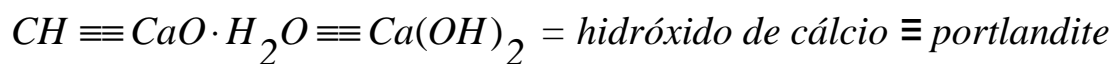
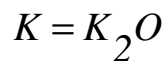
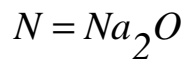
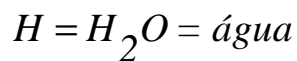
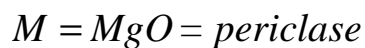
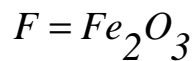
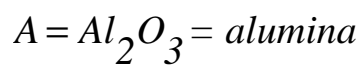
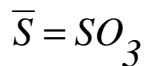
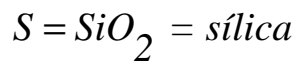
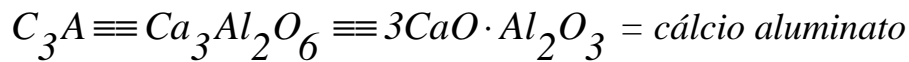
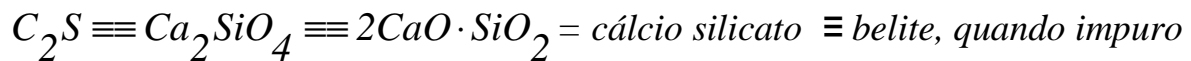
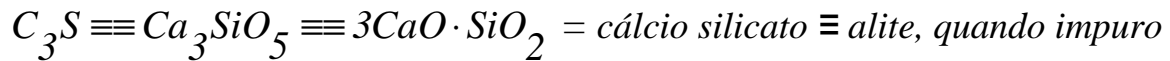




Hidratação do cimento Portland

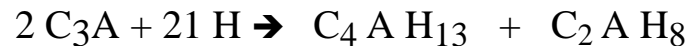
Nomenclatura :





Hidratação do cimento

Ao se misturar a água com o cimento, a reação mais rápida é a hidratação do C₃A, aluminato de cálcio :

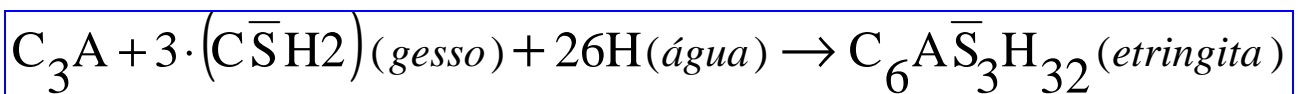
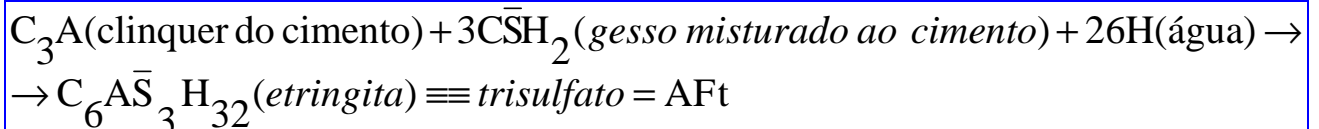


Isto ocorre tão rapidamente que o concreto pode ficar tão rígido que não pode ser lançado nem adensado. É a pega relâmpago, com grande liberação de calor.

Quando os grãos do cimento são grandes, a hidratação do C₃A demora e a pega relâmpago não ocorre.

Era o que ocorria com os cimentos antigos, que tinham os grãos graúdos. A moagem não era intensa e os grãos eram pouco moídos.

Quando os grãos do cimento são finos, como acontece hoje em dia, é necessário adicionar gesso ao cimento para bloquear a pega relâmpago.



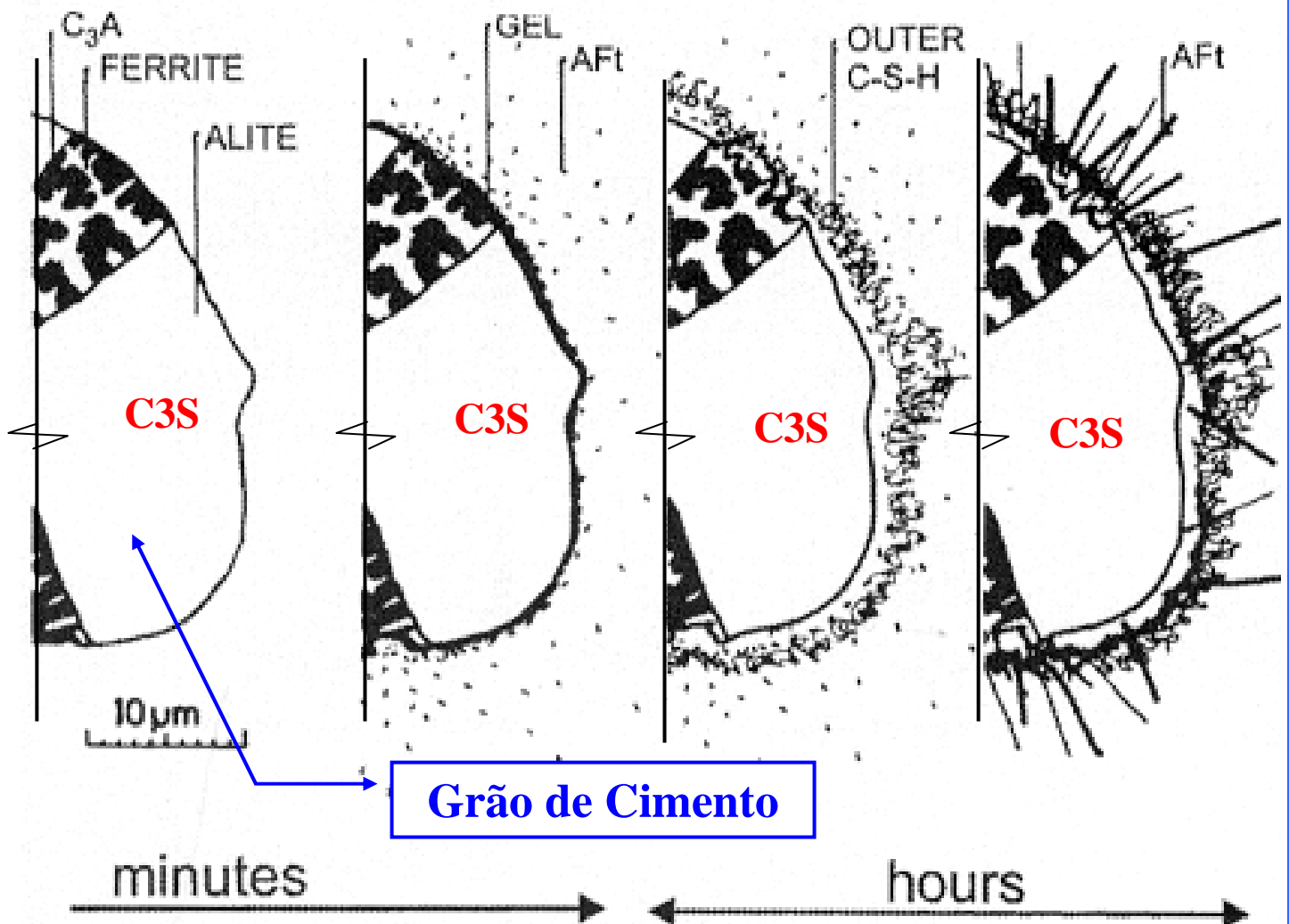


Hidratação do grão de Cimento

“Microstructural Development around a Cement Particle”

Gartner, E.M. & Kanare, H. L.

Cem. Res. Prog., 213 (1984)



Ferrite = C_4AF

Alite = C_3S

AFt = Etringite

Outer C-S-H = C-S-H Externo = Tipo I

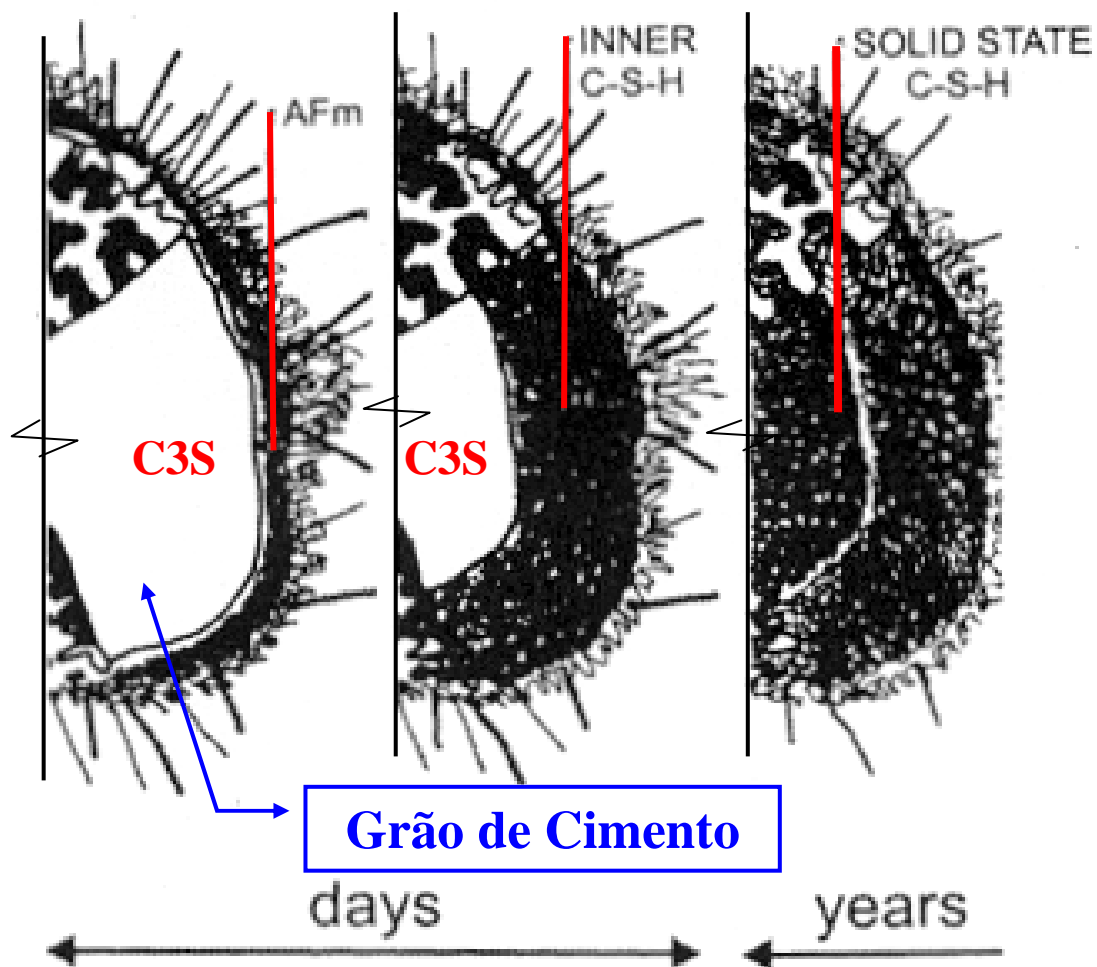


Hidratação do grão de Cimento (continuação)

“Microstructural Development around a Cement Particle”

Gartner ,E.M. & Kanare , H. L.

Cem. Res. Prog. , 213 (1984)



AFm = Mono sulfato

C3S = Alite

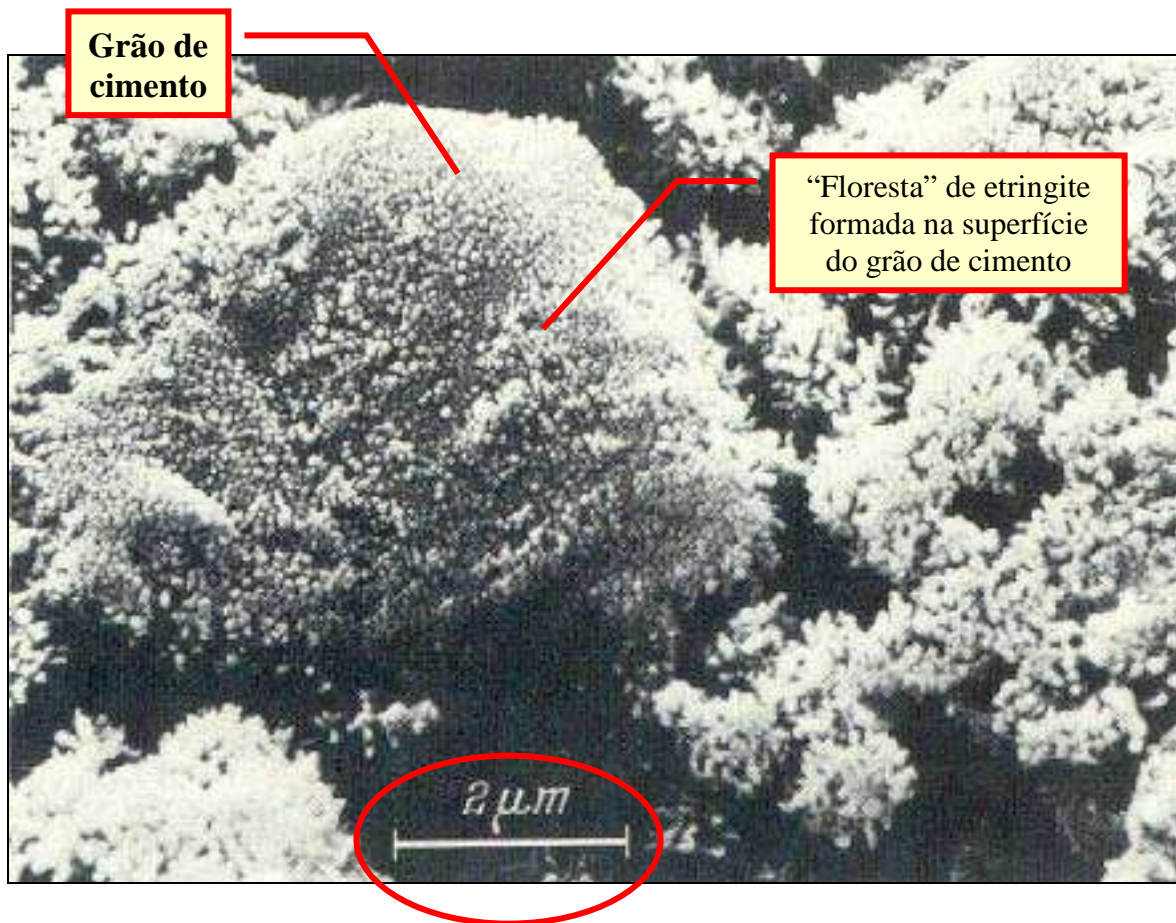
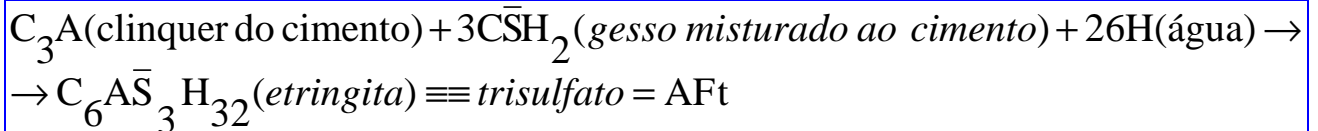
Inner C-S-H = C-S-H Interno

- Quanto menor o tamanho do grão de cimento (maior finura) mais rapidamente o grão se hidrata totalmente.
- A quantidade de grãos de cimento parcialmente hidratados vai diminuindo com o tempo.



Dormência do cimento

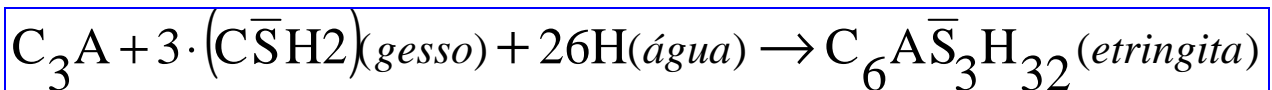
Adicionando-se gesso ao clínquer do cimento, forma-se a etringite e a hidratação do cimento para. O cimento fica “dormindo”.



- Pasta de cimento, 30 minutos após a mistura do cimento com a água.
- Microscopia eletrônica de varredura
- Cimento com quantidade ótima de sulfatos (gesso).
- A dimensão de 2 micrometros, mostrada na figura, é a espessura aproximada da película de água que molha cada grão de cimento.
- O sulfato de cálcio (gesso), que se dissolveu na água, reage nos primeiros minutos, com parte do C3A do grão do cimento, formando etringita, na superfície do grão.



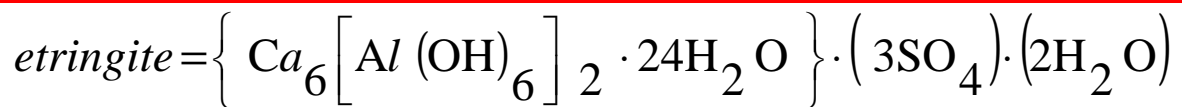
- O sulfato de cálcio (gesso), que se dissolveu na água, reage nos primeiros minutos, com parte do C3A do grão do cimento, formando etringite, na superfície do grão.



onde :

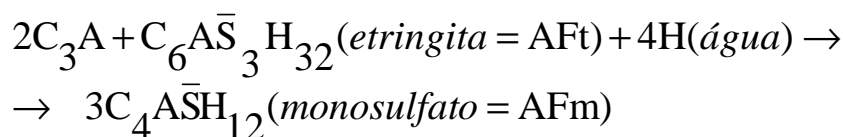
- C = CaO = cal
- A = Al₂O₃ = alumina
- \bar{S} = SO₃ = tri-óxido de enxofre
- H = H₂O = água

A expressão da etringite, segundo a fórmula da química convencional seria :



- O grão de cimento fica totalmente coberto pela etringite.
- Isso impede, por 2 a 4 horas, a continuação da hidratação do grão de cimento.
- **É o chamado período de dormência.**

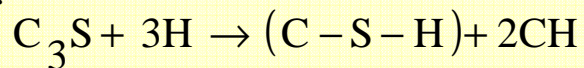
Quando o gesso é totalmente consumido na reação química, a etringite AFt reage então com o aluminato de cálcio C3A, formando o monosulfato AFm.





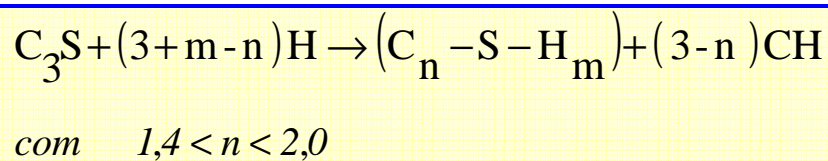
Após o período de dormência, ocorre a hidratação do C3S, do C2S e do C4AF

Hidratação do C3S



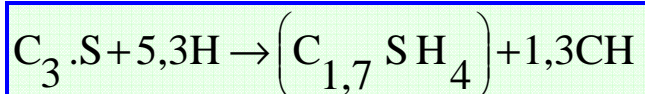
CH = Hidróxido de Cálcio = $Ca(OH)_2 = CaO - H_2O = CH$

Segundo Ivan Odler em [1] - (1998)



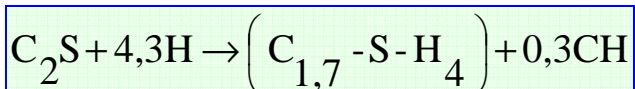
Segundo Dale P. Bentz - NIST - Ver [9] - (1997):

$n = 1,7$ $m = 4$



Hidratação do C2S

Segundo Dale P. Bentz - NIST - Ver [9] - (1997):



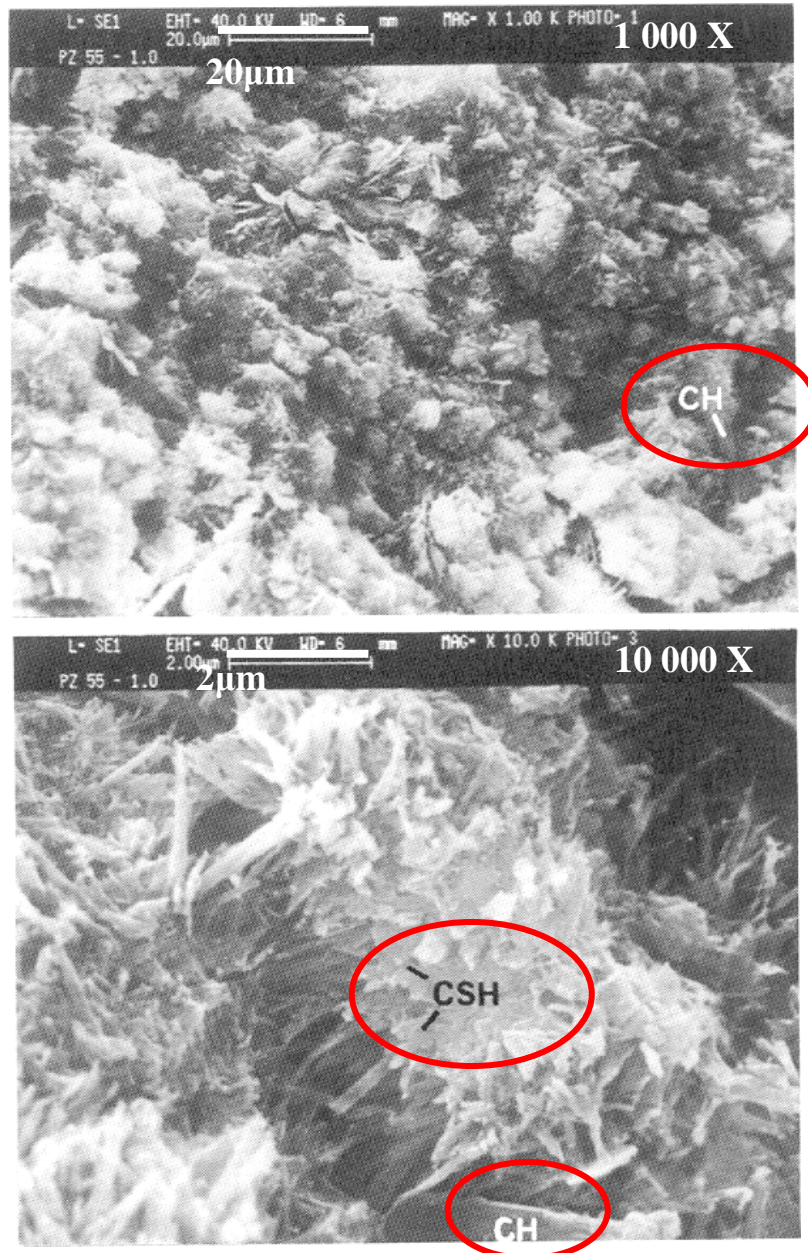


Lea's Chemistry of Cement and Concrete - Ver [1]

Imagens MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura - Eletrons secundários

Dois ampliações : 1000 X e 10000 X

Cimento Portland PZ 55 **Água / Cimento = 1,00**



Superfície de fratura

- Micro-estrutura pouco compacta com *poros* facilmente detectáveis.
- A feição acicular do C-S-H aparece com a amplificação grande 10 000 X
- Alguns poucos cristais de Portlandita CH = $\text{Ca}(\text{OH})_2$ são visíveis.
- Partículas de Aft e AFm não são visíveis.

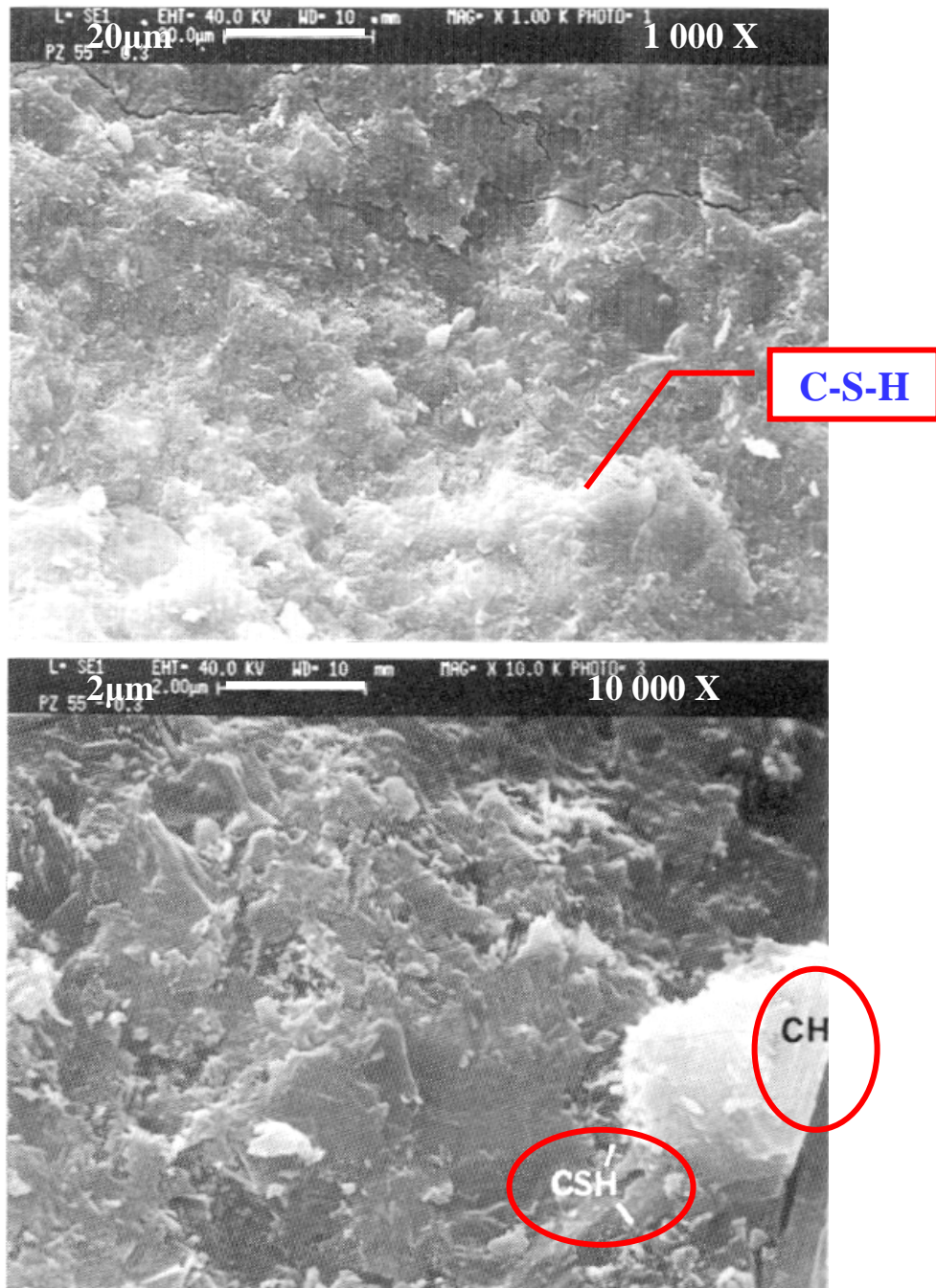


Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Ver [1]

Imagens MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura - Eletrons secundários

Duas ampliações : 1000 X e 10000 X

Cimento Portland PZ 55 - **Água / Cimento = 0,30**



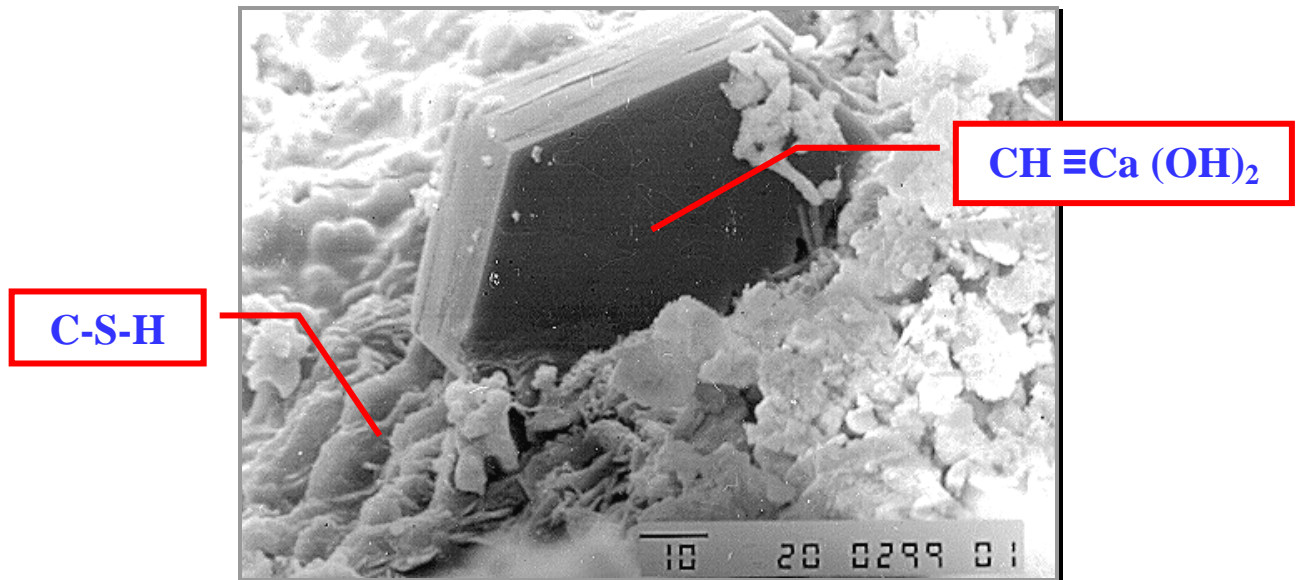
Superfície de fratura

- *Micro-Estrutura muito densa, com nenhuma cristalinidade aparente, mesmo com a ampliação grande.*



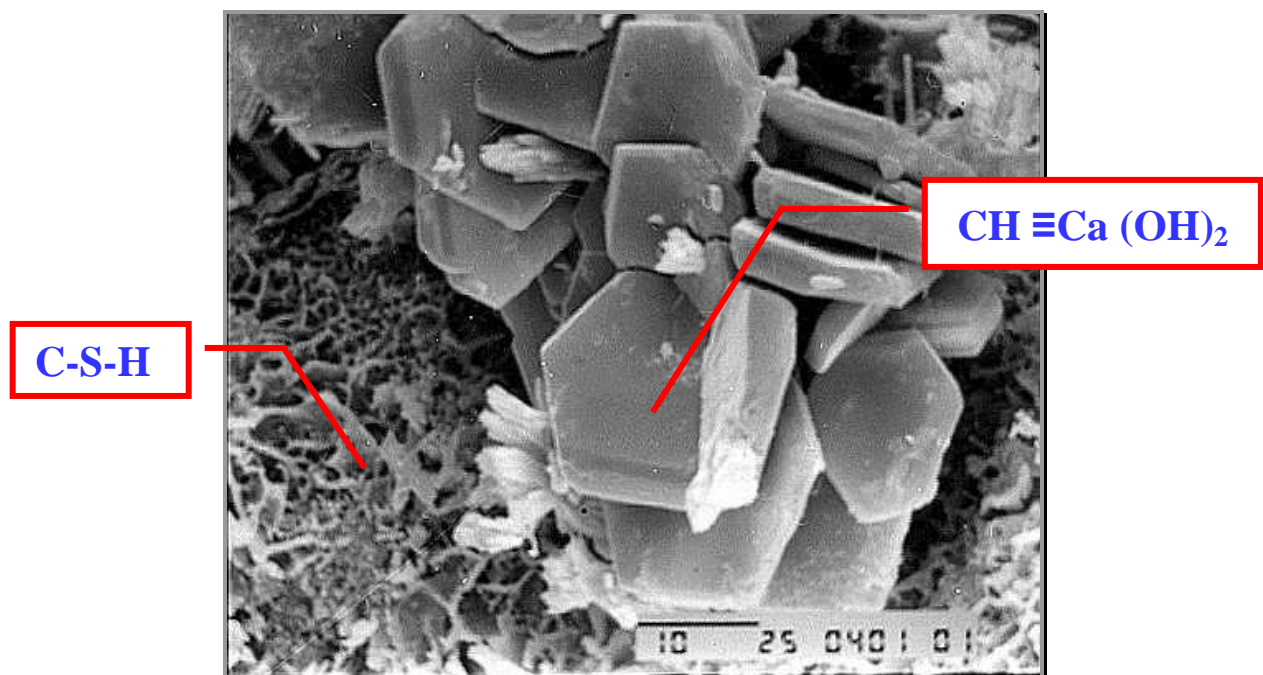
Pasta de Cimento Hidratado - Produtos da Hidratação

Hidróxido de Cálcio : $CH = Ca(OH)_2 = CaO.H_2O = CH$



C-S-H

CH \equiv Ca(OH)₂



C-S-H

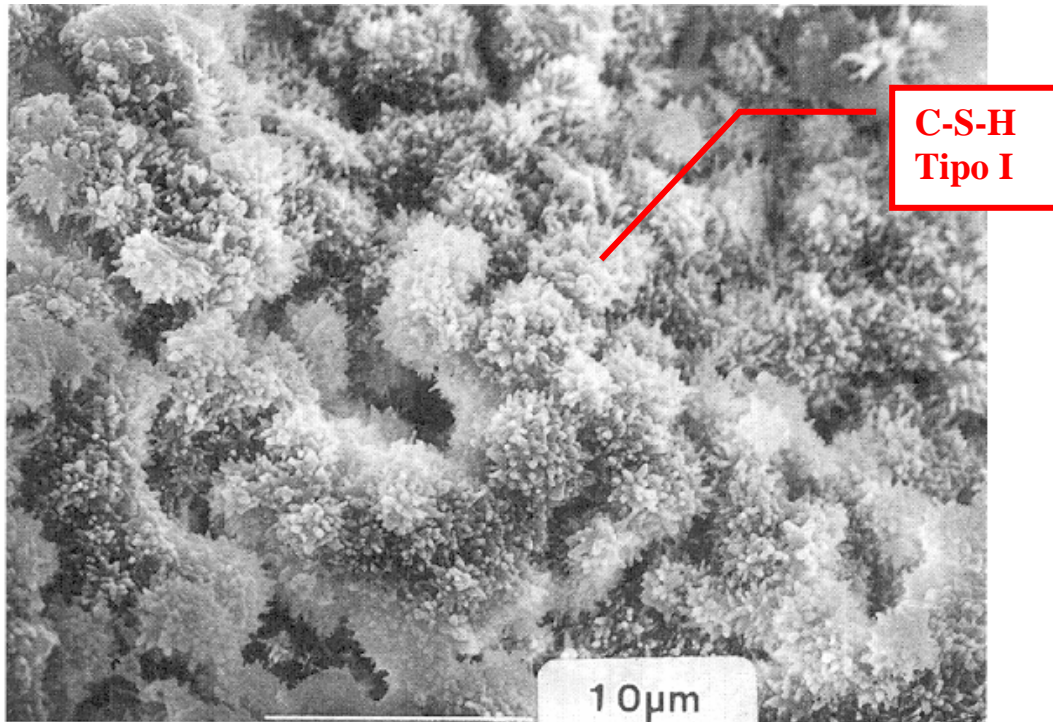
CH \equiv Ca(OH)₂

MEV = Microscopia Eletrônica de Varredura
Autora : Geol. Silvia Vieira – ABCP - Ver [14]

- C-H \equiv Cristalino
- C-H \equiv Mesma micro-estrutura que o mineral natural, chamado Portlandite
- Solubilidade do C-H , em água a 25 °C, \approx 1 grama / litro



Pasta de Cimento Hidratado - Produtos da Hidratação



- M.E.V- Microscopia Eletrônica de Varredura
- Elétrons Retro-Espalhados
- Fase C-S-H fibrosa \equiv Tipo I de C-S-H segundo Sidney Diamond
- *V.S. Ramachandran & James J. Beaudoin Noyes Publications – 2001 – Ver [7]*



Após o período de Dormência o grão de cimento se hidrata e forma o C-S-H

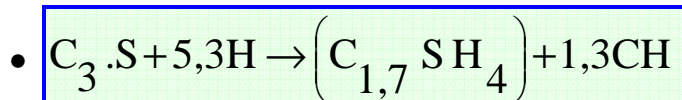


**C-S-H
Tipo I**

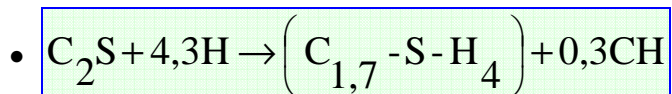
Largura do campo = 10 μ m

Crescimento do C-S-H ao redor das partículas de C_3S

- Hidratação do C_3S



- Hidratação do C_2S

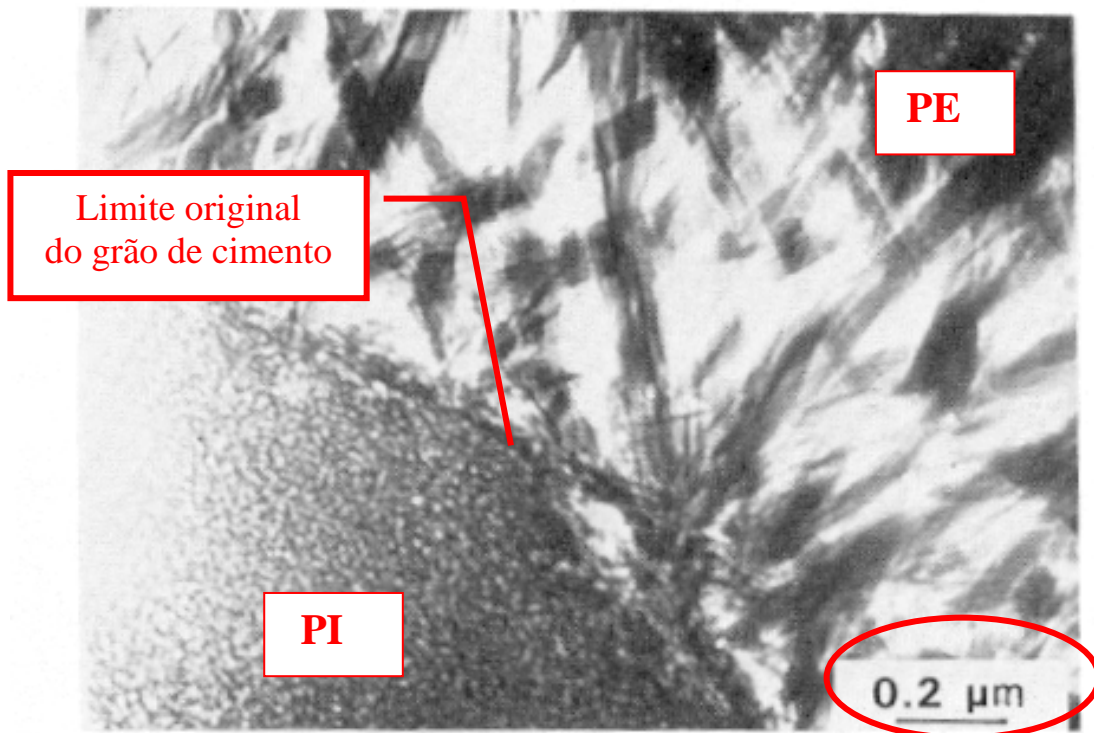


- *V.S. Ramachandran & James J. Beaudoin Noyes Publications – 2001 – Ver [7]*



*Materials Research Society - Volume 85 - 1987
Microstructural Development During Hydration of Cement
" TEM Studies of Cement Hydration "
G.W.Groves - Oxford University- [8]*

Hidratação do C_3S



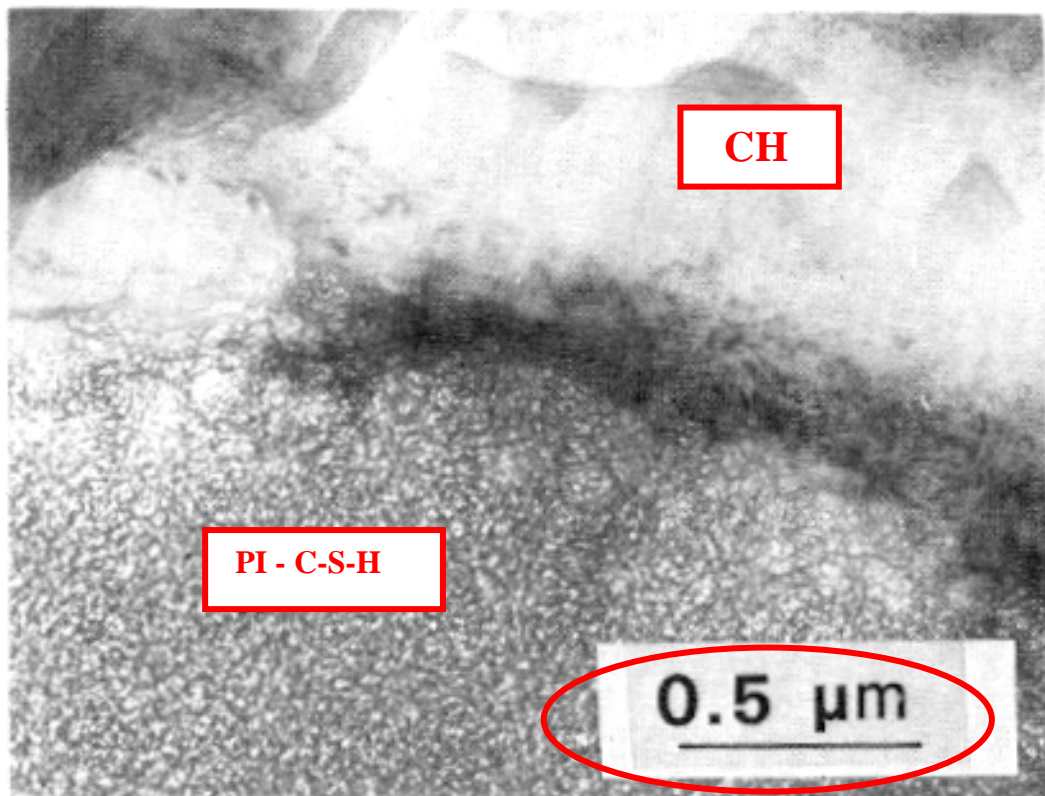
Microscopia Eletrônica de Transmissão

- **C-S-H** : *Produto Interno (PI)* X **C-S-H** : *Produto Externo (PE)*
- *Fator* : água / C_3S = 0,45
- **Idade = 26 anos.**
- *Micrografia MET em lâmina com espessura de $\approx 30\mu m$.*
- **PI** = C-S-H = *Produto Interno ao grão, resultante da Hidratação do C_3S .*
- **PE** = C-S-H = *Produto Externo ao grão, resultante da Hidratação do C_3S .*
- *A transição PI - PE é aproximadamente o contorno dos grãos de C_3S*
- *Embora com composições químicas semelhantes, o PE e o PI têm morfologia diferente" - G.W.Groves -1987 - Ver [8]*



Materials Research Society - Volume 85 - 1987
Microstructural Development During Hydration of Cement
" TEM Studies of Cement Hydration "
G.W.Groves - Oxford University- [8]

Hidratação do C_3S



Microscopia Eletrônica de Transmissão

- *Contato entre CH e PI (C-S-H).*
- *A ligação entre CH e PI parece ser excelente.*
- *É quase impossível identificar a junção do CH com PI .*
- *As fraturas observadas, na amostra fina para o MEV, nunca ocorreram próximo à interface CH / C-S-H .*
- *As fraturas observadas, na amostra fina para o MEV, ocorreram próximo à interface : C-S-H (PI) / C-S-H (PE) .*



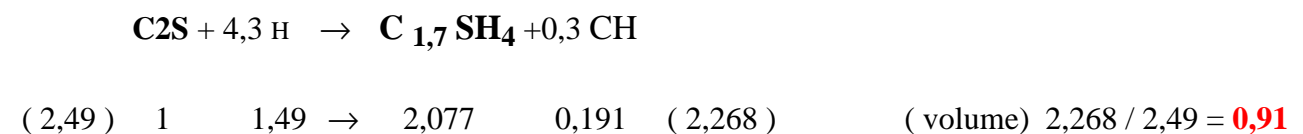
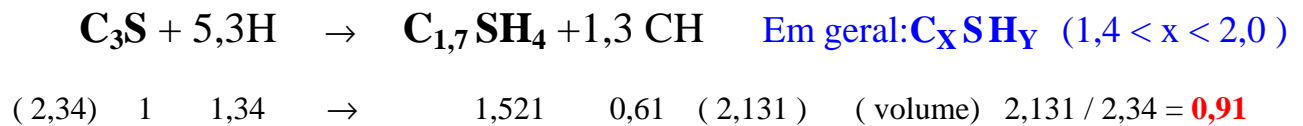
Hidratação do cimento Portland - Desenvolvimento da Microestrutura

Dale P. Bentz -- Ver [6] - 1997

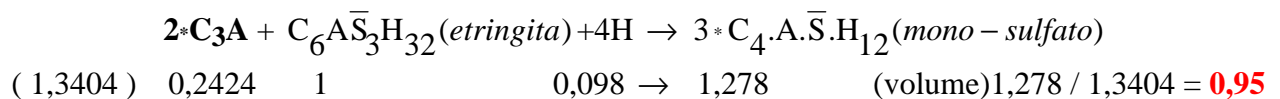
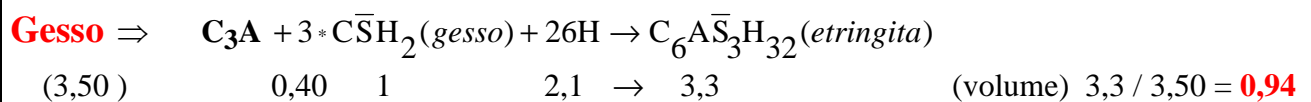


Reações dos Silicatos : C_3S e C_2S

Redução de Volume

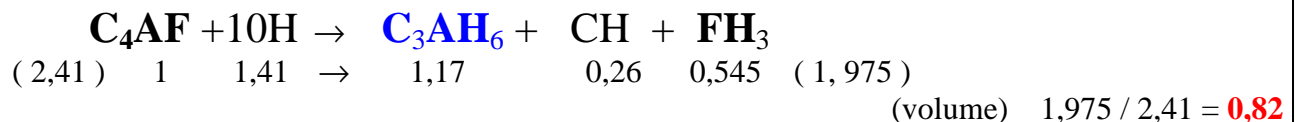
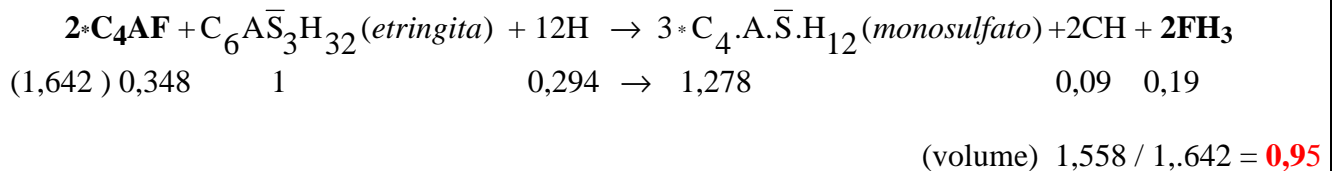
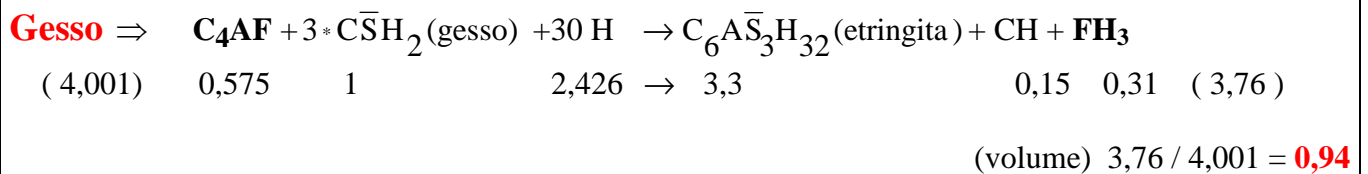


Reações dos Aluminatos : C_3A





Reações da Ferrita : C₄A F



Produtos que também se formam segundo :

Ramachandran $\equiv \text{C}_2\text{AH}_8$, C_4AH_{13}

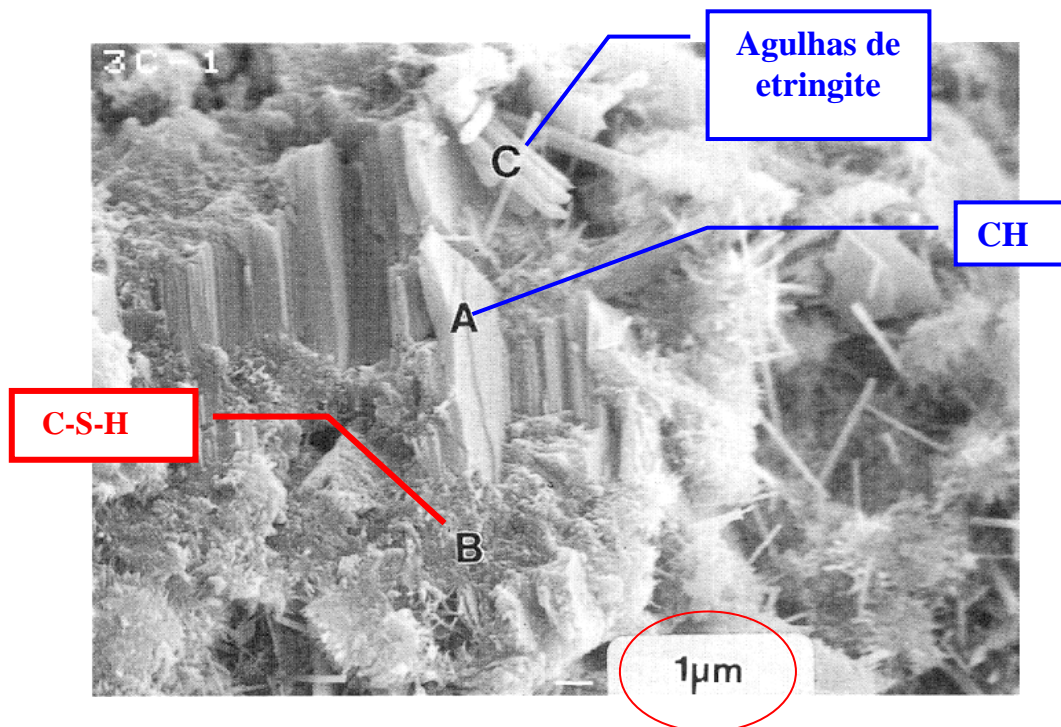
Lea $\equiv \text{C}_4\text{AH}_{19}$

- Pode-se observar que o volume dos produtos da hidratação é menor que a soma dos volumes dos reagentes.
- Parte dessa diferença pode ser observada sob forma de retração autógena.
- Outra parte permanece dentro do cimento hidratado sob a forma de vazios capilares.



Produtos da Hidratação

Fases da Pasta de Cimento Hidratado

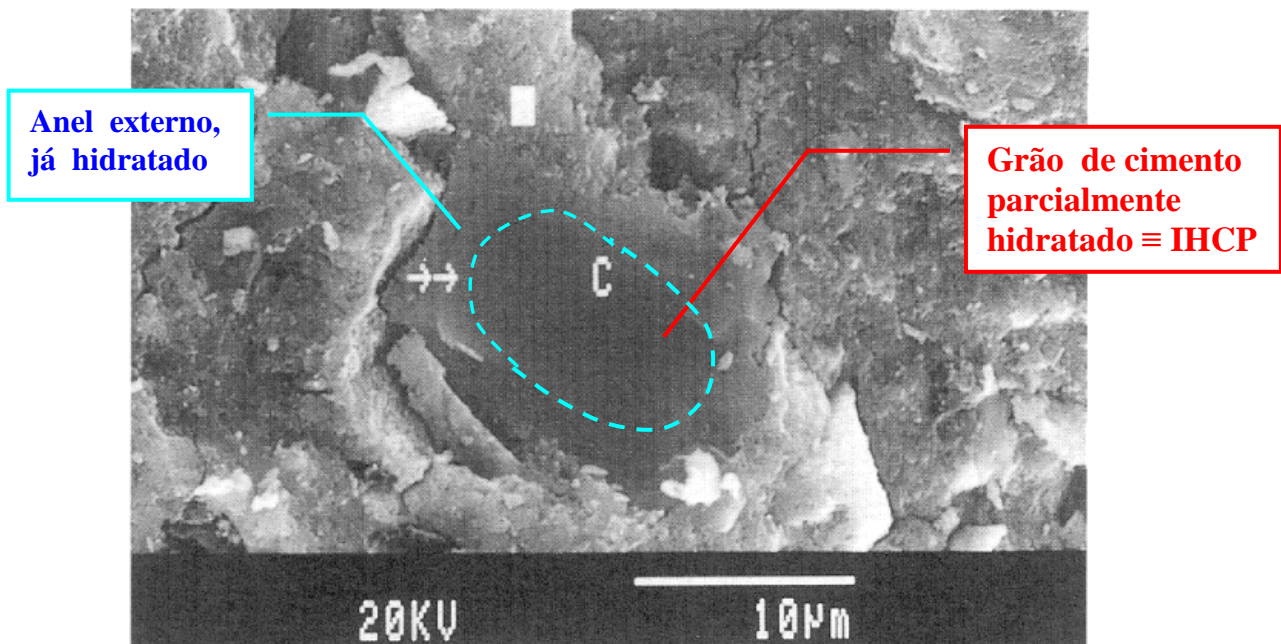


- *Microscopia Eletrônica de Varredura*
- *Elétrons Retro Espalhados. -*
- **C-S-H** - *Silicato hidratado de cálcio = 50% a 60% do volume sólido*
- **CH** – *Hidróxido de cálcio = $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 20% a 25% do volume sólido*
- **AFt** (*etringite*) e **AFm** (*monosulfato*)
- **IHCP** = *Partículas de Cimento Não Completamente Hidratado*
Depende da finura do cimento e da razão água / cimento
O grau de hidratação do cimento aumenta com o tempo.
- *Razão Água / Cimento = 0,50 a 0,55*
- *Ver [12] Shondeep L. Sarkar*



Produtos da Hidratação

Fases da Pasta de Cimento Hidratado



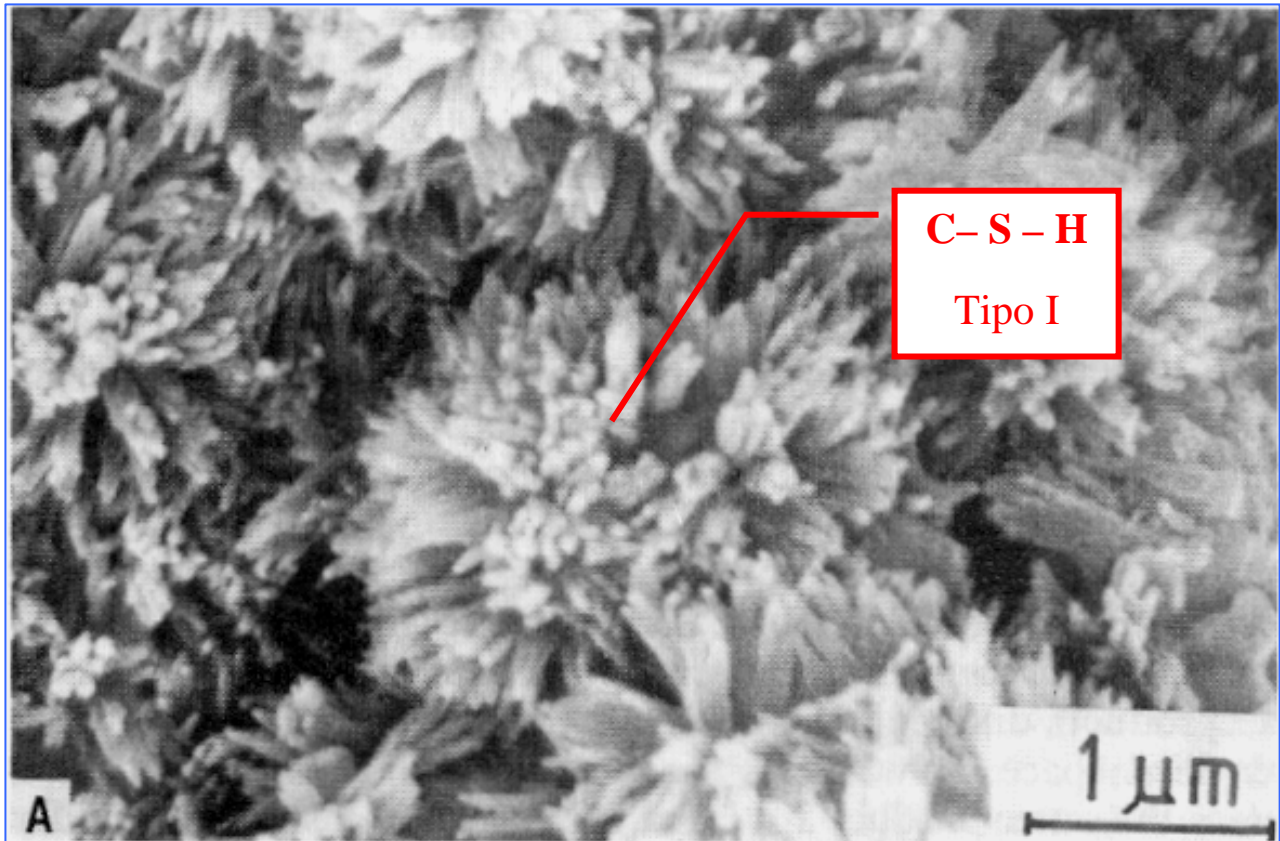
- *Microscopia Eletrônica de Varredura -*
- *Elétrons Retro Espalhados.*
- **IHCP** = *Partículas de Cimento Não Completamente Hidratado*
Depende da finura do cimento e da razão água / cimento
O grau de hidratação do cimento aumenta com o tempo.
- *Após a mistura da água com o cimento, forma-se um anel de cimento hidratado ao redor de cada grão de cimento.*
- *A espessura desse anel hidratado vai aumentando com o tempo, até que todo o grão esteja hidratado.*
- *A quantidade de grãos de cimento parcialmente hidratados (IHCP) vai diminuindo com o tempo.*
- *Ver [12] Shondeep L. Sarkar*



“Cement Chemistry”

Taylor H. F. W.

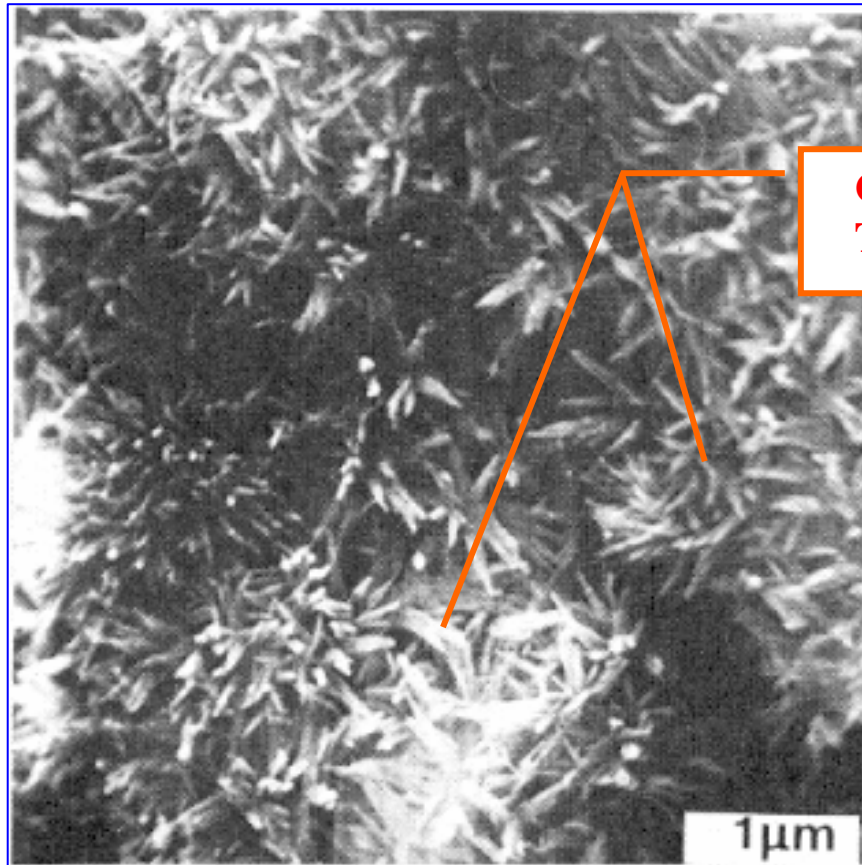
Thomas Telford 1998



- *Pasta de Cimento Portland Hidratado*
- *Produtos da Hidratação*
- *C-S-H - Tipo I de Sidney Diamond*



*“A study of Tricalcium Silicate Hydration from very early to very late stages”
S.A.Rodger - Oxford University - England
Materials Research Society - Volume 85 - 1987 - pág.13*



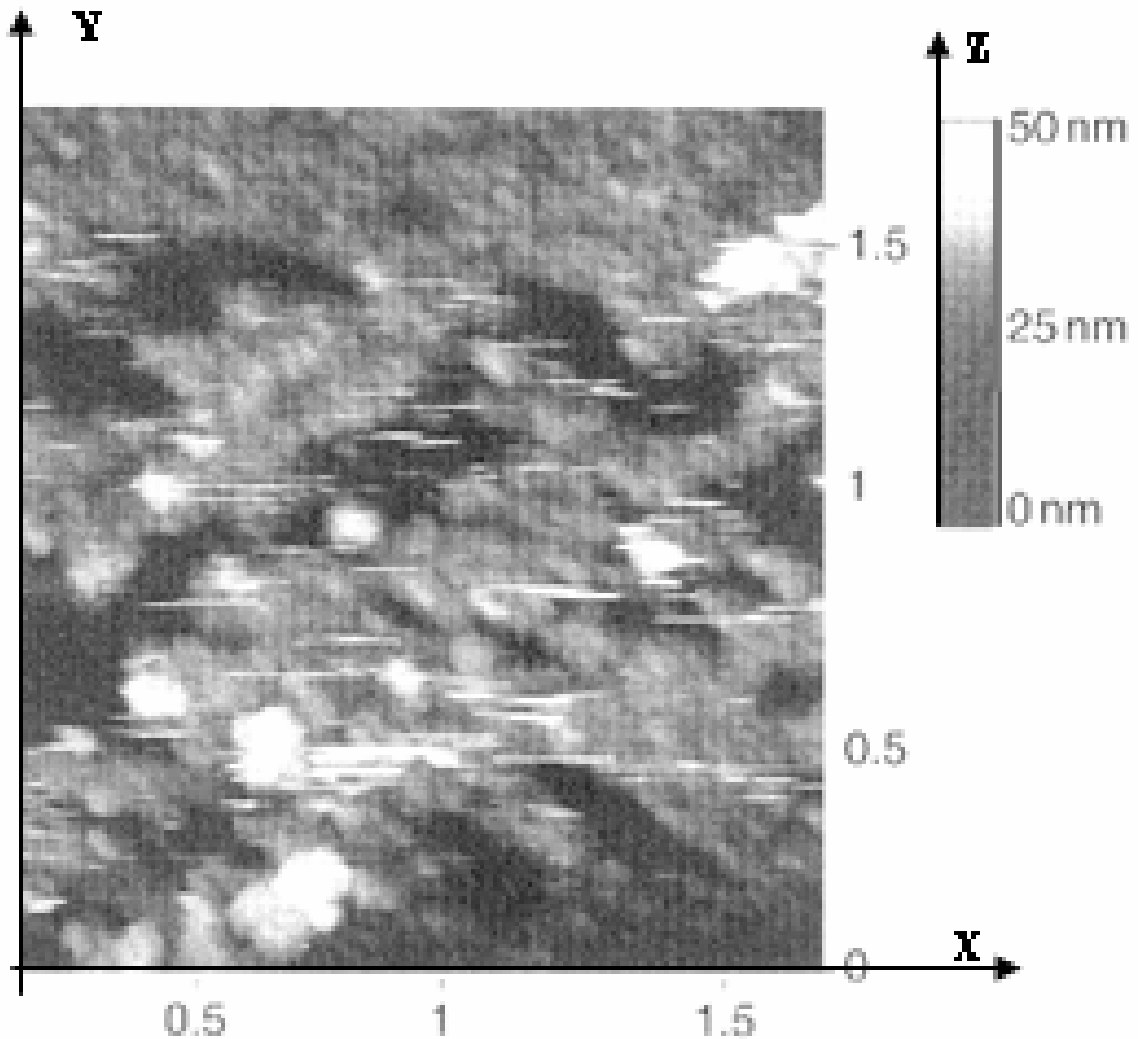
**C-S-H
Tipo I**

- C_3S hidratado durante 15 horas
- Toda a superfície do C_3S está coberta com " fibras "
- C-S-H Tipo I de Sidney Diamond
- As fibras não se irradiam ordenadamente da superfície do C_3S
- As fibras se superpõem umas às outras.
- A maioria das fibras afina na extremidade (agulhas).
- A maioria das fibras tem estrias longitudinais



Hydration of Portland Cement

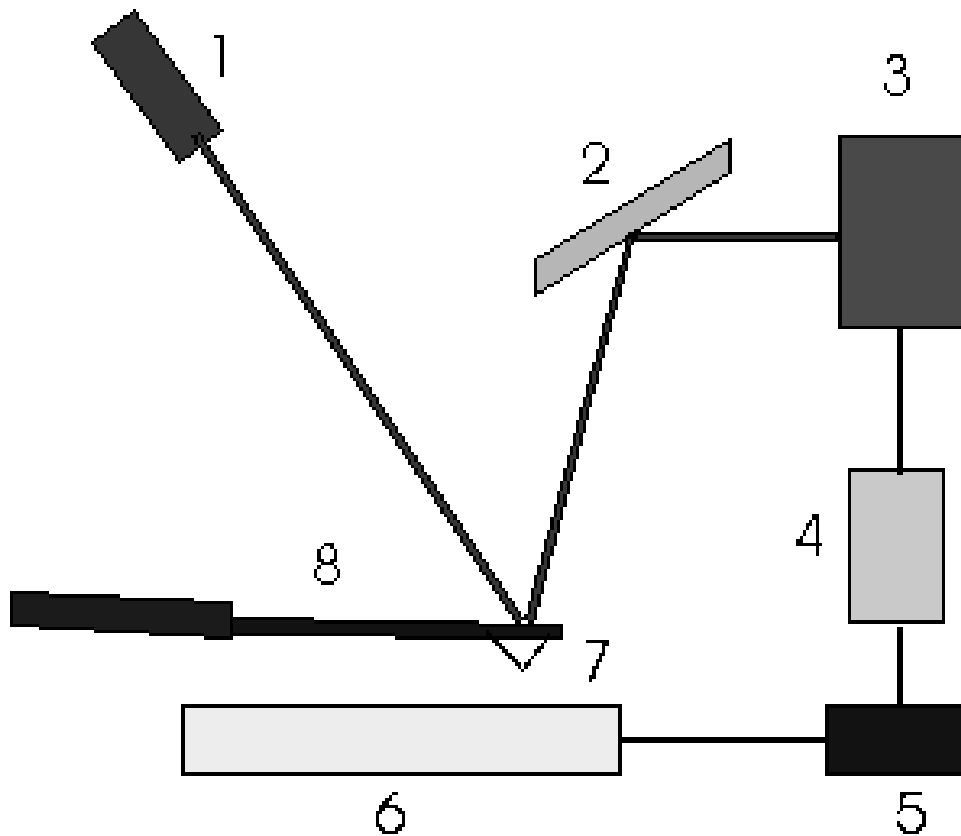
*E. M. Gartner , J.F. Young, D. A. Damidot & I. Jawed
Structure and Performance of Cements – second edition - 2002
Edited by J. Bensted and P. Barnes – SPON PRESS*



- Crescimento do C-S-H ao redor das partículas de C_3S
- *A F M* = Atomic Force Microscopy
- *Imagem AFM de Dr. E. Gauffinet & Dr. André Nonat , LRRS, Faculté des Sciences, Dijon- France*



Esquema de Microscopia de Força Atômica = AFM
A F M = Atomic Force Microscopy



1. Laser

2. Espelho

3. Fotodetector

4. Amplificador

5. Registrador

6. Amostra

7. Sensor

8. Braço em Balanço



Referências :

- 1- Lea's Chemistry of Cement and Concrete Fourth Edition –
Editor: Peter C. Hewlett Editora Arnold - 1998
- 2- F.M.Lea – The Chemistry of Cement and Concrete - Third edition –
Chemical Publishing Co., Inc. 1971
- 3- Bogue, Robert Herman – The Chemistry of Portland Cement
Reinhold Publishing Corporation – 1955
- 4- Structure and Performance of Cements – second edition - 2002
Edited by J. Bensted and P. Barnes – SPON PRESS
- 5- Holdercim – José Eduardo Kattar – Nilton Jorge Almeida
Cimento Portland .- 1997
- 6- Dale P. Bentz - Building and Fire Research Laboratory- NIST
National Institute of Standards and Technology – J. Am. Ceram. Soc. 80 [1] 3-21
(1997)
- 7- V.S. Ramachandran & James J. Beaudoin – Noyes Publications – 2001
“TEM Studies of Cement Hydration ”
- 8- G.W.Groves - Oxford University - Materials Research Society
Volume 85 -1987 Microstructural Development During Hydration of Cement
- 9- Dale P. Bentz - Three- Dimensional Computer Simulation of Portland
Cement Hydration and Microstructure Development.- Building and Fire
Research Laboratory - NIST – National Institute of Standards and Technology
J. Am. Ceram. Soc. 80 [1] 3-21 (1997)
- 10-Ivan Odler - Special Inorganic Cements - Modern Concrete Technology Series
Library Binding - (June 2000)



11- H. F. W. Taylor - Cement Chemistry (2nd Edition)
Thomas Telford Publishing – 1998

12 - Shondeep L. Sarkar - Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis
of Concretes - Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and
Technology Principles, Techniques and Applications -
V.S. Ramachandran & James J. Beaudoin Noyes Publications – 2001

13 - Donald. A. St John, Alan W. Poole & Ian Sims
Concrete Petrography – A handbook of investigative techniques
John Wiley – 1998

14 - Geol. Silvia Vieira – ABCP

15 - L.J. Vicat - Mortiers et Ciments Calcaires – 1ª edição – 1818 2ª edição
(tradução ao inglês) 1837 – reeditada em 1997

16 –Zement-Taschenbuch – VDZ – Verein Deutscher Zementwerk 51Ausgabe
– 2008