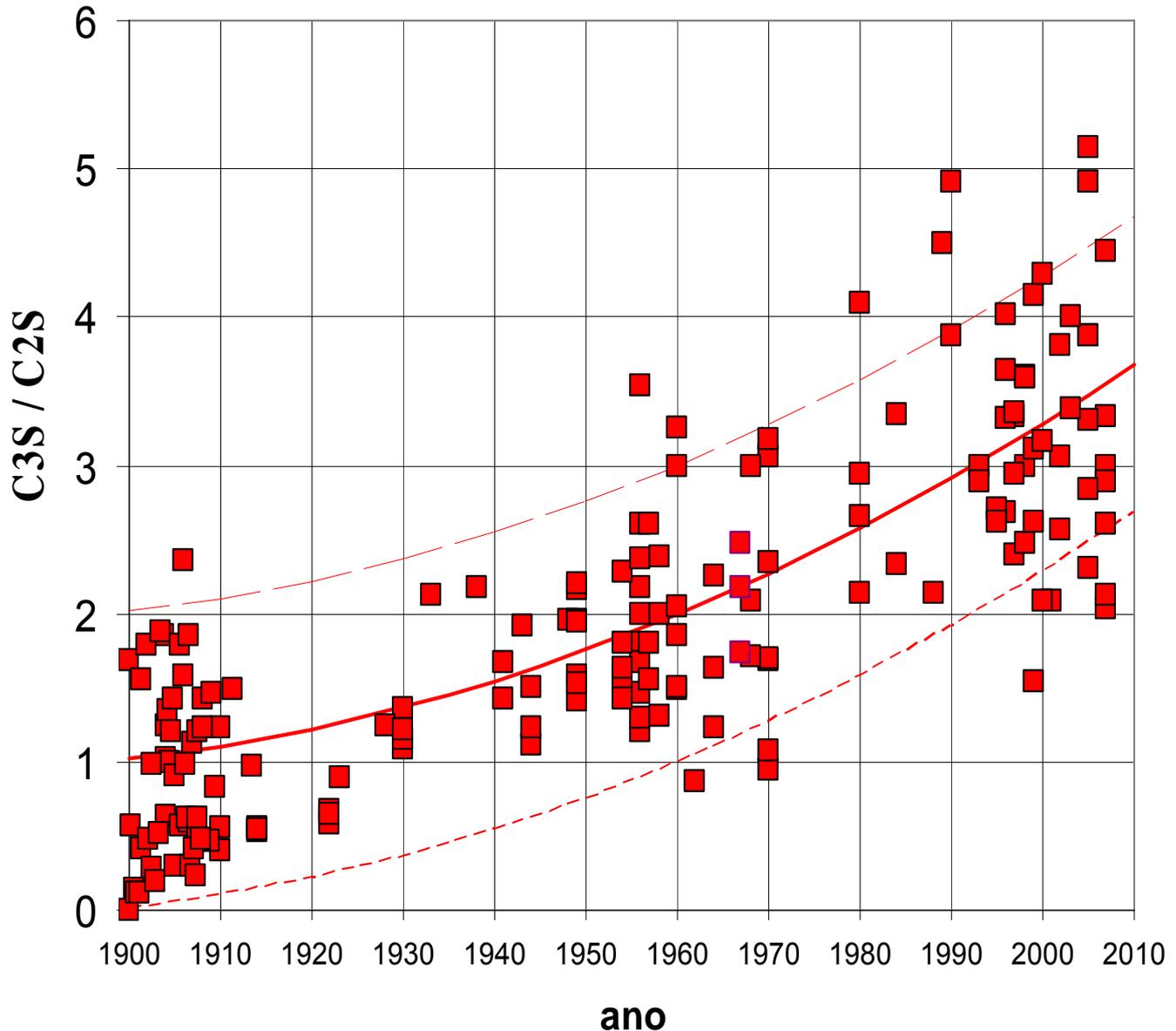
Eles confirmam o levantamento já feito por E. Thomaz.



4e- Prof. Eduardo Thomaz - Variação, ao longo dos anos, da relação entre os teores de C3S e C2S nos cimentos Portland.

Dados coletados por Eduardo Thomaz nos livros e artigos citados nas referências.

C3S / C2S



A relação C3S/C2S vem aumentando ao longo dos anos o que gera sérios problemas devidos à liberação rápida de calor.

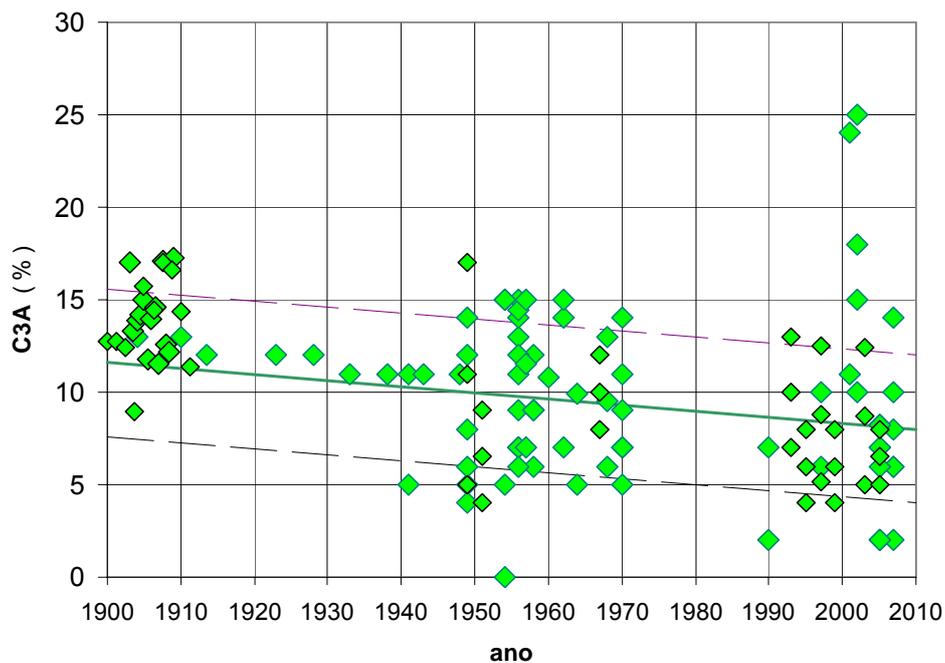


3f- Prof. Eduardo Thomaz - *Variação, ao longo dos anos, do teor de C3A e C4AF nos cimentos Portland*

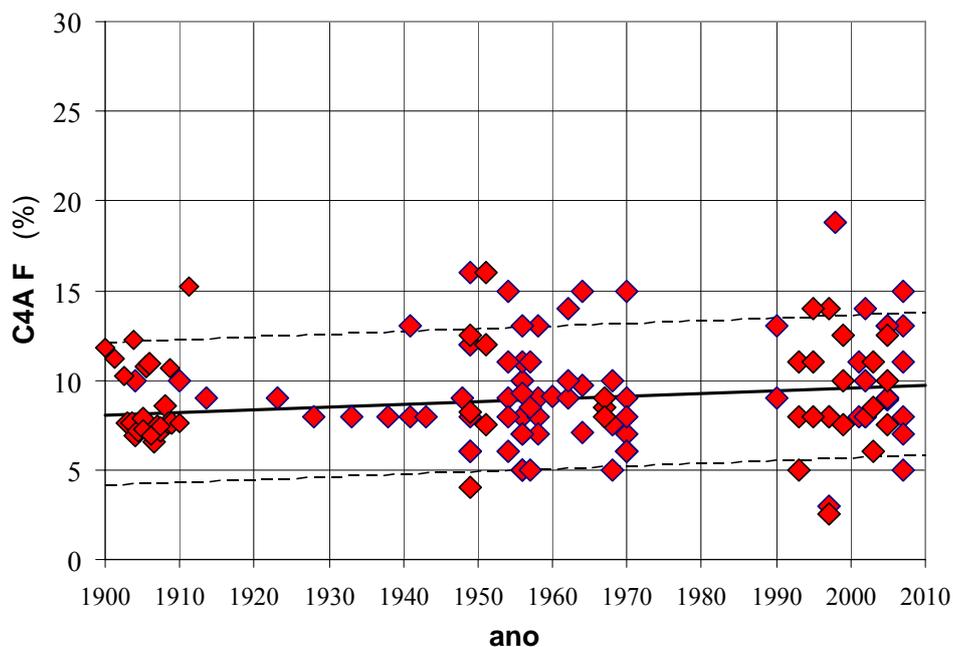
Dados coletados por Eduardo Thomaz nos livros e artigos citados nas referências.

Nomenclatura : $C3A = (3.CaO). Al_2O_3$; $C4AF = 4CaO.Al_2O_3 . Fe_2O_3$

Teor de C3A



Teor de C4AF

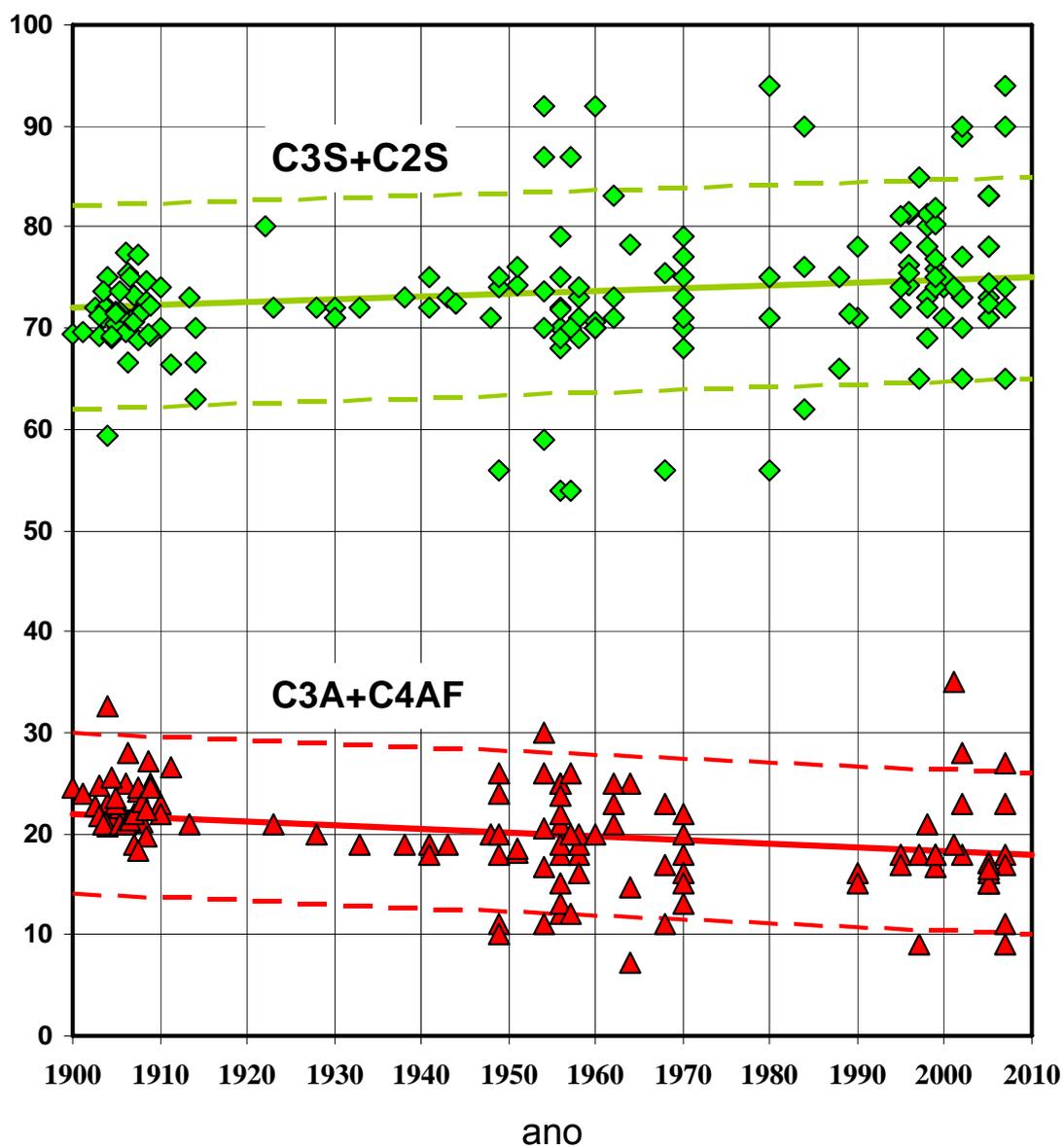


A variação dos teores de C3A e de C4AF, ao longo dos anos, é pequena.



3f- Prof. Eduardo Thomaz - *Variação, ao longo dos anos, do teor de (C3S+C2S) e (C3A +C4AF) nos cimentos Portland*

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

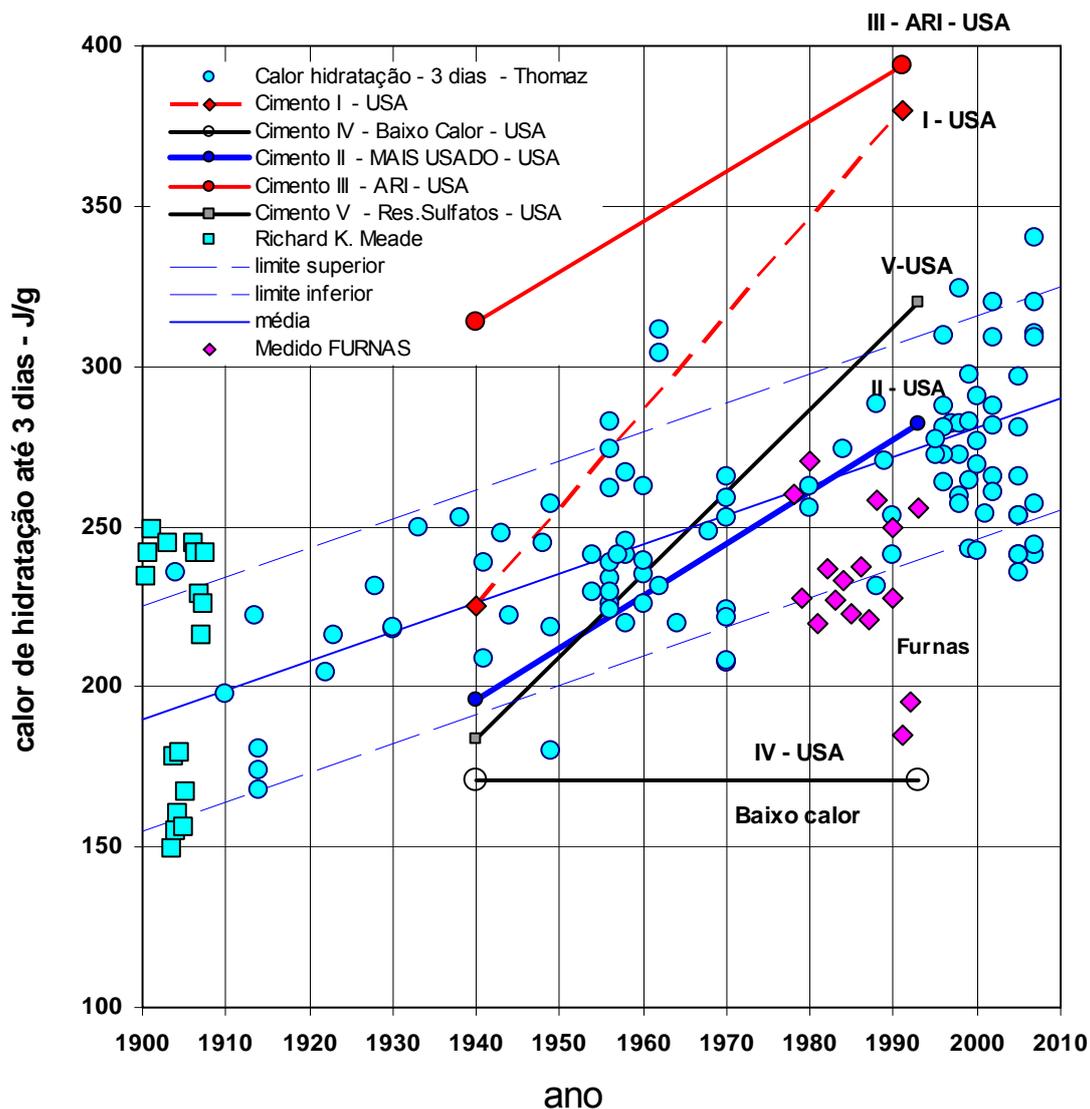


A Variação das Somas de teores : (C3S + C2S) e (C3A + C4AF) é muito pequena ao longo dos anos.



3g- Prof. Eduardo Thomaz - Variação, ao longo dos anos, do calor de hidratação nos cimentos Portland. Dados coletados nas referências e no relatório ACI Committee 225 – 1991 Guide to the Selection of Hydraulic Cements - *James S.Pierce - Geoffrey Frohnsdorff - Sidney Diamond*

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



Foram determinados os calores de hidratação dos cimentos a partir dos componentes dos cimentos, C3S, C2S, C3A, C4AF, etc, usando os critérios de Bogue, Lea, Taylor, Wood, Steinour, Glasser e de outros autores. Os valores mostram uma forte tendência de aumento com o passar dos anos.

Os resultados experimentais dos laboratórios de Furnas, confirmam a ordem de grandeza dos valores determinados. Nas barragens construídas por Furnas, dá-se preferência aos cimentos de baixo calor de hidratação, o que se reflete em valores abaixo da média dos demais cimentos.

O aumento (40%) do calor de hidratação, do cimento tipo II, é semelhante ao dos cimentos da literatura técnica em geral. No Brasil esse fato é constatado nas obras. O concreto, pouco tempo após a concretagem, está quente. **Isso não acontecia décadas atrás.**

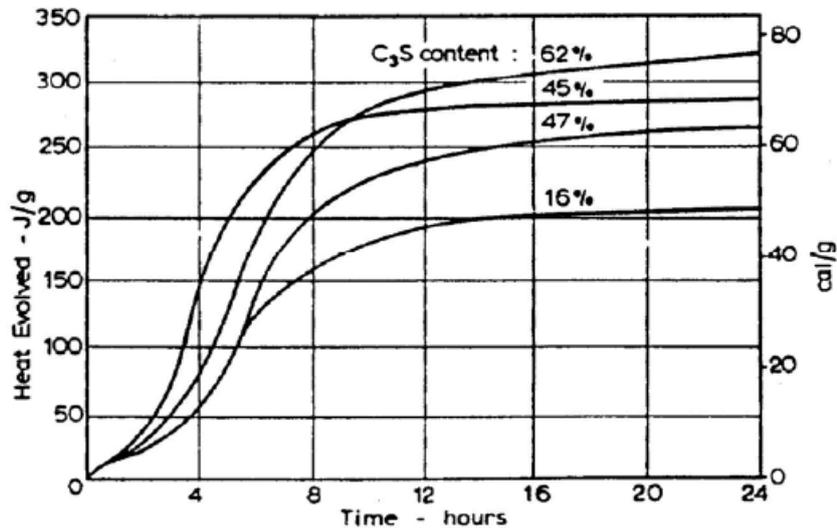


4 - PCA - Portland Cement Association - 2005

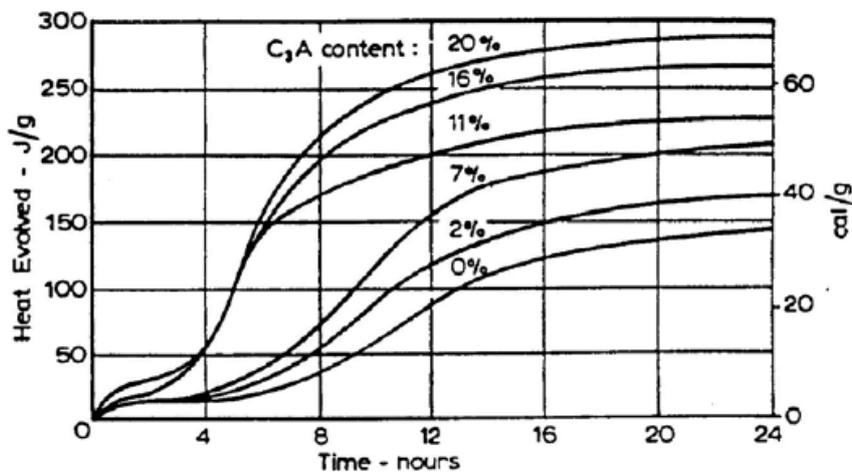
Research & Development Information PCA R&D Serial No. 2871

Effect of Cement Fineness and C3S Content on Properties of Concrete: A literature Review.

R.Douglas Hooton, Andrew J. Boyd , Deepti D. Bhadkamka



Influence of C₃S content on heat evolution (C₃A content approximately constant).



Influence of C₃A content on heat evolution (C₃S content approximately constant).

Quanto maior o teor de C₃S e de C₃A, maior o calor de hidratação do cimento.

Calor total de hidratação do cimento:

O calor de hidratação do cimento é a soma do calor de hidratação de seus componentes

$$H_{\text{cimento}} = 500 \times \text{C}_3\text{S}(\%) + 260 \times \text{C}_2\text{S}(\%) + 866 \times \text{C}_3\text{A}(\%) + 420 \times \text{C}_4\text{AF}(\%) + 624 \times \text{SO}_3(\%) + 1186 \times \text{CaO livre}(\%) + 850 \times \text{MgO}(\%)$$

Exemplo:

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



5 - Prof. Paulo Helene - EPUSP

Concretos de alta resistência

Conferência : SindusCon / SP - Campinas - 2003

“... ”

Por quê trabalhar com concretos de resistências mais elevadas que as atuais ?

.Conseqüências:

A melhoria dos cimentos proporcionou trabalhar com menores consumos e maiores relações a/c para as mesmas resistências;

Aumento de manifestações patológicas e 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;

Atender à durabilidade, ou seja, reduzir o envelhecimento precoce traz melhoria da qualidade da estrutura, com vantagens econômicas.

...”

+ + +

6 - Eng. Adam Neville

Resistência do cimento e durabilidade

Adam Neville – Cement and Concrete: Their Interrelation in Practice - Advances in Cement and Concrete - Editors: Michael W. Grutzeck and Shondeep L. Sarkar. – American Society of Civil Engineers – 1994.

“ ... ”

Em uma seção anterior discuti a inter-relação entre a resistência do cimento e a resistência do concreto. Essa inter-relação tem tido alguns resultados inesperados, no que se refere a outras propriedades do concreto que não sejam apenas a resistência. Refiro-me à mudança sistemática da resistência do cimento que ocorreu na Inglaterra desde 1960, e que ocorreu em outros países também, embora não ao mesmo tempo.

Embora venha ocorrendo essa contínua mudança ao longo mais de 60 anos, como conseqüência no desenvolvimento na fabricação do cimento, é a mudança em torno de 1960 que merece particular atenção porque ela teve amplas conseqüências para a pratica da produção do concreto.

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

A principal razão para isso foi o 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 %.

Essa mudança se tornou possível graças a mudanças nos métodos de fabricação do cimento, mas foi também motivada pelas vantagens de um cimento mais “forte”, como foi



considerado pelos usuários: 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 taxa de crescimento da resistência do cimento até os 7 dias é maior hoje.

A taxa de crescimento entre 7 e 28 dias mudou em consequência da mudança da relação C3S / C2S e também por causa do maior teor de álcalis nos cimentos de hoje.

A relação entre a resistência aos 28 dias e a resistência aos 7 dias diminuiu muito. Para um concreto com fator água cimento de 0.60, essa relação valia 1.60, antes de 1950. Em 1980 essa relação caiu para 1.30. Para fatores água/cimento menores que 0.60, usados hoje em dia nos concretos com maior resistência, essa relação, é ainda menor,

O crescimento da resistência, após os 28 dias, é muito reduzido, de modo que esse crescimento não é confiável no projeto de estruturas, que irão ser sujeitas ao carregamento total apenas muito tempo mais tarde.

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/m^3 , seria possível reduzir o teor de cimento de 350 kg/m^3 para 307 kg/m^3 .

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.

Os dados acima se referem a cimentos ingleses. As mesmas mudanças ocorreram em todo o mundo, como resultado da modernização da produção do cimento.

Na França entre 1965 e 1989, o teor de C3S aumentou de 42% para 58.4%. O teor de C2S diminuiu de 28% para 13%.

A tendência de aumento da resistência aos 28 dias parece continuar hoje em dia.

Nos USA, entre 1977 e 1991, a resistência da argamassa feita de acordo com a ASTM C 109-92 aumentou de 37,8 MPa para 41,5 MPa, como mostrou o comitê ASTM C-1 em 1993.

Embora uma resistência maior do concreto aos 28 dias, para um dado fator água/cimento, possa ser vantajosa economicamente, existem desvantagens como consequência.

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.

Essas duas mudanças simultâneas, resultaram no concreto moderno mais poroso, com maior permeabilidade, e que, como consequência, é mais sensível à carbonatação e mais propício à penetração de agentes agressivos.

O concreto moderno é um concreto menos durável.

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.

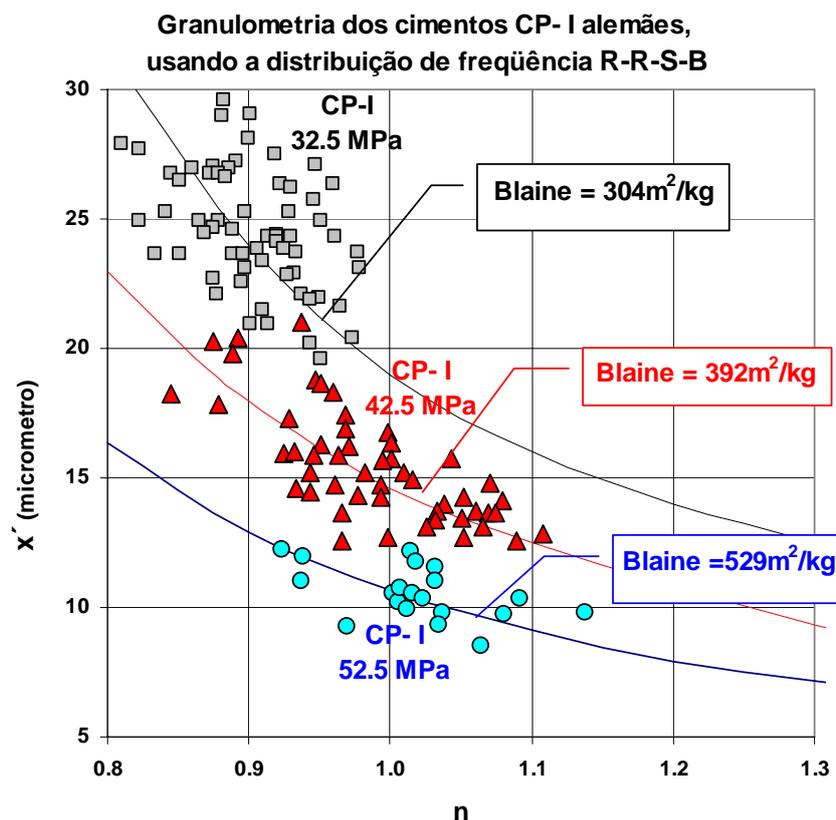
O rápido ganho de resistência, dos concretos atuais, permite a remoção mais rápida das formas. Com essa retirada precoce das formas, a cura úmida efetiva cessa numa idade inicial muito baixa do concreto.

Isso tem conseqüências adversas na durabilidade do concreto da estrutura.

Essas diversas conseqüências de produzir um cimento mais resistente não foram previstas na Inglaterra, porque os construtores estavam interessados em explorar a alta resistência inicial dos cimentos, e também porque as especificações foram elaboradas tendo por base apenas a resistência aos 28 dias.

...”

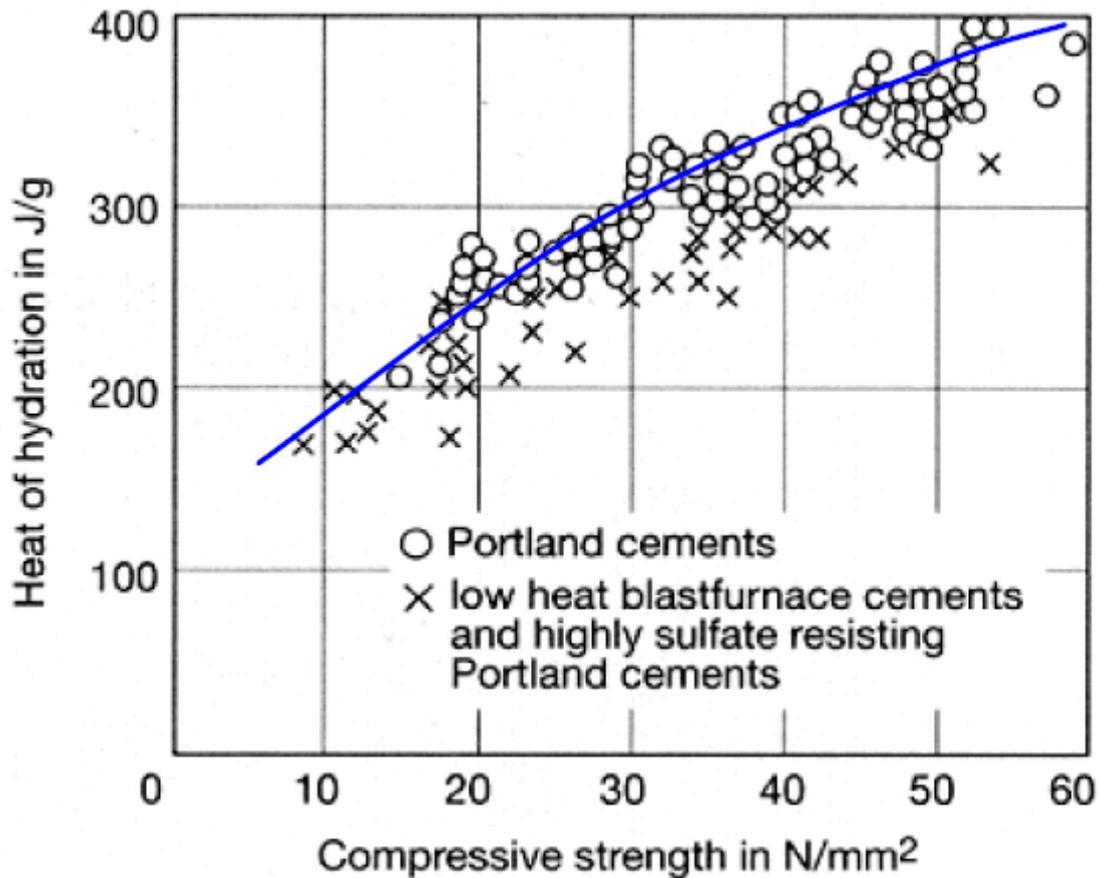
7 - Friedrich Wilhem Locher – Cement - Principles of Production and Use – Bau + Technik - 2006 [46]



Os cimentos com alta resistência inicial tem $D_{60\%} = 10$ micrometros e finura $500 \text{ m}^2/\text{kg}$



Hidratação × Resistência × Calor

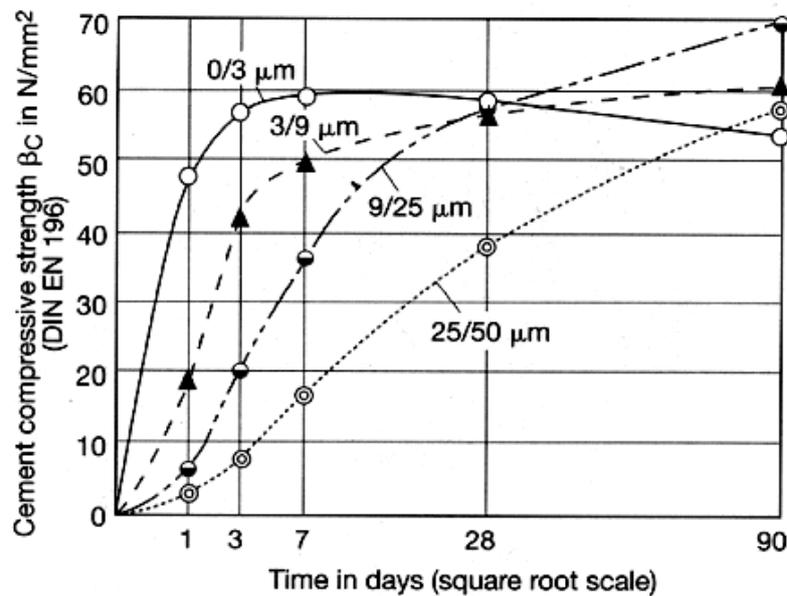


A hidratação do cimento é uma reação química exotérmica.

A hidratação do cimento tem como conseqüências mais importantes o aumento da resistência do concreto e a liberação de calor.

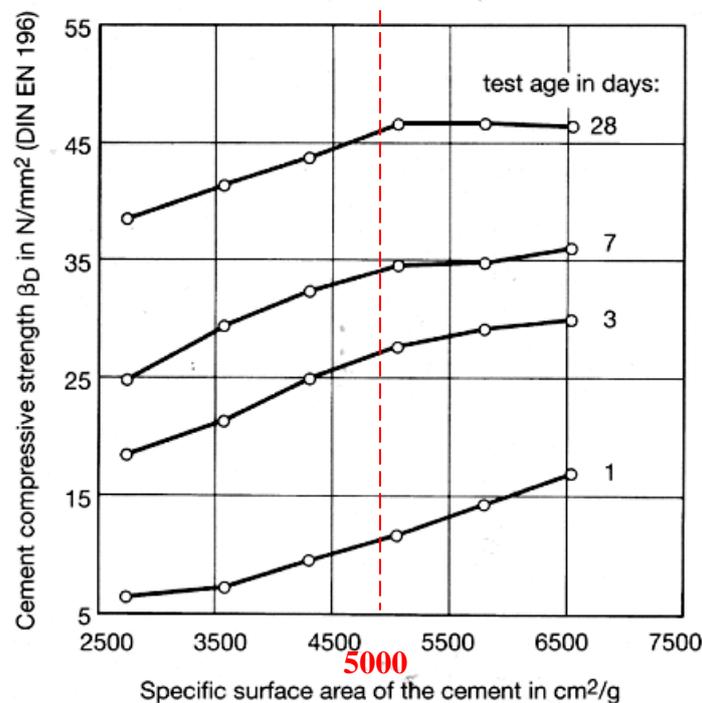
Sendo assim, a resistência do concreto e o calor da hidratação liberado estão correlacionados, como mostrado na figura acima.

A velocidade de hidratação do cimento com alto teor de C3S é grande e em conseqüência também são grandes a taxa de aumento de resistência e a taxa de liberação de calor. Resumindo, quanto maior a resistência inicial do concreto mais aquecido fica o concreto.



Desenvolvimento da resistência de grãos de cimento com diferentes tamanhos. Grãos de um cimento com 5% de gesso, separados por meio de jatos de ar. Ver Friedrich W. Locher [46]

Quanto mais fino o cimento mais rápida a hidratação e conseqüente aumento da resistência. O aumento da resistência é uma conseqüência da hidratação da do cimento.



Influencia da superfície específica no desenvolvimento da resistência do cimento Portland. Ver Locher, Friedrich Wilhelm – *Cement - Principles of Production and Use* – Bau + Technik - 2006 [46] e Kuhlmann, K. [56].



Comentários:

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

O cimento antigo, antes de 1970, tinha grãos grossos e demorava mais a se hidratar, elevando menos e mais lentamente a temperatura do concreto lançado. O resfriamento posterior era menor. As tensões de tração eram menores.

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

Tudo indica que diminuir o tamanho de grão, aumentando a superfície específica do cimento acima de 5000cm²/g (500 kg/kg) não tem qualquer 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.

O consumo de energia elétrica na moagem é alto, cerca de 38% do consumo total de energia elétrica na fabricação do cimento. Ver [57] - Jochen Stark – Bernd Wicht – Zement und Kalk



8 - Eng. Oswaldo Rezende Mendes – CENTRAN – (D.N.I.T. + E.B.) – Ver [42]

As normas da ABNT , permitem adições no cimento em valores muito elevados.

CPII –E : Escoria de Alto Forno até 34%, em massa, na composição do cimento.

CPIII : Escoria de Alto Forno até 70%, em massa, na composição do cimento.

CPIV : Material Pozolânico até 50%, em massa, na composição do cimento

O fator econômico é determinante para os fabricantes de cimento, pois o custo do clínquer é alto e o das adições é baixo. A adição de escória, por exemplo, barateia o produto, mas muda totalmente o comportamento do cimento.

Não deveria ser fixado apenas um valor da porcentagem das adições, e sim fixadas as propriedades finais do cimento, como:

Finura do cimento (Por exemplo: Finura Blaine $< 300m^2/kg$).

Composição química completa do cimento já com as adições.

Teor dos componentes C3S, C2S, C3A, C4AF, etc...

Início e fim de pega em faixas estreitas de tempo.

Variação da taxa de liberação de calor de hidratação ao longo do tempo.

Resistência aos 7 dias e aos 28 dias.

Valor mínimo da relação (fck 90 dias / fck 28 dias), por exemplo (fck90/fc28) $>1,20$.

Isso evitaria o que hoje ocorre freqüentemente, a resistência aos 90 dias não ser sequer maior que a resistência aos 28 dias.

+++

9 - H. E. F. Taylor - Cement Chemistry – 1998

“ ...

Cimentos com endurecimento rápido têm sido produzidos de várias maneiras, a saber :

variando a composição para aumentar o teor de alite (C3S)

melhorando os processos de fabricação como, por exemplo, moendo as matérias primas, componentes do clínquer, mais finamente, e misturando-as melhor entre si, antes de entrar no forno de fabricação.

moendo o clínquer mais finamente.

O teor de alite (C3S) dos cimentos Portland tem aumentado constantemente durante esse século e meio em que o cimento Portland tem sido produzido.

Muitos cimentos, que são considerados comuns hoje em dia, eram considerados de endurecimento rápido poucas décadas atrás.

Na especificação da ASTM, os cimentos de endurecimento rápido são chamados de alta resistência inicial ou de cimentos Tipo III.



Usando difração de raio X, ou outros métodos, pode-se mostrar que 70% do C₃S reage em 28 dias, e praticamente 100% do C₃S em um ano. Os produtos são hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ e um silicato de cálcio hidratado, chamado C-S-H, tendo as propriedades de um gel rígido, e sendo praticamente amorfo.

...”

10 - Prof. Eduardo Thomaz (IME - CENTRAN)

“ ...

- Ou mudam os cimentos, ou mudam os processos de execução das obras, ou as obras .1 continuarão a se deteriorar rapidamente.
- O controle da resistência do concreto aos 28 dias, nas obras, estimula o uso de cimentos .2 com alta resistência inicial, com grãos cada vez mais finos.
- Quanto mais fino o cimento, mais rápida a hidratação e conseqüente aumento da .3 resistência.

$$\text{Hidratação} \times \text{Resistência} \times \text{Calor de hidratação}$$

$$\text{Finura} = \text{m}^2/\text{kg}$$

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

$$\text{Finura} = \frac{6}{D(\text{cm})} \times \frac{1}{3,1 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)} \cong \frac{2 \text{ cm}^3}{D(\text{cm})} \times \frac{1}{1 \text{ grama}} = \frac{2 (\text{cm}^3/\text{g})}{D (\text{cm})} = \dots (\text{cm}^2/\text{g})$$

Exemplo 1:

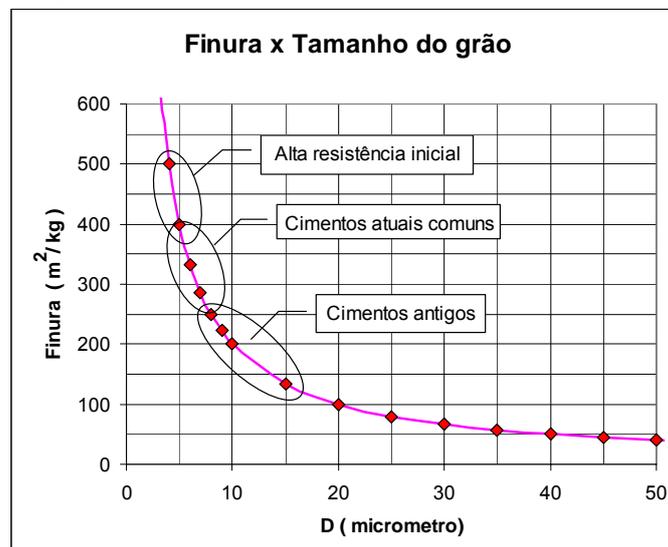
$$D = 10(\mu\text{m}) = 10 \times 10^{-6}(\text{m}) = 10^{-5}(\text{m}) \times 100 = 10^{-3}(\text{cm})$$

$$\text{Finura} = \frac{2}{10^{-3}} (\text{cm}^2/\text{g}) = 2000 (\text{cm}^2/\text{g}) = 200 (\text{m}^2/\text{kg})$$

Exemplo 2:

$$D = 5(\mu\text{m}) = 5 \times 10^{-6}(\text{m}) = 5 \times 10^{-6}(\text{m}) \times 100 = 5 \times 10^{-4}(\text{cm})$$

$$\text{Finura} = \frac{2}{5 \times 10^{-4}} (\text{cm}^2/\text{g}) = 4000 (\text{cm}^2/\text{g}) = 400 (\text{m}^2/\text{kg})$$





O aumento da resistência é uma consequência da hidratação do cimento.

Como os grãos dos cimentos atuais são cada vez mais finos, a hidratação é mais rápida e a resistência inicial é maior.

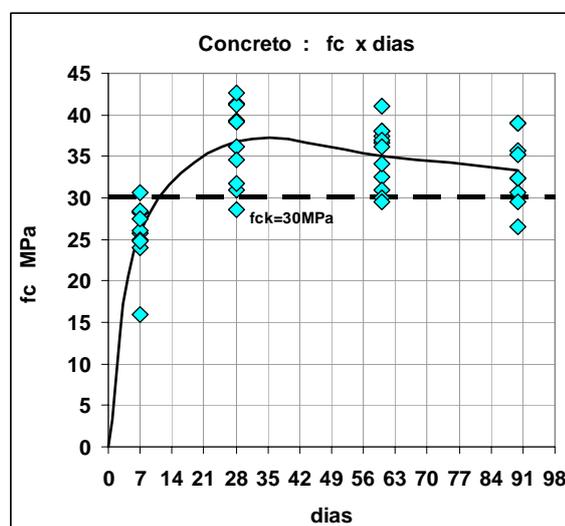
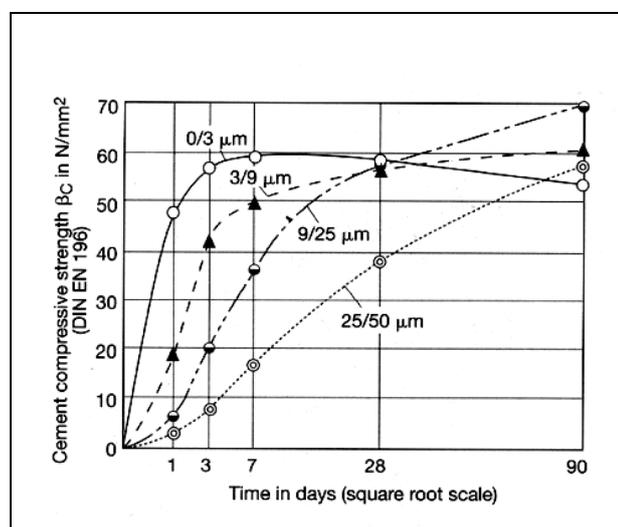
Seria mais adequado chamar esses *cimentos de hidratação rápida*.

Deveria ser criado também o controle da resistência aos 90 dias.

Com os cimentos atuais não há aumento significativo da resistência após os 28 dias e a estrutura fica sem reservas de resistência.

Chegamos ao ponto de, em algumas obras recentes, a resistência dos corpos de prova do concreto aos 90 dias ser menor do que a resistência aos 28 dias.

Com o cimento antigo a resistência crescia muito após os 28 dias, e as estruturas possuíam reserva de resistência crescente com o passar do tempo.



Nos ensaios de laboratório os grãos finos de cimento apresentam resistência aos 90 dias maior que aos 28 dias.

Em algumas obras recentes, mesmo com bom controle de qualidade, a resistência dos corpos de prova do concreto aos 90 dias é menor do que a resistência aos 28 dias.

Os cimentos atuais com alto teor de C₃S e C₃A liberam calor muito rápido, e o concreto fica aquecido. Quando resfria rápido, fissura. Torna-se necessário resfriar o concreto antes e depois do lançamento nas formas. O concreto, depois de lançado, deve ser resfriado com serpentinas, com água de circulação, para retirada do calor.

Usar cimentos com baixo calor de hidratação. Baixo teor de C₃S e C₃A. A nova edição 2007 das normas AASHTO M 85 e ASTM C 150 fixam, em conjunto, um índice para limitar o calor de hidratação: $C_3S + 4.75 \times C_3A \leq 100$

Usar concreto resfriado. A temperatura de lançamento do concreto deve ser de 15°C.

As fôrmas devem ser isolantes térmicos e só devem ser retiradas quando a temperatura do concreto estiver pouco acima (15°C) da temperatura ambiente.

A cura deve ser feita de modo completo e rigoroso durante 14 dias pelo menos.

Sofisticar os atuais processos de execução é muito caro.

Mudar os cimentos seria mais barato.



Experiência pessoal de Eduardo Thomaz:

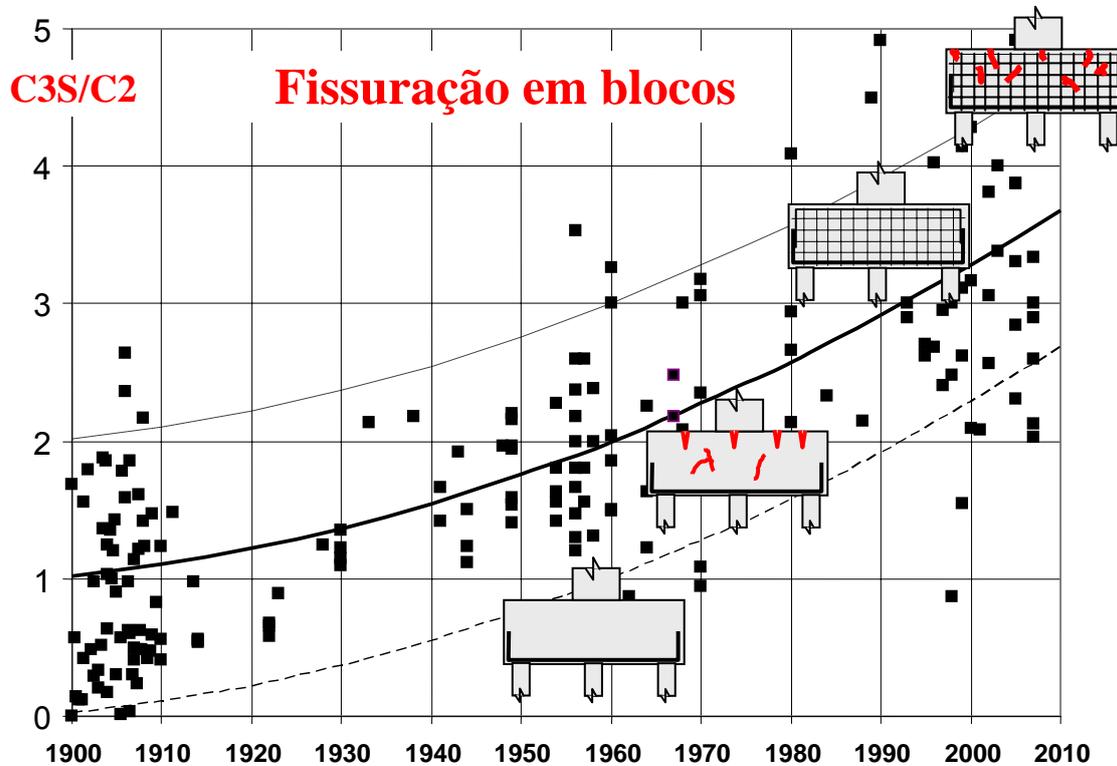
Há algumas décadas atrás usávamos blocos de estacas com armadura apenas na face inferior e com a ancoragem desses ferros em uma parte das faces laterais.

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

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



Experiência pessoal de Eduardo Thomaz :



Hoje, caso não sejam colocadas armaduras em duas direções e em todas as faces dos blocos, corre-se o risco ver os blocos cheios de fissuras.

Em blocos grandes, usamos hoje concreto resfriado com gelo. Caso contrário teremos fissuras na face superior, pelo menos.

Esses problemas surgiram na década 70 e se agravaram partir da década de 90.

Estimativa para o aquecimento de um concreto usual:

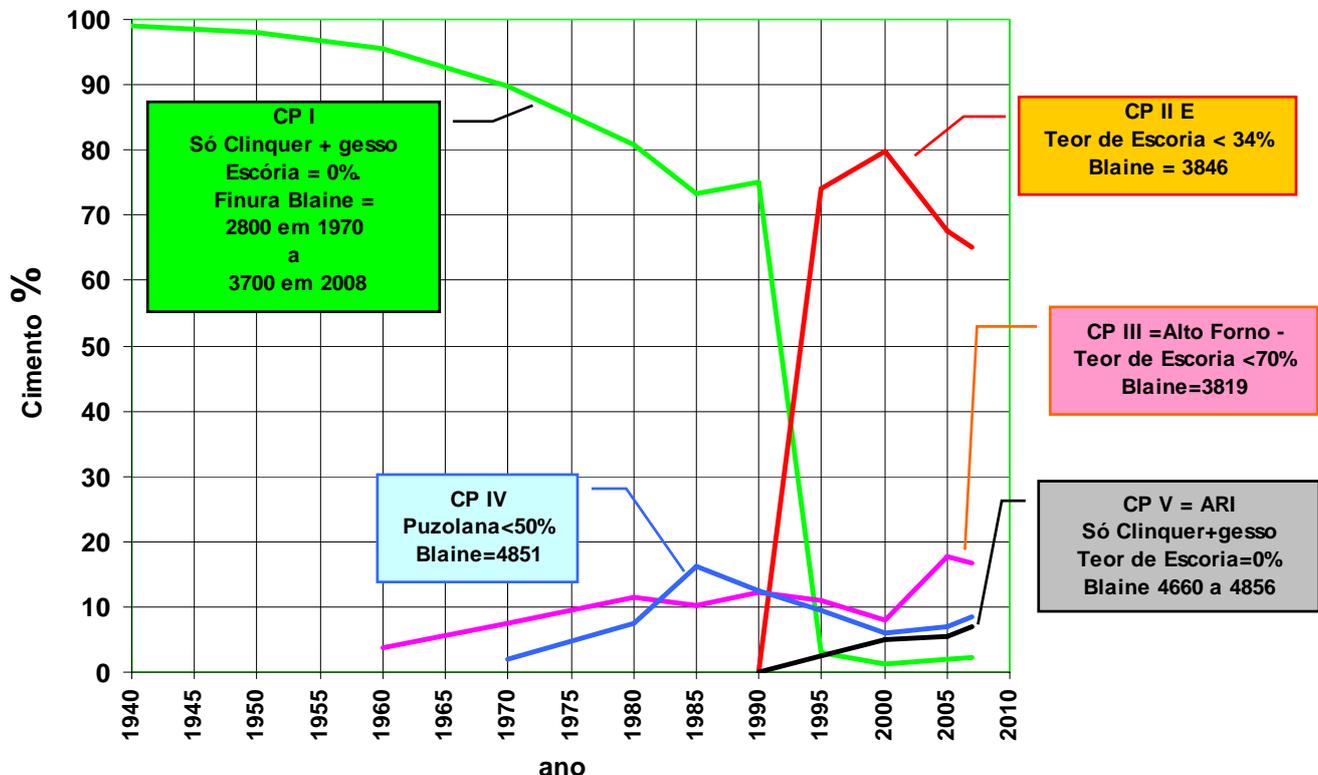
$$\Delta T \approx 5^{\circ}\text{C a } 9^{\circ}\text{C para cada } 45\text{kg de cimento}$$

Exemplo: Ao se usar 450 kg de cimento / m³ de concreto, há o aquecimento do concreto entre 50°C a 90°C acima da temperatura de lançamento.



11 - ABCP – Arnaldo Forti Battagin – Dezembro 2008 – Palestra no I.M.E. – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro / RJ

Produção de Cimento no Brasil (%)



Comentários de E.Thomaz:

O cimento **CP I**, só clinquer, desapareceu em 1990. Possuía, já então, alto teor de C3S.

O antigo cimento **CPI**, com baixo teor de C3S, e com baixa taxa de liberação inicial de calor, não existe mais.

Passou-se a misturar o clinquer do antigo **CPI** com escória de alto forno, em quantidade limitada a 34%. Surgiu o **CP II**.

A partir de 2000 mistura-se mais escória ainda (até 70%) ao clinquer, aumentando-se a produção do **CP III**, cimento de alto forno. **O CP III não é mais um Cimento Portland.**

O clinquer isolado, com alto teor de C3S, se moído finamente, com finura Blaine 470 m²/kg a 490m²/kg, dá origem ao cimento **CP V, ARI**, cuja produção cresce. As firmas concreteiras compram esse cimento para misturar com escória.

Como consequência, crescem os casos de obras com fissuras nas primeiras idades, pois a escória, sendo uma “**areia de alto forno**”, não dá boa “liga” nas primeiras horas e surgem fissuras por retração plástica.

Algumas siderúrgicas estão testando aumentar o teor de Cálcio na escória do alto forno, para fabricar diretamente um cimento tipo Alto forno, para uso imediato, sem misturas.

Vale lembrar que nos U.S.A, **92%** dos cimentos produzidos são Cimento Portland, CPI e CP II, sem escória, somente Clinquer puro. A escória é usada e misturada pelo consumidor se ele assim o desejar..



11 - ABCP – Arnaldo Forti Battagin – Dezembro 2008 – Palestra no I.M.E. – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro / RJ (Continuação)

Especificações normativas cimentos brasileiros

Cimento Portland	Sigla	Classe	Clinker + Gesso	Escória (E)	Pozolana (Z)	Filer (F)
Comum	CP I	25 32 40	100 %	0		
	CP I-S	25 32 40	99-95	1-5		
Composto	CP II-E	25 32 40	94-56	6-34	0	0-10
	CP II-Z	25 32 40	94-76	0	6-14	0-10
	CP II-F	25 32 40	94-90	0	0	6-10

Cimento Portland	Sigla	Classe	Clinker + Gesso	Escória (E)	Pozolana (Z)	Filer (F)
Alto Forno	CP III	25 32 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP IV	25 32	85-45	0	15-50	0-5
Ari	CP V	---	100-95	0	0	0-5

Área específica Blaine (cm²/g)

	CP I-S	CP II-F-32	CP II-F-32	CP II-E-32	CP III-32	CP III-40	CP IV-32	CP V-ARI	CP V-ARI RS
média	3700	3798	4400	3846	3819	4082	4851	4660	4856



Pavimentos :

Pavimentos de concreto, feitos com os cimentos atuais, com alto teor de C3S, terão fissuras causadas por um **resfriamento rápido** do concreto, logo após seu **forte aquecimento inicial**, causado pela rápida hidratação do cimento.

Fissuras surgem também por retração plástica devido à perda de fluidez causada pela perda de água nas primeiras horas, como as mostradas na figura abaixo.

Excesso de escória nos cimentos também aumentam em muito a ocorrência de fissuras por retração plástica, pois as escórias permanecem sem reagir quimicamente por diversas horas. Nesse período funcionam como “areias de alto forno” como a denominam os alemães. Nesse período “são areia” e não dão “liga”.



Pouco adianta o uso de películas e resinas impermeabilizantes, pois essas apenas reduzem a retração hidráulica, por perda de água para a atmosfera.

A retração térmica, por resfriamento, não é evitada. O problema é apenas reduzido, mas continua existindo. A prova disso? Inúmeros pavimentos rodoviários de concreto, recentemente executados, estão fissurados e muitos já foram totalmente refeitos, tais os estados de fissuração que apresentavam.

Enquanto não for mudado o tipo de cimento, para um cimento de muito baixo calor de hidratação, pouco mudará nesse panorama.

Para evitar a fissuração por retração térmica, por resfriamento, seria indispensável manter protegida a superfície do atuais concreto, por barreiras isolantes térmicas. Isso atrapalha e retarda o método executivo e é evitado pelos construtores.



Alternativa : Uso de caminhões betoneiras pré-refrigerados, com o concreto contendo gelo em flocos, com a manutenção da temperatura baixa do concreto por meio de serpentinas contendo água de refrigeração etc... É tão caro que é inviável economicamente.

Solução prática e simples é o cimento com baixo teor de C₃S e C₃A e com grãos bem maiores que os atuais. Cimentos menos moídos.

Sugiro também o limite : $C_3S + 4.75.C_3A \leq 80$

Lembrete: Retração! Deve ser evitado o uso indiscriminado dessa palavra. Para muitos é uma palavra mágica. Explica tudo. Mas ... que retração ? Retração química, retração plástica, retração autógena, retração térmica, retração hidráulica? Qual delas? Poucos sabem a diferença, mas muitos usam a retração como a causa de todos os problemas do concreto. É bom distinguir muito bem uma das outras, pois para cada uma delas há um antídoto diferente.

...”

Medidas para reduzir as fissuras no concreto armado: E.Thomaz

Acompanhando a sugestão do Eng. Walton Pacelli sugere-se não usar mais que 400kg de cimento por m³ de concreto.

Usar concreto frio – Em geral recomenda-se : Temperatura de lançamento < 15°C.

O Eng. Walton Pacelli sugere 10°C.

Para isso usar gelo em flocos na água de mistura.

Resfriar o concreto já lançado. Solução limite: Fazer circular água gelada em serpentinas, no interior do concreto.

Conforme sugere o Eng. Walton Pacelli (Furnas) não se deve deixar a temperatura do concreto ultrapassar os 60°C.

Esse limite, de 60°C além de criar problemas de retração térmica, na primeiras horas, gera um outro problema que é a *formação atrasada de etringita*, causando desagregação do



concreto anos após. É a chamada “*Delayed Etringite Formation*”, que surge em peças pré-moldadas curadas com vapor de água com temperatura igual ou superior a 60°C.

11- Resumo: Sugestões de Prof. Eng. Eduardo Thomaz para eliminar as fissuras nas paredes de concreto armado:

Refrigerar fortemente o concreto antes do lançamento e durante o endurecimento inicial.

Usar formas de madeira com duas folhas formando uma câmara interna de ar confinado. Esse ar confinado serve como isolamento térmico.

O resfriamento é muito mais lento e o concreto tem tempo para ganhar resistência à tração.

Medir a temperatura interna do concreto com termo-pares.

Só retirar as formas após uma redução lenta da temperatura no concreto, e quando a diferença entre a temperatura do concreto e a temperatura do meio ambiente for menor que 15°C..

Não usar formas de aço. Resfriam muito rapidamente o concreto.

Especialmente em paredes de reservatórios, usar a taxa das armaduras longitudinais (costelas) igual a 1,6 %, com espaçamento $\approx 7\phi$ nas duas direções, vertical e horizontal.

Todas essas medidas encarecem muito as obras. É mais barato usar um cimento com baixo calor inicial de hidratação. O antigo cimento Tipo I era o ideal.

Esse tipo de cimento existia no Brasil, e era usado sem causar qualquer problema. Foi abandonado apenas porque endurecia lentamente. No passado, grandes obras foram feitas no Brasil com esse cimento e se encontram em perfeito estado.

Um cimento desse tipo está sendo usado na China. É o chamado cimento HBC, com Alto Teor de Belita, (C2S), O calor de hidratação é baixo.

Esse cimento produzido na China é semelhante ao cimento IV ASTM C 150, produzido há muitas décadas nos USA, e que hoje é produzido por encomenda.

Observação:

O cimento tipo IV ASTM C 150 é conhecido por seu baixo calor de hidratação.

Sua composição típica é: 28% (C3S), 49% (C2S), 4% (C3A), 12% (C4AF), 1.8% MgO, 1.9% (SO3).

A resistência se desenvolve lentamente. Após alguns meses, no entanto, a resistência é maior que a dos outros cimentos. Esse cimento é usado para estruturas com muito concreto, como barragens.

Para pavimentos de concreto, também é recomendado.

Recentemente está sendo adicionada pozolana ao cimento tipo II ASTM, para tentar substituir o cimento tipo IV ASTM, pois o custo fica menor.

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

Com esse índice muitos cimentos atuais não são aceitos.

Passa também a ser exigido, na produção dos cimentos, o ensaio de calor de hidratação, para certificação dos cimentos.



+ + +

12 - Prof. Paulo J. M. Monteiro - *Recomendações feitas na revista "Concrete International " Novembro 2001.*

“ ... Concreto com pouca elevação de temperatura nas paredes. . .

Concretagem de madrugada, antes da 5h, terminando antes das 9h da manhã.

Concreto *ready-mixed*, com cimento de baixo teor de C3A (4%)

Cinza volante (*Fly ash classe F*) - 15% em substituição ao cimento.

Resfriar os agregados com água fria antes da mistura.

Concreto com água gelada e com gelo em flocos

Temperatura de lançamento do concreto $\leq 19^{\circ}\text{C}$.

Temperatura ideal no lançamento do concreto = 15°C .

Caminhões já refrigerados antes do carregamento com concreto.

Formas de madeira mantidas no mínimo 2 ½ dias após a concretagem.

Formas de madeira mantidas até que a temperatura do concreto diminua, ficando apenas 15°C acima da temperatura do ar ambiente.

Para isso, medir a temperatura interna do concreto com termo-pares

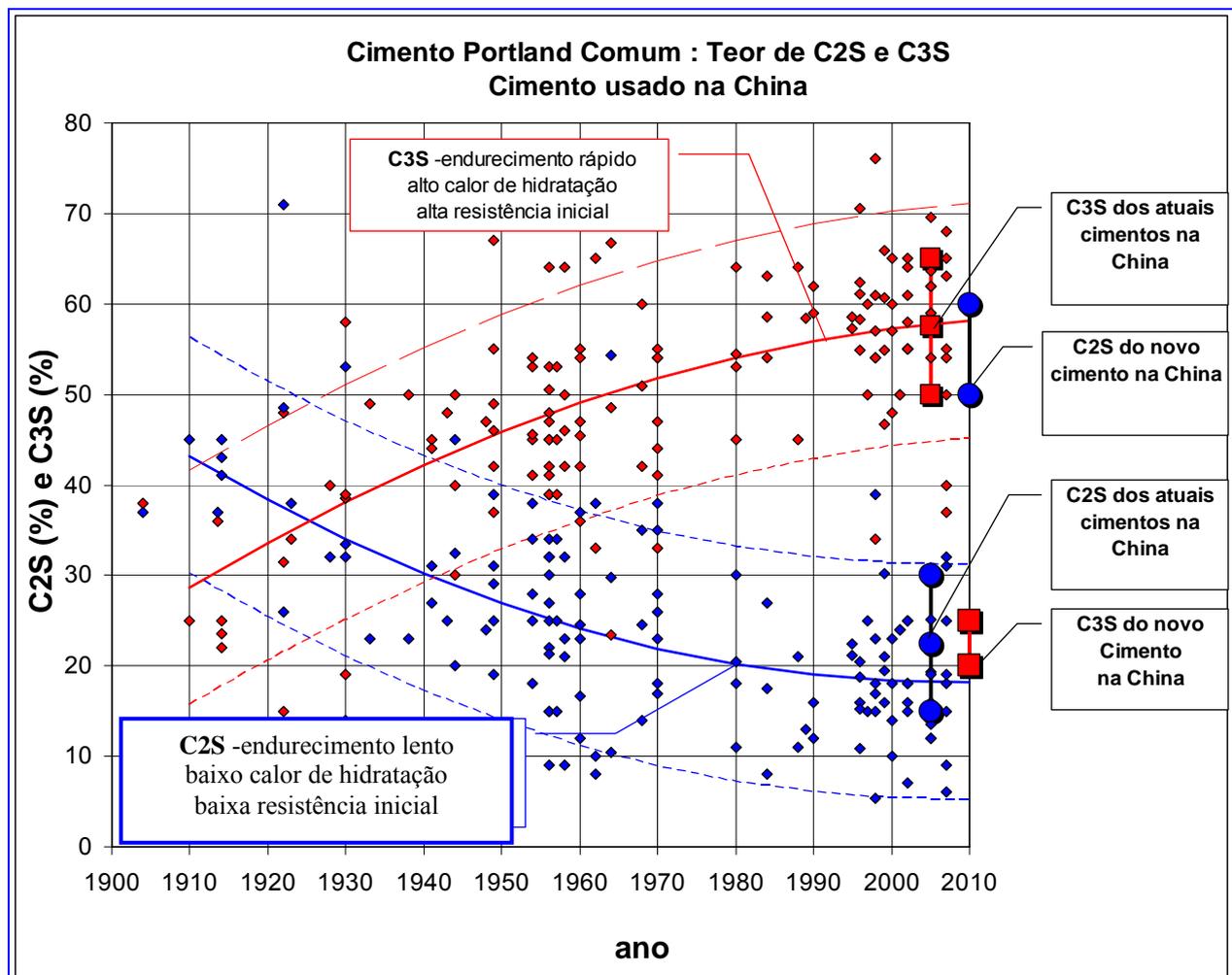
...”

+ + +



13 - HBC - Cimento com alto teor de Belita (C2S) e baixo calor de hidratação.

1. Está havendo uma tendência crescente de utilizar os cimentos (HBC) com Alto Teor de Belita (C2S).
2. A China está sendo a pioneira nesse movimento. Sua produção de cimento é enorme, 20 vezes maior que a do Brasil, e como resultado, exercerá uma grande influência na indústria mundial do cimento.
3. Ver: “A Comparison of HBC & MHC Massive Concretes for Three Gorges Project in China” - T.Sui, J.Li, X.Peng, W.Li, Z.Wen, J.Wang and L.Fan [37]- 2006.



O novo cimento HBC (High Belite Cement), usado na China para reduzir o calor de hidratação, tem um baixo teor de C3S (Alita = 20% a 25%) e um alto teor de C2S (Belita = = 50% a 60%).

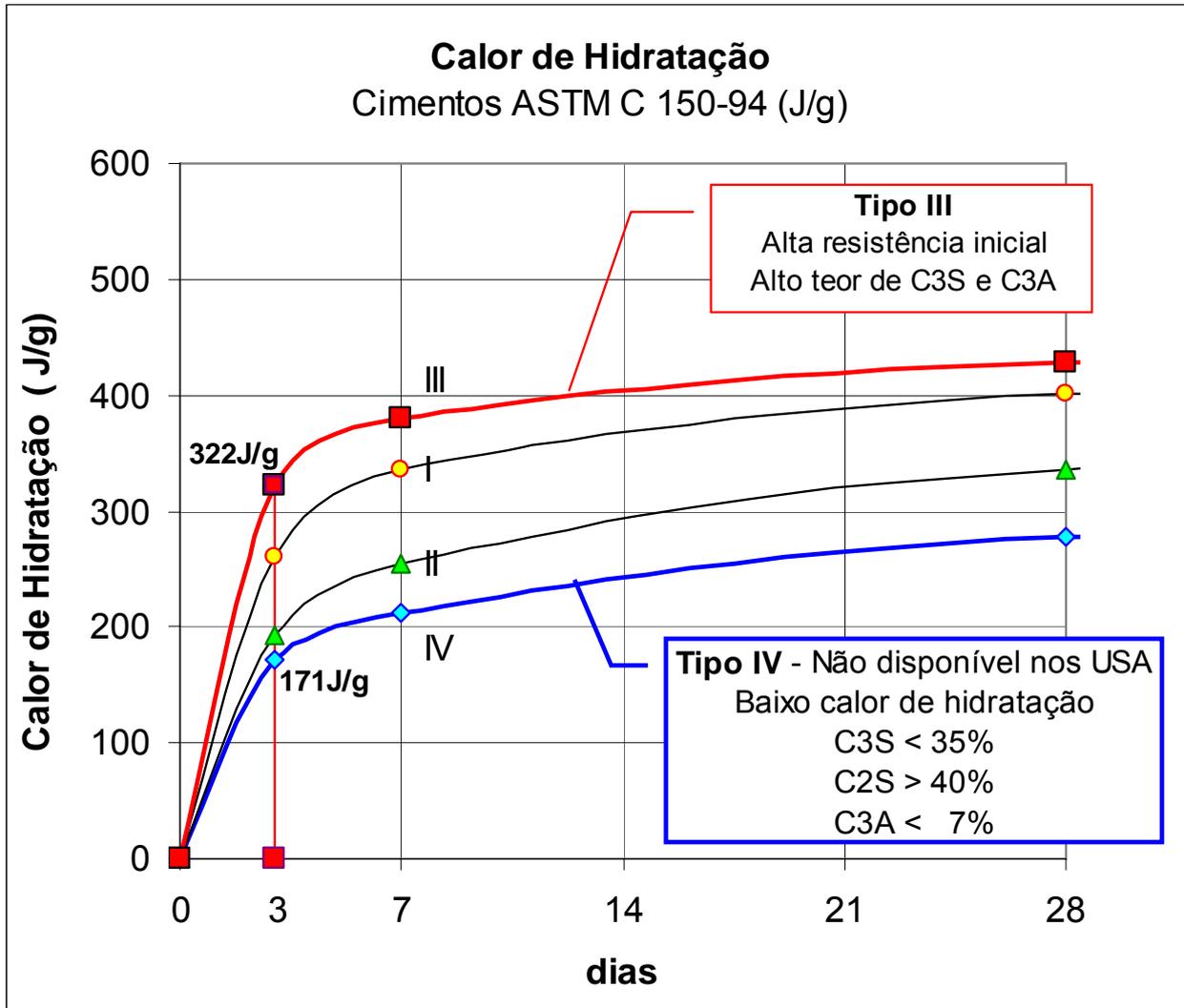
É o inverso dos cimentos atuais. Ver a figura acima.

Os teores de C3S e de C2S do cimento HBC são teores semelhantes aos teores dos cimentos de muitas décadas atrás, como os cimentos IV ASTM, que não causavam problemas de fissuração na fase inicial de endurecimento dos concretos.



14a - ACI Committee 225 1991 Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements.
- James S. Pierce - Geoffrey Frohnsdorff.- Sidney Diamond

“ Como o cimento é o componente mais ativo do concreto, e em geral tem o mais alto preço unitário, a sua escolha e o seu uso são importantes para se obter o equilíbrio entre as propriedades e o custo desejado para um dado traço de concreto”.



A idéia básica é o uso de cimento com baixo calor de hidratação.

Como indicado, o cimento IV, com baixo calor de hidratação, tem um teor de C3S baixo e um teor de C2S maior que o dos demais cimentos.



15-China - Comparação entre a composição química do Cimento Portland Usual (PC) e do Cimento Portland com Alto Teor de Belita (HBC). *Ver: Tohgbo Sui [39] - 2004*

Observa-se, no quadro abaixo, que a composição química total é quase idêntica. A única diferença está na fabricação dos cimentos (temperatura do forno, tempo no forno, velocidade de resfriamento do clínquer...).

Os silicatos formados, C3S e C2S, estão em proporções diferentes do cimento PC.

Cimento	Composição química %					Silicatos	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	C3S alite	C2S Belite
HBC <i>Portland High Belite Cement</i>	24,98	4,54	5,17	61,98	1,38	24,64	52,96
PC <i>Portland usual na China</i>	22,29	5,36	3,42	65,35	1,13	52,36	23,49

O cimento HBC, com alto teor de Belita, tem menor elevação de temperatura $T \approx 29^{\circ}\text{C}$.

O cimento PC, Portland Usual, tem $T \approx 36^{\circ}\text{C}$.

A menor elevação de temperatura reduz em muito os problemas por fissuração na fase inicial de endurecimento do concreto, quando ocorre o resfriamento.

A figura mostra a elevação adiabática de temperatura do Cimento Portland Usual (PC) e do Cimento Portland com Alto Teor de Belita (HBC) na China.

A resistência à fissuração do cimento HBC é grande.

No Brasil, esse tipo de cimento também deverá ser colocado no mercado.

Melhor, deverá ser recolocado, pois esse cimento é muito semelhante ao nosso antigo cimento, que não causava problemas de fissuração nas obras como os atuais cimentos.

16- Ivan Odler – Cimento Portland com elevado teor de C2S – “Special Inorganic Cements”
– Série Modern Concrete Technology-8 - E&FN SPON -2000 - London .

“... ”

Aguns cimentos Portland podem conter elevado teor de belita C2S , tendo em consequência teor mais baixo de alite C3S.

Definição do Fator de Saturação de Cal = F.S.C.

Sendo: Cal = C = CaO ; Sílica = S = SiO₂ ; Alumina = A = Al₂O₃ ; Ferrita = F = Fe₂O₃

Se $A/F > 0,64$
$$\text{F.S.C.} = \frac{C}{2,8 \times S + 1,1 \times A + 0,35 \times F}$$



$$\text{Se } A/F < 0,64 \quad \text{F.S.C.} = \frac{C}{2,8 \times S + 1,1 \times A + 0,7 \times F}$$

Nos cimentos Portland comum F.S.C. > 0.90.

Com o F.S.C. na faixa de 0,97 a 1,00 o clínquer é difícil de “queimar” e o clínquer apresenta excessivo teor de cal livre CaO.

Para produzir esses cimentos com alto teor de belita C2S, o fator de saturação de cal das matérias primas deve ser reduzido para valores entre F.S.C = 0,80 e 0,90.

Cimentos com F.S.C. ainda menor que 0.80, que contém muito pouco ou mesmo nenhuma alite C3S, são chamados de cimentos belíticos.

As matérias primas para fabricar cimentos com alto teor de C2S são fáceis de “queimar” e o consumo de energia é menor, principalmente devido ao baixo teor de CaCO₃.

É possível reduzir a temperatura de “queima” em até 100°C, se comparada com a queima de um clínquer de cimento Portland comum.

A emissão de NO e NO₂ para a atmosfera fica também reduzida.

A moagem do clínquer é também mais fácil. A dificuldade de moagem cresce na ordem : gesso (CaSO₄) → alita (C3S) → aluminato (C3A) → ferrita (C4AF) → belita (C2S) .

Devido à baixa reatividade da belita, a taxa de hidratação do cimento fica menor.

Devido à baixa reatividade da belita, o desenvolvimento da resistência até os 90 dias – 180 dias fica menor.

Por outro lado a resistência final (365 dias)do cimento Portland com alto teor de belita C2S pode ser maior que a de um cimento Portland comum, porque se forma mais C-S-H e menos Portlandita Ca(OH)₂ .

A principal característica das pastas de cimento feita de cimentos com teor elevado de belita C2S é o seu baixo conteúdo de hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂ , Portlandita. Isso melhora a resistência dessas pastas endurecidas à corrosão química.

A profundidade da carbonatação aumenta, no entanto.

A quantidade total de calor liberado na hidratação diminui quando se aumenta o teor de C2S.

A taxa de liberação do calor é menor. Essa taxa de liberação de calor pode ser ainda mais diminuída se for feita uma moagem do clínquer com grãos maiores.

Relacionando o crescimento da resistência e a liberação de calor na hidratação observa-se que o crescimento da resistência por unidade de calor liberado é maior nos cimentos com alto teor de C2S.

A finura *Blaine* dos cimentos comuns varia de 280m²/kg a 350 m²/kg

A finura *Blaine* dos cimentos de alta resistência inicial varia de 450m²/kg a 500 m²/kg

A maior finura que se consegue com métodos mecânicos é de 1200 m²/kg. Não é prático produzir cimentos com essa finura , pois a moagem seria cara. A reatividade do cimento seria muito elevada e o cimento exigiria quantidade muito elevada de água.

...”



17- Cimentos na Índia

D. Srinivasan - Secretary General - Indian Concrete Institute, Chennai. [72] e [73]

“...
...

Antigamente havia apenas um tipo de cimento Portland na Índia.

Mais tarde, foram introduzidos os cimentos com cinzas das usinas térmicas e cimentos com escórias das aciarias. Esses cimentos têm baixo calor de hidratação e crescimento lento da resistência. Em 1982, esses cimentos eram 76% da produção total.

Após a abertura do mercado indiano a todas as empresas multinacionais produtoras de cimento, em 1992, a produção desses cimentos ficou reduzida a 30% do total.

Passaram, então, a ser produzidos outros tipos de cimento, cada fabricante mostrando seu produto como o melhor.

Cimentos de alta resistência passaram a ser considerados como os melhores, devido ao agressivo marketing dos fabricantes e devido à presunção de que o calor gerado durante o endurecimento era um índice da qualidade. *Quanto mais quente melhor.*

Os usuários acreditaram que o cimento assim era melhor, mas não é assim.

Os cimentos de baixo calor de hidratação e, portanto, com baixas resistências iniciais, foram eliminados do mercado.

As pesquisas e a experiência têm mostrado, no entanto, que os concretos com esses cimentos de baixo calor de hidratação são os mais duráveis.

O cimento com cinzas ou com escórias de aciaria, são lentos, mas não são cimentos inferiores.

Na verdade o crescimento da resistência é lento, mas no longo prazo a resistência atinge os mesmos valores que os cimentos comuns.

Os construtores preferem cimentos com aumento rápido da resistência, pois liberam os escoramentos e as formas, acelerando os cronogramas.

Em resumo, os concretos com cimentos de baixo calor de hidratação são mais duráveis e ao longo do tempo a resistência aumenta, atingindo ou até ultrapassando as resistências dos demais cimentos.

Os concretos feitos com cimentos de alta resistência inicial pressupõem o uso de aços de alta resistência e trabalhando com grandes alongamentos. Isso gera grandes fissuras e alto grau de corrosão das armaduras. *A metalurgia moderna também precisa ser revista para que os aços das armaduras sejam tão resistentes à corrosão quanto os aços antigos.*

”
...



18 - Conclusões :

Comparando com os concretos antigos, os concretos modernos tendem a fissurar mais facilmente.

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.

O componente do cimento C3S, com grande calor de hidratação, está em quantidade cada vez maior no cimento Portland, em detrimento do C2S.

Os cimentos atuais, por serem mais finos que os antigos se hidratam mais rapidamente, liberando calor muito mais rápido. Não é necessário ter grãos de cimento tão finos.

Por causa desses diversos fatores surge um calor excessivo nos concretos. Ao resfriar, o concreto retrai e fissa.

A relação entre a resistência aos 28 dias e a resistência aos 7 dias diminuiu muito. Para um concreto com fator água cimento de 0.60, essa relação valia 1.60, antes de 1950. Em 1980 essa relação caiu para 1.30. Para fatores água/cimento menores que 0.60, atualmente em uso, essa relação, é ainda menor.

O crescimento da resistência, após os 28 dias, é muito reduzido, de modo que esse crescimento não é confiável no projeto de estruturas.

O controle da resistência do concreto aos 28 dias, nas obras, estimula o uso de cimentos com alta resistência inicial. Deveria ser criado também o controle da resistência aos 90 dias.

Muitos cimentos, que são considerados comuns hoje em dia, eram considerados de endurecimento rápido poucas décadas atrás.

Pavimentos de concreto, feitos com os cimentos atuais, com alto teor de C3S, terão sempre muitas fissuras causadas por um resfriamento rápido do concreto, logo após seu forte aquecimento inicial, causado pela rápida hidratação do cimento.

O tempo de pega deveria ser bem especificado e obedecido, com pequena margem de variação. Como está, o início e fim de pega entre 1 hora e 12 horas, é inadmissível. Nesse intervalo de tempo tudo é permitido acontecer. Nada é possível planejar.

Caso contrário continuarão a ocorrer grandes problemas na execução de pisos sobre o solo, pavimentos de concreto e de peças estruturais com grandes quantidades de concreto.

Não foram previstas as conseqüências de produzir um cimento mais resistente, porque os construtores estavam interessados em explorar a alta resistência inicial dos cimentos, e também porque as especificações foram elaboradas tendo por base apenas a resistência aos 28 dias.

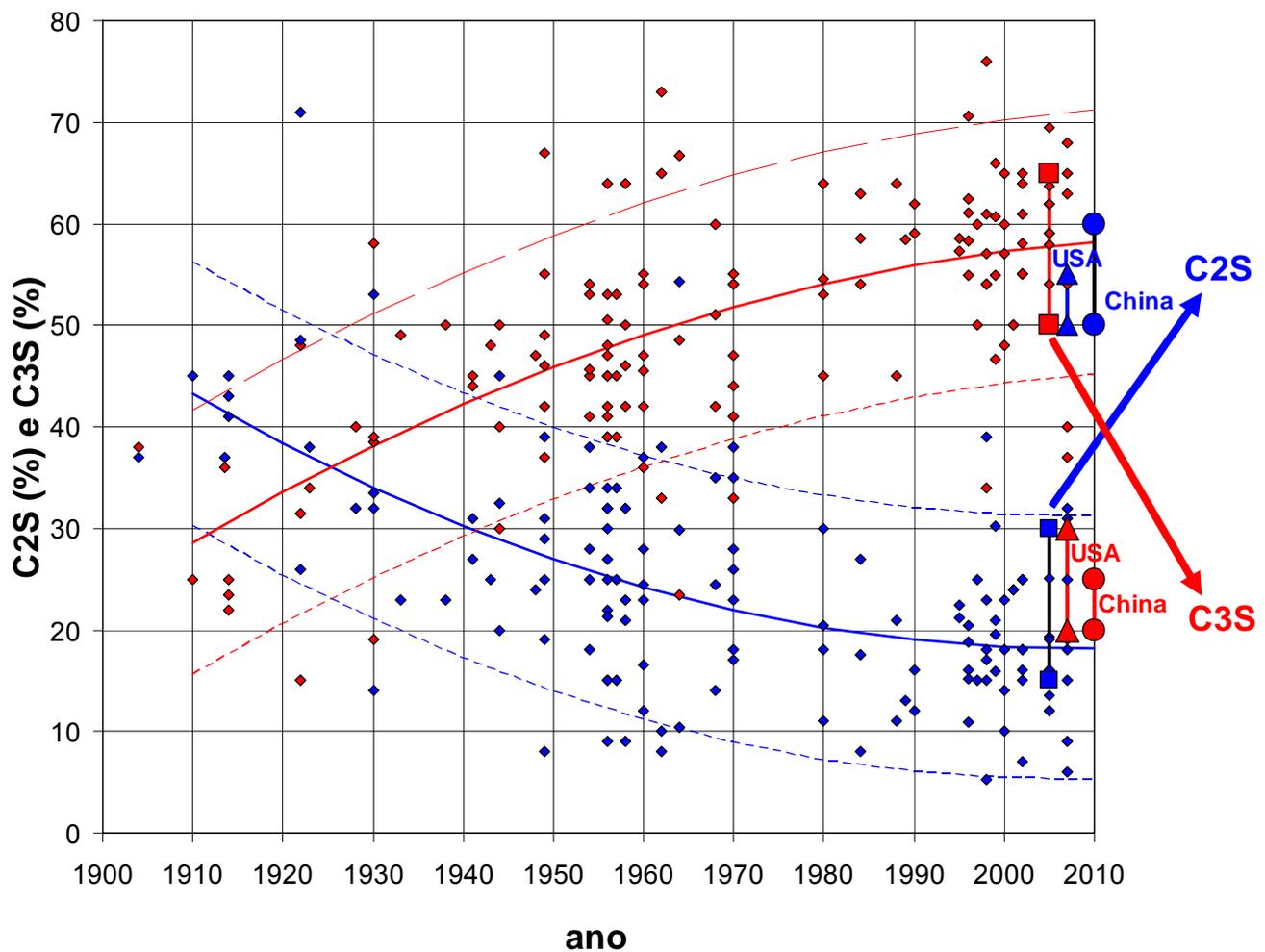
O concreto moderno é um concreto mais poroso e menos durável. Para tentar melhorar a durabilidade das obras, aumentam-se os cobrimentos das armaduras. As dimensões da estrutura crescem. Isso é custo adicional. Quem paga?



Aumentam as manifestações patológicas e ações na justiça em defesa do consumidor, acarretando o aumento de gastos com manutenção e indenizações aos usuários das obras.

Obras antigas, em perfeito estado, contrastam com obras vizinhas, construídas recentemente e já deterioradas.

Ou mudam os cimentos, ou os processos de execução das obras ficarão cada vez mais difíceis, sofisticados e caros, ou as obras de concreto continuarão a se deteriorar rapidamente.



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. O cimento tipo IV é pouco usado, pois demora a ganhar resistência.

Verifica-se que o *novo* cimento chinês, mostrado com círculos, é semelhante ao cimento americano de baixo calor de hidratação, e que também tem baixo teor de C3S e alto teor de C2S.

O cimento tipo IV ASTM C 150 é conhecido por seu baixo calor de hidratação.

Sua composição típica é: 28% (C3S), 49% (C2S), 4% (C3A), 12% (C4AF), 1.8% MgO, 1.9% (SO3).



A resistência se desenvolve lentamente. Após alguns meses, no entanto, a resistência é maior que a dos outros cimentos. Esse cimento é usado para estruturas com muito concreto, como barragens.

Para pavimentos de concreto, também é recomendado.

Recentemente está sendo adicionada pozolana ao cimento tipo II ASTM, para tentar substituir o cimento tipo IV ASTM, pois o custo fica menor.

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

Com esse índice muitos cimentos atuais não são aceitos.



19 Sugestões

Sugestão aos fabricantes dos cimentos :

Diminuir o teor de C3S !

Aumentar o teor de C2S !

Usar cimentos com grãos menos finos !

Apresentar nos sacos de cimentos as características que interessam aos engenheiros construtores..

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

Exemplo :

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

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

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

Sugestão aos construtores :

Usar cimentos com alto teor de C2S e baixo teor de C3S !

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 e depois do lançamento nas formas !



Pavimento de concreto
Programa HIPERPAV
Federal Highway Administration

INPUT

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

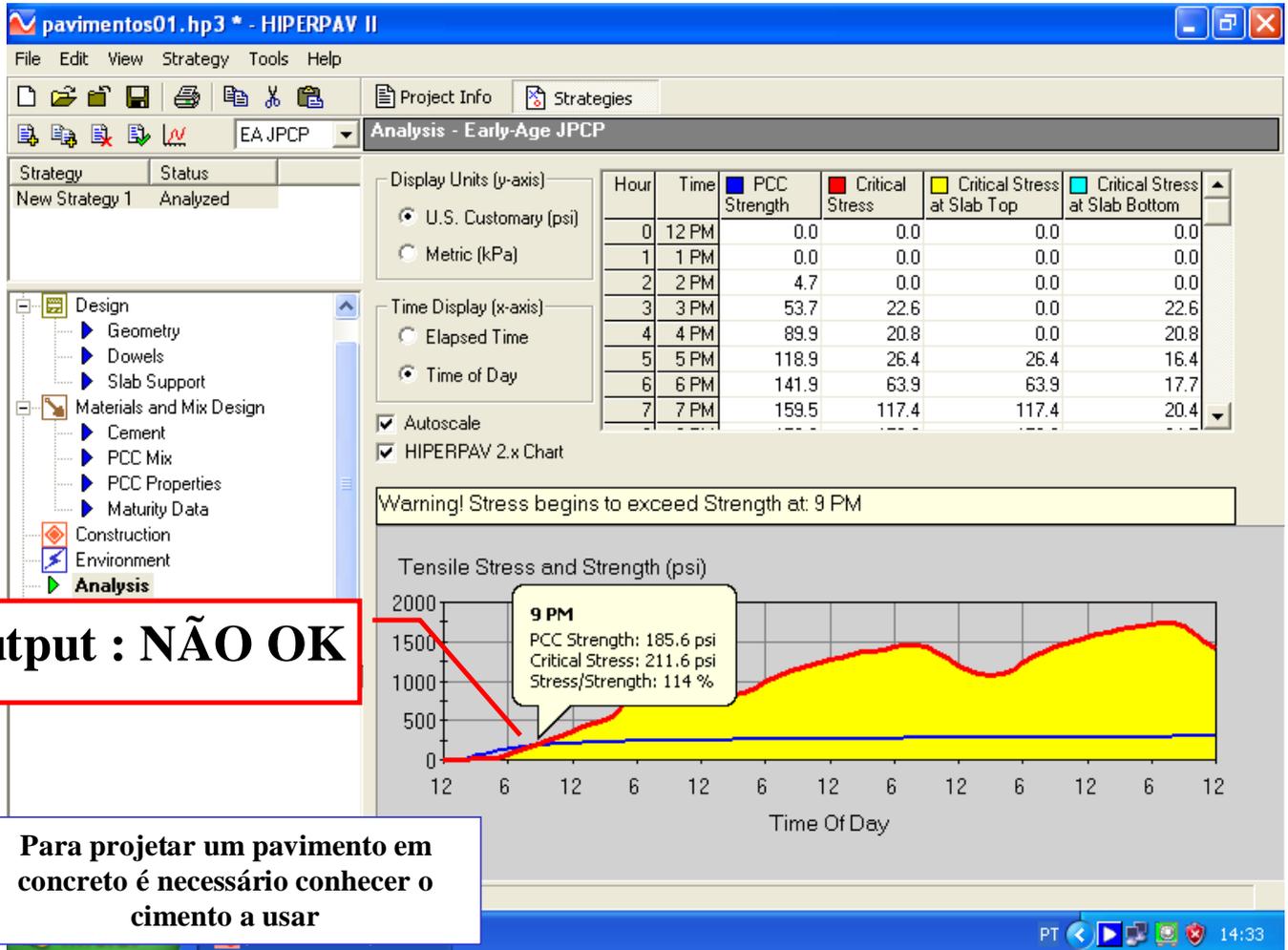
Blaine Fineness Index: 381 m²/kg

Output : OK

Hour	Time	PCC Strength	Critical Stress	Critical Stress at Slab Top	Critical Stress at Slab Bottom
0	12 PM	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1 PM	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2 PM	0.0	0.0	0.0	0.0
3	3 PM	0.0	0.0	0.0	0.0
4	4 PM	2.9	0.0	0.0	0.0
5	5 PM	24.4	8.4	8.4	0.0
6	6 PM	42.6	22.2	22.2	0.0
7	7 PM	57.5	35.5	35.5	0.0

1 PM
PCC Strength: 164.7 psi
Critical Stress: 44.4 psi
Stress/Strength: 27 %

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



Output : NÃO OK

Tensão atuante maior que a resistência à tração!



Sugestão complementar para normalização dos cimentos :

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

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)
2h 20min ± 15min	4h 20min ± 15min	300

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

*Em **negrito**, nas tabelas acima, os informes recebidos de uma empresa.*



Comentários mais recentes – 2009

Prof. Péricles B. Fusco.

Qual é a composição mineralógica dos cimentos nacionais?

Qual a influência do calcário colocado no saco do material vendido como cimento? Quem regula a finura desse produto?

Além de tudo que ocorreu no mundo, precisamos urgentemente de uma análise do que é feito no Brasil. Todas as tentativas que fiz para receber informações corretas foram decepcionantes.

Basicamente, temos dois problemas de durabilidade das estruturas.

- Um deles refere-se ao longo da idade.

Sempre disse que o ideal é a existência de uma pequena fração de material cimentício não hidratado.

Ele se constituiria no sistema imunológico do concreto. As fissuras mecânicas poderiam ser colmatadas, pelo menos no imediato entorno das barras da armadura. Mas isso exigiria grãos de cimento não tão finos e equilíbrio C3S e C2S.

É preciso empregar a tecnologia a favor da construção e não para dar o lucro máximo aos produtores de cimento

- O segundo problema é a fissuração nas primeiras idades devidas ao que se chama de retração.

Novamente é preciso especificar o material com que se quer construir as estruturas de concreto, e como devem ser os processos construtivos para que eles atendam aos interesses da construção e não do construtor.

No fundo tem-se um problema de cidadania. É como se os remédios não fossem feitos para curar doenças e sim os doentes deveriam se conformar em sarar apenas das doenças curáveis com os remédios que os produtores põem no mercado em função de seus interesses.

*Cabe a quem cuida das estruturas dizer o que quer do cimento.
Será possível chegar-se lá um dia?*



51º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON - Curitiba 2009

- Prof. Antonio C R Laranjeiras - Salvador, BA 15/10/2009

“ ...

Para ser mais claro, pela ordem,

*-minha primeira expectativa ou desejo é que o tema do Workshop "**Quando não se atinge o fck especificado, em obras**", tomasse como referência e objeto a realidade do conhecimento de todos, de que o concreto que vem sendo fornecido às muitas obras, em diversas capitais, apresenta inequívocas, numerosas e graves não conformidades, a exigir uma séria discussão.*

-Em segundo lugar, quais providências institucionais e confiáveis pode a Engenharia tomar, acima do corporativismo da ABCP, que nos permita auditar, externa e adequadamente, a qualidade do cimento fornecido às concreteiras.

-Em terceiro, lugar, o mesmo acima, sem o corporativismo da ABESC, em relação à auditoria externa das concreteiras.

-Em quarto lugar, como promover e estimular a perseguição da qualidade, na indústria do cimento e nas concreteiras.

Uma das formas, hoje, internacionalmente usadas com essa finalidade é a da Premiação e da Penalização, que poderia ser amplamente discutida.

“ ...”

-Prof. Ernani Diaz – Rio de Janeiro , RJ 16/10/2009

“...

Somos nós os projetistas que podemos analisar melhor que os tecnólogos de concreto a segurança de uma obra, pois somos holístas, entendemos o que significa variabilidade de resistência, da variabilidade das ações, da segurança da obra, das combinações de cargas e da sensibilidade da estrutura quanto aos problemas de resistência do concreto.

“ ...”

+++



- Prof. Eduardo Thomaz: 2009

Como resultado da análise que fiz sobre a evolução ao longo dos anos do cimento no Brasil, e com base em minha vivência em projetos e obras por ininterruptos 50 anos afirmo que:

Cada vez mais C3S, mais escória para reduzir o calor e o custo, mais finura para aumentar a resistência inicial,...

O cimento mudou muito e por isso os métodos construtivos são cada vez mais caros.

Para conviver com os atuais cimentos, as obras precisam de métodos caros de execução, como, por exemplo, resfriamento do concreto, antes, durante e após o lançamento.

Usa-se mais armadura de “pele” para reduzir as fissuras de retração...

Os blocos de fundação são armados em todas as faces, para reduzir fissuras...

Os problemas nas obras vão num crescendo,

- 1. muito calor de hidratação,*
- 2. muita escória misturada funcionando como areia nas primeiras horas,*
- 3. muitas fissuras prematuras.*

Nossas obras vão mal, com muitos problemas de fissuras e de durabilidade.

Em resumo:

P.B.Fusco : Cabe a quem cuida das estruturas dizer o que quer do cimento.



Referências

1. Ary Torres – Introdução ao Estudo da Dosagem Racional do Concreto- Associação Brasileira de Cimento Portland – 1955
2. Ary Torres – Carlos Eduardo Rosman - Método para Dosagem Racional do Concreto- Associação Brasileira de Cimento Portland – 1956
3. Prof. P. Kumar Mehta & Richard W. Burrows - *Building durable structures in the 21st century* – July 2001 – The Indian Concrete Journal
4. Prof. P. Kumar Mehta - *Concrete technology for sustainable development* – ACI - Concrete International - November 1999 , Vol. 21 , No 11, pp 47-53
5. ASTM- Standard Specification for Portland Cement – C150 - 94
6. Walton Pacelli de Andrade – Laboratório de Furnas - O controle do Concreto na Barragem do Funil -1969
7. Walton Pacelli de Andrade – Laboratório de Furnas - Investigação e Controle do Concreto para a Usina Nuclear de Angra dos Reis – Angra 1 – 1978
8. Walton Pacelli de Andrade – Laboratório de Furnas - Concreto Massa para a Usina Nuclear de Angra dos Reis – Angra 2 – Estudo de Dosagens - 1981
9. Walton Pacelli de Andrade – Furnas Laboratório de Concreto – Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaio e Propriedades. – Pini – 1997
10. F.M. Lea - *The chemistry of Cement and Concrete* –First edition 1935- Third edition - 1970 –Chemical Publishing Co. Inc.-New York
11. Peter C. Hewlett - *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* - First edition 1935 - Fourth Edition 1998 – Arnold – John Wiley
12. Gildasio Rodrigues da Silva – Manual de Traços de Concreto – 3ª edição 1975 – Livraria Nobel S.A. / SP
13. Caldas Branco – Traços de Concreto – 1950 – Régua de Cálculo
14. Francisco Rodrigues Andriolo – Construções de Concreto – Manual de Práticas para controle e Execução – PINI – 1984
15. Adam M. Neville – *Properties of Concrete* – 1985-Addison Wesley
16. Adam Neville – *Cement and Concrete: Their Interrelation in Practice* - *Advances in Cement and Concrete* – 1994 - Editors : Michael W. Grutzeck and Shondeep L. Sarkar. – American Society of Civil Engineers.
17. L. A. Falcão Bauer – *Materiais de Construção 1-* 5ª edição -1995 – LTC - Livros Técnicos e Científicos / RJ
18. Eládio G. Petrucci – *Concreto de Cimento Portland* – 1968 – ABCP ; 1971 – Editora Globo
19. Donald A. St. John , Alan W. Poole, and Ian Sims – *Concrete Petrography – A handbook of investigative techniques* – First edition 1998 - Arnold - John Wiley – New York
20. Paulo Helene , Paulo Terzian – *Manual de Dosagem e Controle do Concreto-* Pini 1995



21. Paulo Helene - Por quê trabalhar com concretos de resistências mais elevadas que as atuais. – SindusCon / SP - Campinas 2003
22. Portland Cement Association – PCA – Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff and William C. Panarese - Design and Control of Concrete Mixtures – 14th edition.- 2005
23. J.Bensted and P.Barnes – Structure and Performance of Cements.- 2nd edition – Spon Press - 2002
24. Sidney Mindess, J. Francis Young , David Darwin –Concrete – 2nd edition – Prentice Hall – 2002
25. Ivan Odler – Special Inorganic Cements- modern Concrete Technology-8 E&FN SPON - 2000 - London
26. Holdercim Brasil AS – José Eduardo Kattar, Nilton Jorge Almeida – Cimento Portland – Santo André /SP – 1997
27. H.F. Taylor – Cement Chemistry – 2nd edition Thomas Telford- 1998
28. Bogue, Robert Herman – The chemistry of Portland Cement – 2nd edition 1955 – Reinhold Publishing Corporation
29. F. L. Lobo Carneiro – Dosagem de Concreto – 1953 - INT / RJ
30. V.S. Ramachandran , James Beaudoin – Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology – Noyes Publications – New Jersey -2001
31. Jan Skalny , Juraj Gebauer , Ivan Odler – Calcium Hydroxide in Concrete – Materials science of Concrete – American Ceramic Society /SA – 2001
32. Francis Young, Jan Skalny - Materials Science of Concrete VII – The American Ceramic
33. Eduardo Thomaz – Desempenho do concreto geo-polimérico – IME - 2000
34. F. P. Glasser - Thermodynamics of Cement Hydration - Entalpia de Hidratação dos compostos do Cimento - Materials Science of Concrete VII – 2005 - The American Ceramic.
35. Otto Graf – Die Baustoffe – Ihre Eigenschaften und ihre Beurteilung – Konrad Wittwer – Stuttgart – 1950
36. Adam Neville – Cement and Concrete: Their Interrelation in Practice - Advances in Cement and Concrete – 1994 - Editors : Michael W. Grutzeck and Shondeep L. Sarkar. – American Society of Civil Engineers.
37. Maria S. Konsta-Gdoutos (Editor) - Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties: An International Symposium dedicated to Professor Surendra P. Shah, Northwestern University, USA - Springer; 1 edition - July 28, 2006 - *A Comparison of HBC & MHC Massive Concretos for Three Gorges Project in China* T.Sui, J.Li, X.Peng, W.Li, Z.Wen, J.Wang and L.Fan
38. PCA – Portland Cement Association - Research & Development Information PCA R&D Serial No. 2871 - Effect of Cement Fineness and C3S Content on Properties of Concrete: A literature Review. by R. Douglas Hooton, Andrew J. Boyd , Deepti D. Bhadkamka 2005



39. Japan Concrete Institute / Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 2, No. 2, 201-208 - June 2004 / Study on the Properties of High Strength Concrete using High Belite Cement. Tohgbo Sui, Lei Fan, Zhaijun Wen, Jing Wang, Zhonglun Zhang.
40. International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology- 2004 - Development and Research of High Belite Cement Dam Concrete with low heat and high crack resistance.- Lin Jinyu, Peng Xianoping, Cao Jiango, Sui Tongbo, Zhang Chaoran – China Institute of Water Resource and Hydropower Research – China Institute of Building Materials Research , China Three Gorges Construction Corporation General.
41. ACI Committee 225 – 1991 - Guide to the Selection of Hydraulic Cements - Geoffrey Frohnsdorff, James S.Pierce, Sidney Diamond, V.M.Malhotra et all.
42. Eng. Oswaldo Rezende Mendes – CENTRAN – (D.N.I.T. + E.B.) – Relatório sobre Obras de Concreto – 2007
43. A. Kleinlogel , F. Hundeshagen, Otto Graff – *Einflüsse auf Beton – Influências sobre o concreto* - Verlag Wilhelm Ernst & Sohn – 1930.
44. Keil Fritz - *Zement. Herstellung und Eigenschaften* – (*Cimento – Fabricação e Propriedades*) Springer-Verlag 1971. L.J. Vicat - *Mortars and Cements* -1ª edição 1828 – John Weale, Architectural Library - London 1837 – Tradução de J.T.Smith - Reedição 1997 Donhead Publishing Ltd.
46. Locher, Friedrich Wilhem – *Cement - Principles of Production and Use* – Bau+Technik - 2006 – Tradução da edição alemã de 2000.
47. Roland Benedix - *Bauchemie – Einführung in die Chemie für Bauingenieure* – (*Introdução à Química para Engenheiros de Construção.*) - 3ª edição 2005
48. Neville, Adam – *Neville on Concrete – An Examination of issues in Concrete Practice*- Second Edition – Booksurge LLC – 2ªedição – 2006
49. Kurt E. Peray –*Rotary Cement Kiln* – 2nd edition - CHS Press -June 1986
50. Boateng Akwasi A. – *Rotary Kilns – Transport Phenomena and Transport Processes – The Cement Making Process* - Butterworth-Heinemann – Elsevier – 2008.
51. Rufino de Almeida Pizarro – *Concreto: Cimentos, Agregados – Dosagem e Propriedades* – Escola Nacional de Engenharia – Universidade do Brasil - RJ. 1964
52. Dale P. Bentz - National Institute of Standars and Technology , Building and Fire Research Laboratory - “*Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development* “ - J. Am. Ceram.Soc. 80 – 1997
53. Paulo Sá – *Cimentos – 1964* – Citado em *Materiais de Construção* – Prof Rufino de Almeida Pizarro –UFRJ – Escola de Engenharia – 1969.
54. PCA - Portland Cement Association - 2008 – *U.S. and Canadian Cement Characteristics 1950-2004.* - Research & Development Information - PCA R&D SN2879 – - Javed I.Bhatty & Paul D. Tennis .
55. Kayser, W. *The influence of grain size distribution on the properties of slag cements and Portland cements* (em alemão), tese T.H Karlsruhe 1965 - citado em [46].



56. Kuhlmann, K. : *Improvement of energy utilization in cement grinding* (em alemão) ; Tese RWTH Aachen (1985) ; Schriftenreihen der Zementindustrie No. 44 (1985) ; Verein Deutscher Zementwerke e.V. Beton-Verlag GmbH. Dusseldorf. citado em [46].
57. Jochen Stark – Bernd Wicht – *Zement und Kalk – Der Baustoff als Werkstoff* – (Cimento e cal – O material de construção analisado como um material) – F. A. Finger – Institut für Baustoffkunde der Bauhaus – Universität Weimar – Bau Praxis – Birkhauser – 2000
58. Jochen Stark – Bernd Wicht – *Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff* (A durabilidade do concreto – O material de construção analisado como um material) – F. A. Finger – Institut für Baustoffkunde der Bauhaus – Universität Weimar – Bau Praxis – Birkhauser – 2001
59. Richard K. Meade, B.S.– *Portland Cement – Its Composition, Raw Materials, Manufacture, Testing and Analysis* – The Chemical Publishing Company – Easton PA. – 1909.
60. Richard K. Meade, B.S.– *Portland Cement – Chemical and Physical Examination* - The Chemical Publishing Company – Easton PA. – 1901.
61. Myron S. Falk - *Cements, Mortars and Concretes* – Their Physical Properties – New York – M.C. Clark -1904
62. Frederick P. Spalding – *Hydraulic Cement* – Its Properties, Testing and Use. –New York - John Wiley & Sons – 1898
63. Spencer B. Newberry - *How to use Portland Cement* – L. Golinelli – Cement and Engineering News – Chicago – 1899
64. Uriah Cummings – *American Cements* – Boston – Rogers & Manson – 1898
65. Gilbert Richard Redgrave – *Calcareous Cements : Their Nature And Uses With Some Observations Upon Cement Testing.* – London – 1895
66. W. L.Brown - *Elasticity of Portland Cement* - London – 1899
67. Frank B. Gatehouse - *A Handbook for Cement Works Chemists* - London 1908
68. Bertram Blount – *Lectures on Cements* - The Institute of Chemistry of Great Britain and Ireland – London 1912
69. D.B.Butler – *Portland Cement, its Manufacture , testing and use.* E&F.N.Spon London – 1899
70. American Society for Testing Materials – *Report of Committee on Standard Specifications for Cements* – June 1904
71. Henry Reid - *The Science and Art of the Manufacture of Portland Cement* – London – E.& F.N. SPON – 1877
72. Srinivasan , D., Indian Concrete Institute, Chennai – *Which Cement to use ?* http://www.buildnova.com/buildnovav3/articles/htmlfiles/cement_use.htm - India 2008
73. Srinivasan , D. - *Guide for Good Concrete Construction*, Indian Concrete Institute, Chennai 600020 Emeritus Professor, Dept. of Civil Eng., IIT Madras – The Hindu 2008
74. G.C.Bye – *Portland Cement – Composition, Production and Properties* – second edition – Thomas Telford – 1999



75. Lothenbach Barbara, Winnefeld Frank – *Thermodynamic modeling of the hydration of Portland cement*. – Cement and Concrete Research 36 – page – 209-226 – EMPA – Laboratory for Concrete and Construction Chemistry – Switzerland - Elsevier – 2006
76. Lothenbach Barbara, Gwenn Le Saout, Emmanuel Gallucci , Karen Scrivener *Influence of limestone on the hydration of Portland cements*. - Cement and Concrete Research 38 – page – 848-860 – EMPA – Laboratory for Concrete and Construction Chemistry – Switzerland - Elsevier – 2008
77. Johansen, V. , Kouznetzova T.V. : Clinker formation and new processes. 9th International Congress Chem. Cem. New Delhi (1992) Vol. I pp. 49- 79.
78. Samuel Chamecki - Curso de Estática das Construções – Vol. I – pág. 190 e 191 - Editora Científica – RJ – 1956 – citado em revista ESTRUTURA - N^o 1 – Outubro 1957
79. P.C.A –Vagn C. Johansen, Peter C. Taylor and Paul D. Tennis - Effect of Cement Characteristics on Concrete Properties – Engineering Bulletin 226 – 2006
80. P.C.A. – Portland Cement Association - Cements for Use in Concrete – Cement Production , Key Characteristics , Hydration Chemistry , ASTM C 150 , C595, C 1157 – 2004
81. Péricles Basiliense Fusco – Correspondência Privada - 2009
82. Antonio Carlos Laranjeiras – IBRACON 2009-10-30
83. Ernani Dias – Congresso IBRACON 2009

A.M.D.G.