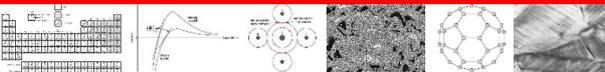


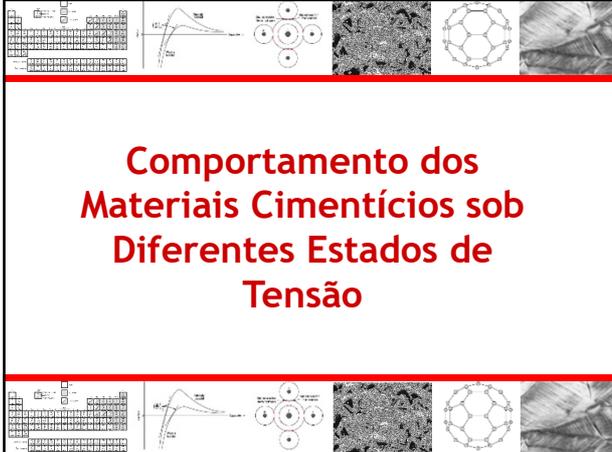

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
 Escola Politécnica
 DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais
 PPEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

ENG K25 - Ciência dos Materiais Cimentícios
UNIDADE II - Estados de Tensão, Reologia, Porosidade, Degradação da Matriz Cimentícia, Microestrutura x Propriedades
 Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro
 verasribeiro@hotmail.com



1

Comportamento dos Materiais Cimentícios sob Diferentes Estados de Tensão



2


Argamassa – Estado Fresco

- **Viscosidade**

- Escoamento proveniente de uma deformação irreversível;

- Medida da resistência interna de uma substância ao fluxo quando submetida a uma dada tensão.

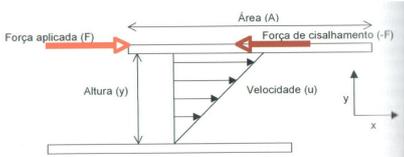
Reologia: Ramo da física que estuda a mecânica dos corpos deformáveis quando estes estão submetidos a esforços gerados por forças internas.

“a diferença entre um sólido e um fluido ideal está justamente na resposta ou comportamento de ambos quando submetidos a um esforço. Enquanto um sólido elástico sofre deformação proporcional à tensão aplicada, um fluido sofre cisalhamento contínuo, isto é, suas camadas escoam com velocidades que variam com a distância entre elas.” (MACHADO, 2002)

3


Argamassa – Estado Fresco

- **Viscosidade**



Fluido Newtoniano

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

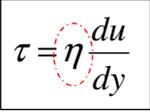
τ = Tensão de cisalhamento (g/cm.s²)
 η = Coef. de Viscosidade (1 cP = 10⁻² g/cm.s)
 $\frac{du}{dy}$ = Taxa de cisalhamento (s⁻¹)

4


Argamassa – Estado Fresco

- **Viscosidade**

Fluido Newtoniano



Material	Viscosidade (cP)
Ar	10 ⁻³
Etano	10 ⁻²
Éter	10 ⁻¹
Água	1,0
Mercúrio	1,5
Creme de leite, sucos, sangue	10
Azeite de Oliva e lubrificantes	10 ²
Glicerina	10 ³
Mel	10 ⁴
Asfalto e Betume	10 ⁵ - 10 ⁸

τ = Tensão de cisalhamento (g/cm.s²)
 η = Coef. de Viscosidade (1 cP = 10⁻² g/cm.s)
 $\frac{du}{dy}$ = Taxa de cisalhamento (s⁻¹)

5


Resistência Mecânica

- **Resistência Mecânica (NBR 6118 / 2003)**

“... capacidade de resistir à tensão sem ruptura.”

- **Resistência à Compressão Axial (f_c);**
- **Resistência à Tração (f_t);**
- **Resistência à Tração na flexão (f_{tf})**

$$f_t = \frac{f_c}{10} \qquad f_{tf} = \frac{f_c}{5}$$

f_{ck} = Resistência Característica de projeto $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$
 f_{cd} = Resistência de Cálculo à Compressão do Concreto

6

Compressão

- **Compressão Axial**
- Carregamento contínuo
- Tensão crítica $\approx 0,75 f'_c$

$$R_c = \frac{F}{\text{Área}}$$

7

Compressão

- **Compressão Axial**
- Carregamento cíclico
- Efeito negativo para tensões acima de $0,5 f'_c$
- Rompimento abaixo da resistência de projeto $\approx 0,7 f_{ck}$

8

Tração

- **Tração por Compressão Diametral, f_t**
- Combinação de tensões de tração, compressão e cisalhamento (semelhante a pavimentos rodoviários);
- $f_t/f_c \approx 0,07 - 0,11$

$$F_t = \frac{2P}{ld}$$

9

Tração na Flexão

- Mais usado para avaliar materiais cerâmicos, em comparação aos testes de tração;
- Dificuldade de obter corpo de prova (geometria);
- Dificuldade de prendê-los sem fissurar;
- Qualquer desalinhamento faz com que o material se quebre facilmente.
- Bordo superior comprimido e bordo inferior traçado.

10

Resist. à Flexão – Cerâmicas

$\sigma = \text{stress} = \frac{M}{I}$

where M = maximum bending moment
 c = distance from center of specimen to outer fibers
 I = moment of inertia of cross section
 F = applied load

Rectangular	$\frac{M}{I}$	$\frac{c}{4}$	$\frac{1}{12} b d^3$	$\frac{2I}{3bd^2}$
Circular	$\frac{M}{I}$	R	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{2I}{\pi d^3}$

$$\sigma_{fs} = \frac{F_f L}{\pi R^3}$$

11

Resist. à Flexão – Cerâmicas

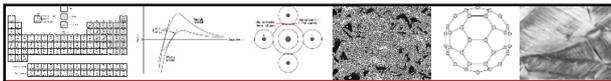
- **NBR 13279**

$$\sigma_{fs} = \frac{F_f L}{\pi R^3}$$

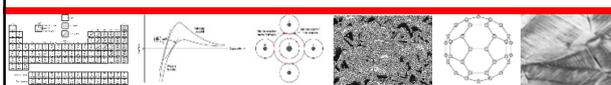
→

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3}$$

12



Estudo da Reologia de Matrizes Cimentícias



13



Testes - Propriedades

- Estado Fresco
- Estado Endurecido
- Trabalhabilidade;
- Resistência Mecânica;
- Segregação;
- Compressão, Tração e Fluência.
- Exsudação;
- Capilaridade;
- Massa Específica e Teor de Ar.
- Condutibilidade Térmica;
- Porosidade / Densidade;
- Durabilidade;
- Resistência ao fogo, Desgaste, reação álcali-agregado.

14



Reologia

- Ciência que estuda a deformação e o fluxo da matéria;

Rheo = Deformação
Logia = Ciência ou Estudo

- Usamos reologia para estudar relações fundamentais, chamadas relações constitutivas, entre forças e deformações nos materiais.

15



Reologia

- **Produção de tintas:** a tinta deve ser fácil de espalhar e não escorrer pelas paredes;
- **Cosméticos e Higiene:** modo como um creme se espalha ou tempo de escoamento de um recipiente;
- **Alimentos:** logurte não pode ser “aguado”, nem muito seco. Assim, Consistência ideal = \$\$\$;



16



Reologia

- **Viscosidade é...**
- “Falta de Escoamento”;
- Sinônimo de Fricção Interna;
- Resistência ao Fluxo;
- Parâmetro de Dissipação de Energia;
- Escoamento proveniente de uma deformação irreversível;
- Relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$)
- Medida da resistência interna de uma substância ao fluxo quando submetida a uma dada tensão.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$$

17



Reologia

“a diferença entre um sólido e um fluido ideal está justamente na resposta ou comportamento de ambos quando submetidos a um esforço. Enquanto um sólido elástico sofre deformação proporcional à tensão aplicada, um fluido sofre cisalhamento contínuo, isto é, suas camadas escoam com velocidades que variam com a distância entre elas.” (MACHADO, 2002)

18

Reologia

- Viscosidade

$F = \text{Força}$
 $V = \text{veloc.}$

$\tau = \text{Tensão de cisalhamento (g/cm.s}^2\text{)}$
 $\mu = \text{Coef. de Viscosidade (1 cP = } 10^{-2} \text{ g/cm.s)}$
 $\frac{dv}{dy} = \text{Taxa de cisalhamento (s}^{-1}\text{)}$

Fluido Newtoniano

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

19

Reologia

- Viscosidade

Fluido Newtoniano

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

$\tau = \text{Tensão de cisalhamento (g/cm.s}^2\text{)}$
 $\mu = \text{Coef. de Viscosidade (1 cP = } 10^{-2} \text{ g/cm.s)}$
 $\frac{dv}{dy} = \text{Taxa de cisalhamento (s}^{-1}\text{)}$

Material	Viscosidade (cP)
Ar	10^{-3}
Etano	10^{-2}
Éter	10^{-1}
Água	1,0
Mercúrio	1,5
Creme de leite, sucos, sangue	10
Azeite de Oliva e lubrificantes	10^2
Glicerina	10^3
Mel	10^4
Asfalto e Betume	$10^5 - 10^8$

20

Reologia

Concretos → Variabilidade dos Materiais → **Injeção**
Argamassas → Reologia → **Extrusão**
Fibrocimento → Reatividade do cimento → **Bombeamento**
Spray

21

Reologia – Estado Fresco

- Fatores que afetam a Trabalhabilidade.

Fatores Intrínsecos (dependentes da dosagem)			Fatores Extrínsecos (independentes da dosagem)
Fluidez da pasta de cimento	Tipo de Agregado	Relação pasta/agregado	
<ul style="list-style-type: none"> • Relação a/c • Tipo de cimento (finura, teores de C_3A, gesso e álcalis) • Aditivos (plastificantes, incorporadores de ar) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão Máxima Característica • Distribuição Granulométrica e % Finos • Angulosidade • Porosidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Relação cimento/agregado • Adições Minerais 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimento de mistura • Temperatura • Tempo (perda de trabalhabilidade)

22

Reologia

- Variáveis
- Taxa de Cisalhamento
- Tempo de Cisalhamento
- Temperatura
- Pressão

23

Reologia

- O que influencia a viscosidade?

μ não é proporcional à taxa de deformação

- Aumento de η em função do tempo;
 - Recupera a tensão inicial qdo a tensão cessa.

- Diminuição de μ em função do tempo

- Dilatantes
 - Pseudoplásticos
 - Plásticos de Bingham
 - Herschel-Bulkley

- Aumento de μ com aumento da $\dot{\gamma}$
 - Diminuição de μ com aumento da $\dot{\gamma}$
 - Não linearidade entre $d\mu/d\dot{\gamma}$ e a $\dot{\gamma}$

- Reopéticos
 - Tixotrópicos

Dependentes do tempo
 Independentes do tempo

Material
 Newtoniano
 Não Newtoniano

24

Reologia

- Fluidos Newtonianos

25

Reologia

- Tipos de Comportamento Reológico

Independentes do Tempo

Tensão de escoamento

$$\tau = \eta_p \gamma$$

τ (Pa): tensão de cisalhamento
 τ_0 (Pa): tensão de escoamento
 η_p (Pa.s): viscosidade plástica
 γ (s⁻¹): taxa de cisalhamento.

26

Reologia

- Fluidos Não-Newtonianos
- Independentes do Tempo
- Fluidos de Bingham
- Fluidos Pseudoplásticos
- Fluidos Dilatantes
- Fluidos de Herschel Bulkley
- Dependentes do Tempo
- Tixotrópicos
- Reopéticos

27

Reologia

- Fluidos com Comportamento Independente do Tempo

Independentes do Tempo

Tensão de escoamento

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma$$

τ (Pa): tensão de cisalhamento
 τ_0 (Pa): tensão de escoamento
 η_p (Pa.s): viscosidade plástica
 γ (s⁻¹): taxa de cisalhamento

28

Reologia

- Fluido de Bingham
- **Repouso:** estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir a qualquer tensão inferior à tensão de escoamento e se comportam como um sólido elástico rígido
- $\tau > \tau_0$: a estrutura se desintegra e o sistema se comporta como fluido newtoniano.
- $\tau < \tau_0$: a estrutura tridimensional é recuperada.

29

Reologia

- Fluidos com Comportamento Independente do Tempo

Independentes do Tempo

Tensão de escoamento

30

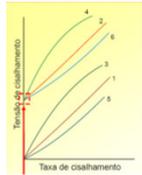


Reologia

• Fluido Pseudoplástico (3 e 4)

- A viscosidade aparente do fluido diminui com o aumento da taxa de cisalhamento ou da tensão de cisalhamento.

- Características físicas das partículas;
- Área superficial e formato das partículas;
- Tipo de interação entre as partículas e sua concentração;
- Peso molecular e conformação de moléculas dispersantes presentes no meio líquido.



31



Reologia

• Fluido Pseudoplástico (3 e 4)

- Repouso: estado desordenado

- $\tau > \tau_0$: moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada ($\uparrow \tau \rightarrow \downarrow \eta$)

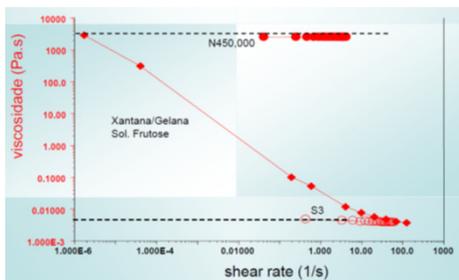
- O aumento na taxa de cisalhamento pode propiciar a quebra de partículas aglomeradas, diminuindo a turbulência das linhas de fluxo, devido à redução do diâmetro das partículas, reduzindo a viscosidade (Efeito *Shear Thinning*).

32



Reologia

• Fluidos Newtonianos x “Shear Thinning”



Pileggi, 2013

33



Reologia

• Comportamento “Shear Thinning”

- Orientação de partículas não-cisalháveis na direção do fluxo. Ex.: fenômeno de bombeamento de lamas fibrosas;

- Orientação de cadeias poliméricas na direção do fluxo e a quebra de cadeias poliméricas durante o fluxo. Ex.: extrusão de polímeros fundidos;

- Deformação de gotículas esféricas para gotículas elípticas em uma emulsão. Ex.: produção de margarina com baixo teor de gordura.

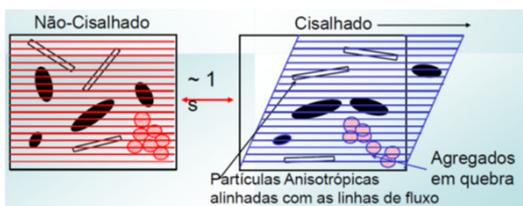
- Quebra de aglomerados de partículas em suspensões. Ex.: tintas no misturador.

34



Reologia

• Mecanismo



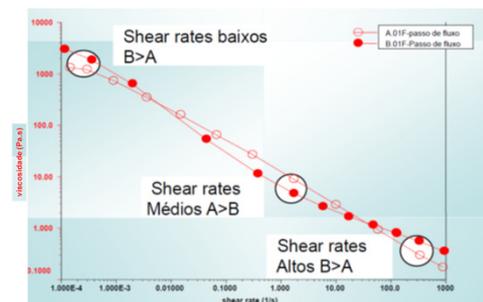
Pileggi, 2013

35



Reologia

• Necessidade de uma curva inteira!



Pileggi, 2013

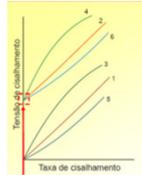
36



Reologia

• Fluido Dilatante (5 e 6)

- A viscosidade aparente do fluido aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento ou da tensão de cisalhamento.



- Suspensões com elevada concentração de sólidos ou distribuições granulométricas estreitas (redução da distância média entre as partículas);

- O escoamento do líquido ocorre por meio dos estreitos canais entre as partículas.

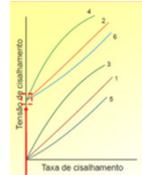
37



Reologia

• Fluido Dilatante (5 e 6)

- A viscosidade aparente do fluido aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento ou da tensão de cisalhamento.



- Para suspensões concentradas de partículas finas, em que a aplicação de altas taxas de cisalhamento não permite tempo suficiente para que estas se movam umas em relação às outras, ocorre um aumento de viscosidade por interferência entre as mesmas (PILEGGI, 1996)

38

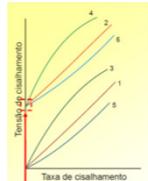


Reologia

• Fluido Dilatante (5 e 6)

- Mecanismos:

- Aumento da viscosidade pelas interações física e química entre as partículas do sistema;



- Aumento do volume interpartículas (partículas maiores), devido ao cisalhamento, que é bloqueado devido ao atrito, proveniente da falta de água nos interstícios (dilatância volumétrica).

39



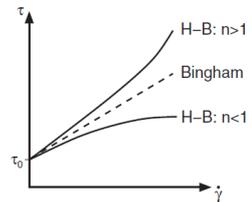
Reologia

• Fluidos de Herschel-Bulkley

- Comportamento pseudoplástico e dilatante

$$\tau = \tau_0 + k. (\dot{\gamma})^n$$

$$\eta_{pl} = k. (\dot{\gamma}_{m\acute{a}x})^{n-1}$$



τ (Pa): tensão de cisalhamento

τ_0 (Pa): tensão de escoamento

K: índice de consistência;

n: expoente da lei de potência;

$\dot{\gamma}$ (s⁻¹): taxa de cisalhamento;

η_{pl} (Pa.s): viscosidade plástica.

K e n são constantes que definem a viscosidade do fluido

40

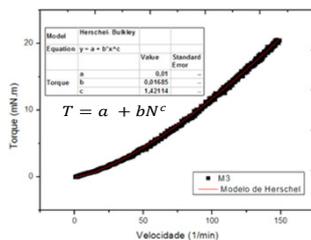


Reologia

• Fluidos de Herschel-Bulkley

- Comportamento pseudoplástico e dilatante

$$\tau = \tau_0 + k. (\dot{\gamma})^n \quad \eta_{pl} = k. (\dot{\gamma}_{m\acute{a}x})^{n-1}$$

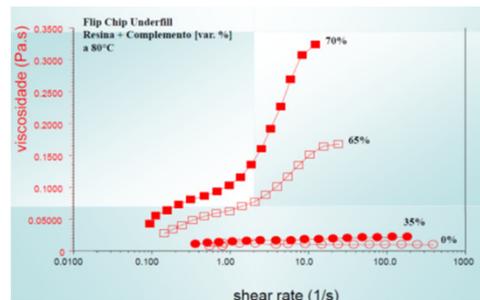


41



Reologia

• Comportamento



Pileggi, 2013

42

Reologia

- Fluidos com Comportamento Dependente do Tempo

Dependentes do Tempo

reopexia

tixotropia

Viscosidade

Tempo

Fenômenos reversíveis !!

Função da história de cisalhamento

43

Reologia

- Tixotropia (Histerese +)

- Um decréscimo da viscosidade aparente com tempo sob taxa de cisalhamento constante, seguido de uma gradual recuperação, quando esta é removida.
- Comportamento é considerado reversível, mas, raramente observado em fluidos à base de cimento
- Existe uma segunda fonte dependente do tempo (reação de hidratação), que modifica as propriedades da pasta com o tempo, de modo irreversível.

44

Reologia

- Tixotropia (Histerese +)

- O cisalhamento do material separa as partículas agregadas e, então, ocorre uma menor resistência ao escoamento e a viscosidade decresce com o tempo, até um valor constante ser alcançado
- Ex.: gelatinas, cremes, manteigas, molhos para salada, etc.

T (dyn/cm²)

N (rpm)

45

Reologia

- Reopexia (Histerese -)

- Um acréscimo na viscosidade aparente com o tempo sobre taxa (ou tensão) de cisalhamento constante, seguido de uma recuperação gradual quando esta é removida.
- Também chamada de Anti-tixotrópico ou tixotropia negativa.

Tensão de cisalhamento

Tempo para Taxa constante de cisalhamento

46

Ex.: Concreto Bombeável

Torque (Nm)

14 vol. %

Rotação (rpm)

$q = 0,21$
 $q = 0,26$
 $q = 0,31$
 $q = 0,21$ Vol. Restr.
 $q = 0,26$ Vol. Restr.
 $q = 0,31$ Vol. Restr.

$q = 0,21$ - Newtoniano → Dilatante → ↓ IPS
 $q = 0,26$ - Pseudoplástico → Pseudoplástico
 $q = 0,31$ - Dilatante ↑ rotações → Dilatante → ↓ MPT

47

Reologia

Por quê Estudar Reologia de Argamassas?

48



49

D defeitos

- **Aderência**
- **Contato revestimento-base**
- **Defeitos na Interface**

50

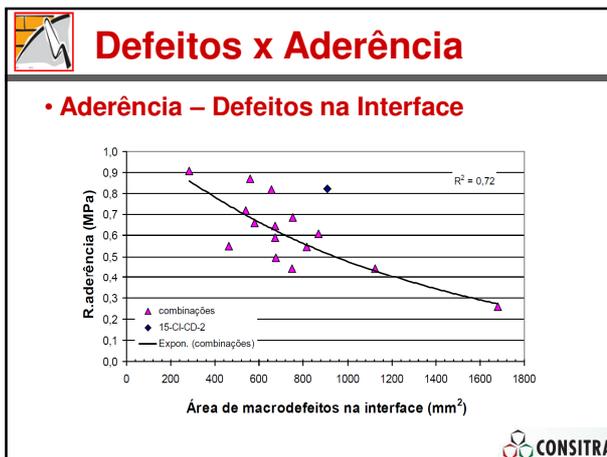
D defeitos

- **Aderência – Defeitos na Interface**

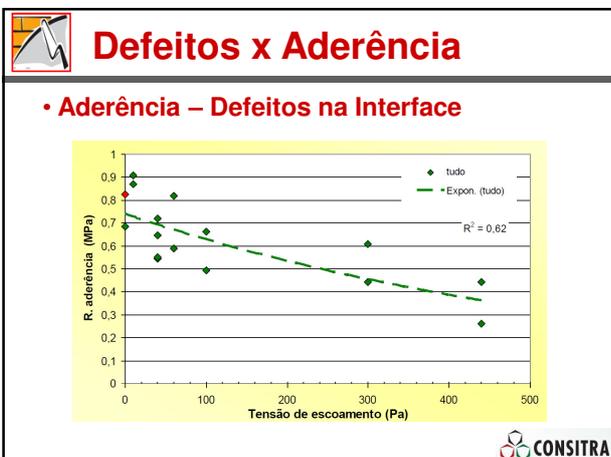
$E_{\text{lançamento}} < E_{\text{compactação}}$

- $E_{\text{compactação}}$ (Reologia)
Formulação, Processamento, Ambiente
- $E_{\text{lançamento}}$
Controlada pelo Operário ou pela Máquina

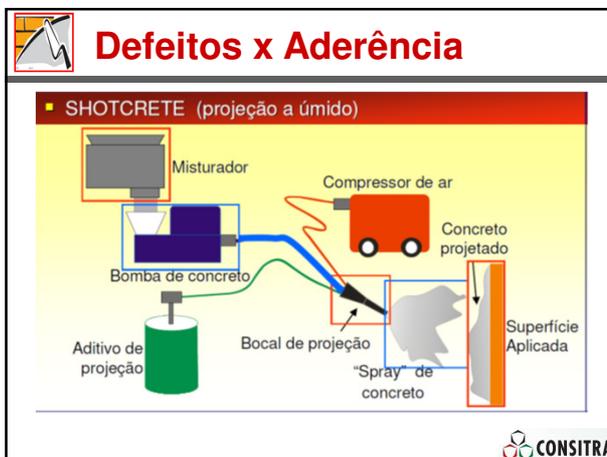
51



52



53



54

Defeitos x Aderência

55

Defeitos x Aderência

- Argamassa - Bombeamento

56

Argamassa - Bombeamento

Composição	Free Flow (%)
comp A	85.7
comp B	22.7
comp C	23.0

Composição B: ↑ torque 75 rpm - bombeamento difícil

57

Argamassa - Projeção

58

Argamassa

Suspensão de partículas sólidas em água

59

Argamassa

Suspensão complexa de partículas sólidas em água

60



Reologia

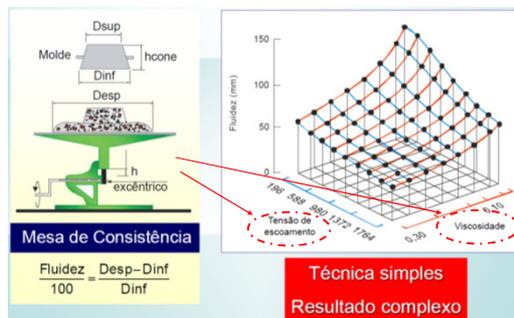
Como se Avalia a Reologia de Argamassas?

61



Métodos Tradicionais

• Análises Monoponto



62



Métodos Tradicionais

• Análises Monoponto



• Vantagens!

- Dinâmico: Avalia τ_0 e η
- Avalia a segregação (impactos)

• Desvantagens...

- Não informa os parâmetros reológicos...
- Não reproduz a prática (lançamento com impacto intenso + espalhamento)

63

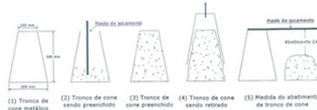


Concreto - Estado Fresco

• Trabalhabilidade (NBR NM 67 / 98)

“Propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade.”

- Consistência = fluidez + coesão (Transporte, lançamento, adensamento e acabamento)
- Tronco de cone: “Slump Test”



64

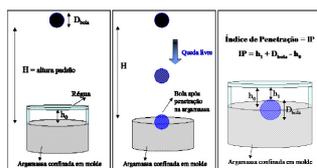


Métodos Tradicionais

• Análises Monoponto



Dropping Ball



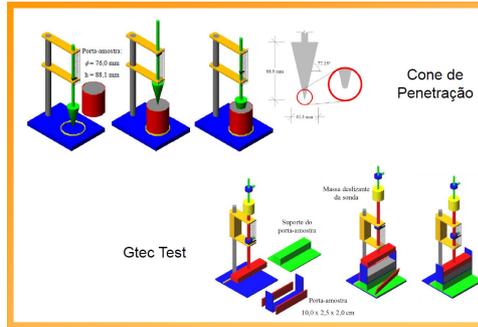
Penetração é função da viscosidade, tensão de escoamento e viscoelasticidade da argamassa

65



Métodos Tradicionais

• Análises Monoponto



66

Métodos Tradicionais

Análises Monoponto

✓ Cone de fluidez – ASTM C939

✓ Teste de fluxo confinado;
✓ Resultado – medida de tempo;
✓ Não pode ser utilizado para materiais que entopem o cone ou não fluem constantemente;

✓ Cone de Marsh

✓ Ensaio não normalizado;
✓ mudança na geometria do funil;
✓ Utilizado para controle de qualidade de cimentos;

✓ Pastas e argamassas que fluem sob ação do próprio peso

67

Métodos Tradicionais

Por quê as Análises Monoponto são insuficientes ???

Tensão de escoamento
 $A > B > C$

Viscosidade baixas taxas
 $B > A > C$

Viscosidade altas taxas
 $C > B > A$

68

Reologia

Tipos de Comportamento Reológico

Independentes do Tempo

(1) newtoniano
(2) de Bingham
(3) pseudoplástico
(4) pseudoplástico com tensão de escoamento
(5) dilatante
(6) dilatante com tensão de escoamento

Tensão de escoamento $\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma$

τ (Pa): tensão de cisalhamento
 τ_0 (Pa): tensão de escoamento
 μ_p (Pa.s): viscosidade plástica
 γ (s⁻¹): taxa de cisalhamento.

69

Reologia

Tipos de Argamassa x Comportamento Reológico

Assentamento

70

Reologia

Tipos de Argamassa x Comportamento Reológico

Revestimento

71

Reologia

Tipos de Argamassa x Comportamento Reológico

Projeção

72



Reologia

• Tipos de Argamassa x Comportamento Reológico

Auto Adensável



73



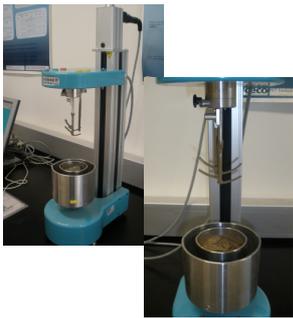
Como se Avaliar a Reologia de Argamassas?

74



Reômetro

• Viskomat NT

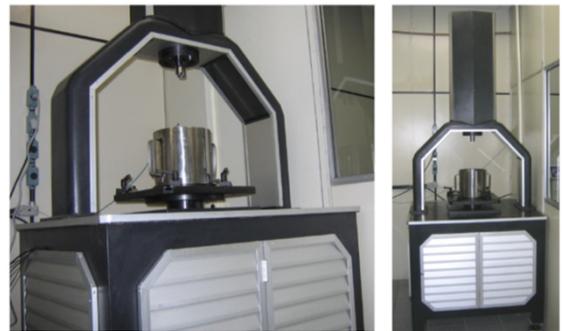


• Rheotest

75



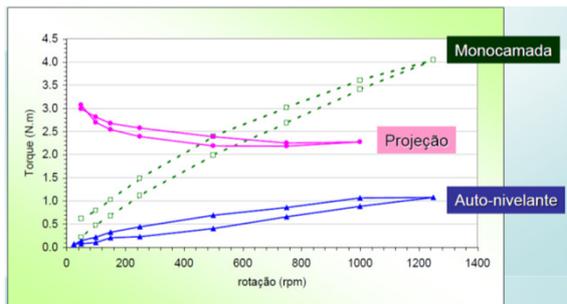
Reômetro



76



Reômetro

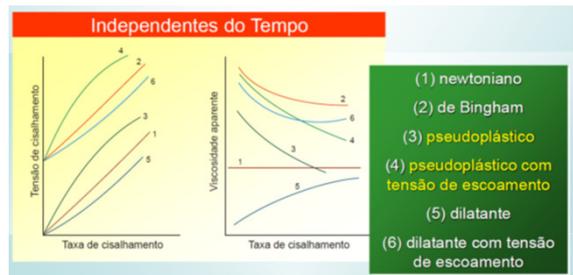


77



Reologia

• Viscosidade



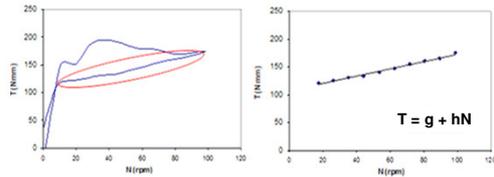
78



Argamassa – Estado Fresco

- Propriedades Reológicas
- Índice de Consistência – Reômetro

Modelo de Bingham



“T” é o torque, “g” a tensão de escoamento e “h”, a viscosidade plástica.

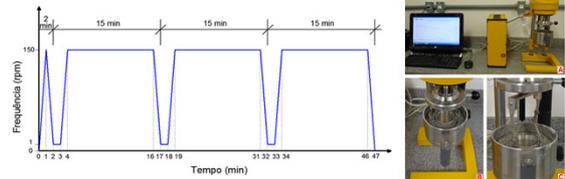
79



Argamassa – Estado Fresco

- Propriedades Reológicas
- Índice de Consistência – Reômetro

Avalia os concretos e argamassas sob uma série considerável de taxas de cisalhamento

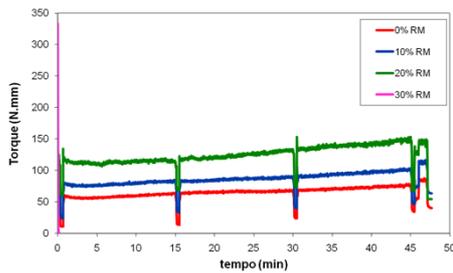


80



Argamassa – Estado Fresco

- Propriedades Reológicas
- Reômetro - exemplo



81



Deficiência!!!

Reômetros

- não lidam adequadamente com elevada plasticidade
- não simulam a aplicação sobre os substratos

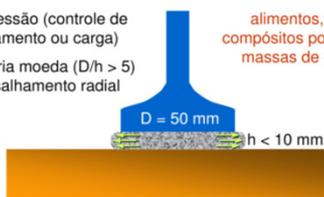
82



Squeeze Flow

Conceito:

- Compressão (controle de deslocamento ou carga)
- Geometria moeda (D/h > 5) gera cisalhamento radial



Método consagrado: alimentos, fármacos, compósitos polímero / fibras, massas de extrusão, ...

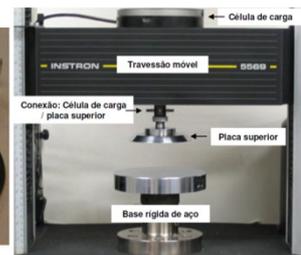
Simulação do cisalhamento na aplicação

83



Squeeze Flow

- Propriedades Reológicas
- “Squeeze-Flow”



84

Squeeze Flow

- Propriedades Reológicas
- "Squeeze-Flow" - Ensaio

85

Squeeze Flow

86

Squeeze Flow

- Propriedades Reológicas
- "Squeeze-Flow" - Interpretação dos Resultados

Estágio I: pequeno deslocamento - deformação elástica

Estágio II: deslocamento intermediário - deformação plástica e/ou fluxo viscoso

Estágio III: grande deslocamento - amaciamento por deformação

87

Squeeze Flow

- Propriedades Reológicas
- "Squeeze-Flow" - Resultado

As oscilações sugerem a ocorrência de altos níveis de cisalhamento interno no material

Exemplo de ajuste matemático de uma curva experimental de *squeeze-flow* que apresenta oscilação na carga causada pelo fluxo descontínuo de uma argamassa de revestimento industrializada testada 15 minutos após a mistura.

88

Squeeze Flow x Mesa

- Mesa de Escoamento (Flow Table)

1 Consistência > 340mm

2 Consistência = 279mm

89

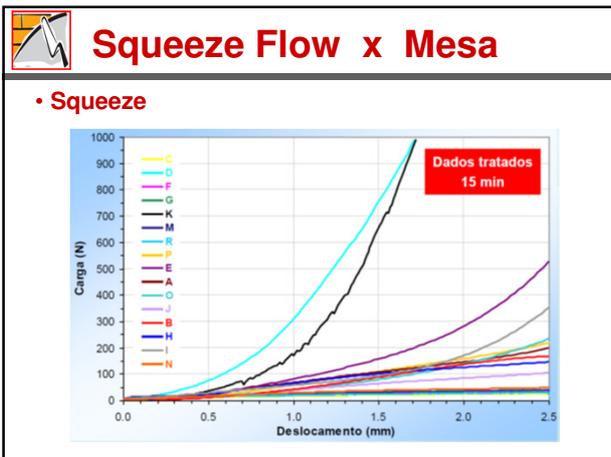
Squeeze Flow x Mesa

- Squeeze

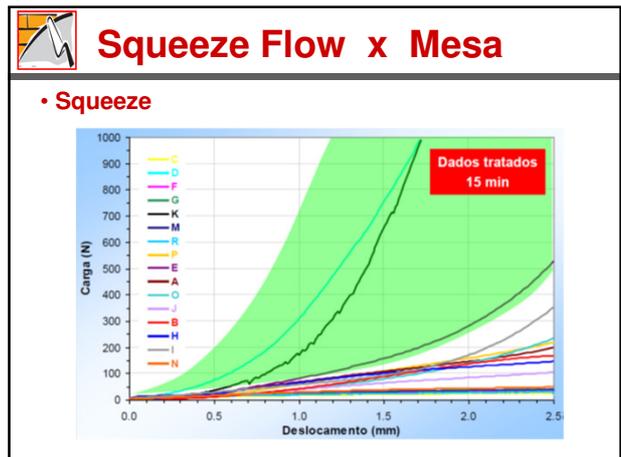
1 Cargas > 1000N

2 Cargas < 200N

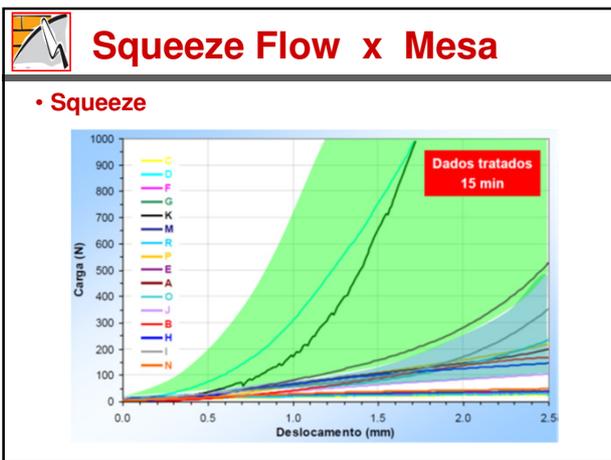
90



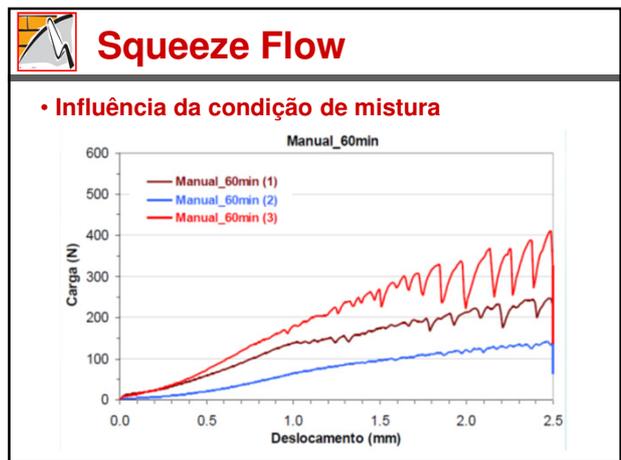
91



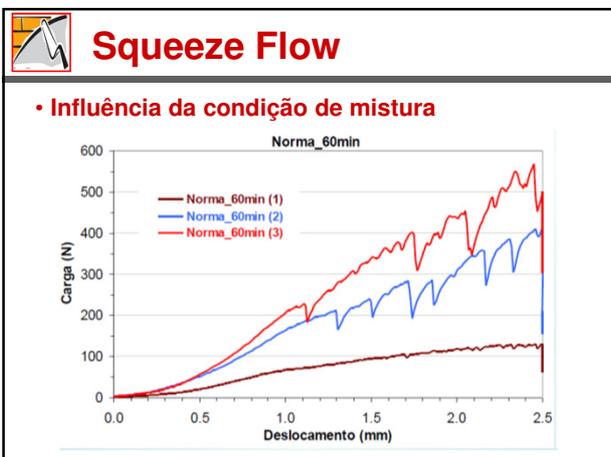
92



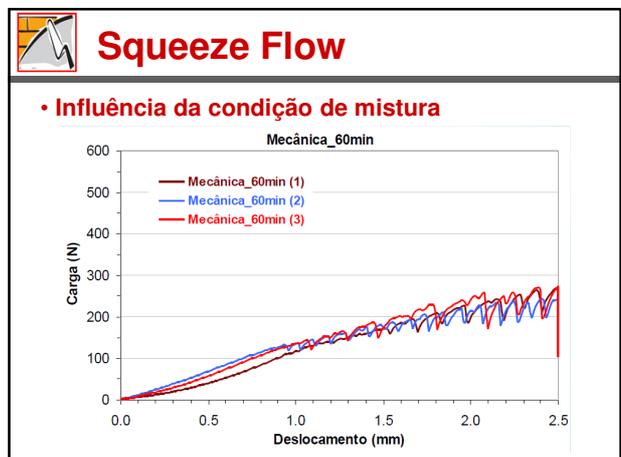
93



94



95



96

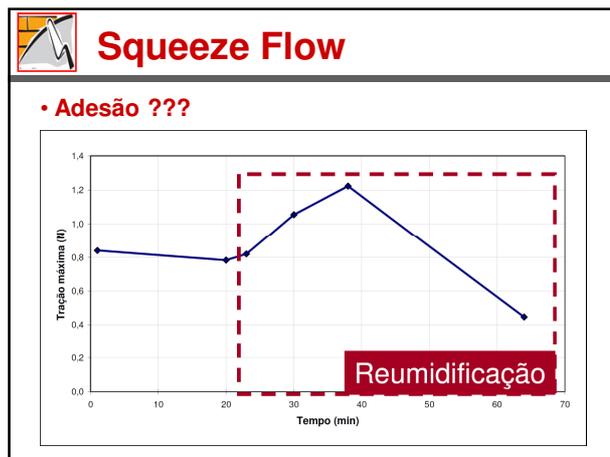
Squeeze Flow

• Adesão ???

(Após a mistura) Reumidificação

(3 min após umidificação) (18 min após umidificação)

97



98

Reologia

SQUEEZE FLOW

- técnica simples e absoluta
- ideal para simular aplicação

REÔMETROS

- avaliação das etapas de processamento, transporte e aplicação

★

99

Técnicas Analíticas

100

Métodos de Caracterização

- Reação Geral, métodos contínuos
- Calorimetria
- Retração Química
- Fases Sólidas
- DRX
- Análises Térmicas
- MEV
- Poros
- Porosimetria
- MEV

101

Métodos de Caracterização

- Fases Sólidas
- DRX
- + Rápido, qualitativo e quantitativo, disponível
- Apenas para materiais cristalinos
- Métodos Térmicos
- + Relativamente rápido e disponível
- + Informação sobre fases não cristalinas
- Quantitativo apenas para algumas fases (Ca(OH)_2)
- MEV
- + Muitas informações disponíveis
- Não disponível facilmente, muito sensível

102



Métodos de Caracterização

- **Erros**
 - Todas as medidas têm um erro intrínseco;
 - Para as técnicas de quantificação, o erro relativo pode aumentar e o erro absoluto pode diminuir;
 - Muito difícil de se detectar pequenas quantidades...
- **Pasta, argamassa ou concreto?**
 - Grande interesse na fase pasta;
 - Agregados (60-70%) agem como diluente;
 - Presença de agregados afetam a microestrutura da pasta;
 - Uso das pastas não são uma boa opção para o real;
 - MEV e outros métodos, em combinação.

103



Testes - Propriedades

- **Estado Fresco**
 - Trabalhabilidade;
 - Segregação;
 - Exsudação;
 - Massa Específica e Teor de Ar.
- **Estado Endurecido**
 - Resistência Mecânica;
 - Compressão, Tração e Fluência.
 - Capilaridade;
 - Condutibilidade Térmica;
 - Porosidade / Densidade;
 - Durabilidade;
 - Resistência ao fogo, Desgaste, reação álcali-agregado.

104



Estado Fresco

• Segregação

“...separação dos componentes de uma mistura heterogênea de modo que sua distribuição não seja mais uniforme.”

- 1) Misturas Secas: As partículas de agregados tendem a se separar da argamassa do concreto.
- 2) Excesso de água: Separação da pasta de cimento da mistura.

Não existem ensaios capazes de medir quantitativamente a segregação do concreto.

105



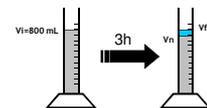
Estado Fresco

• Exsudação

“...tendência da água de amassamento de vir à superfície do concreto recém-lançado e adensado, antes de ocorrer a pega.”

- Resulta numa camada porosa, frágil e pouco durável.
- Atenuação: adição de grãos relativamente mais finos.
- Taxa de exsudação (ASTM C-232): Assentamento total por altura de concreto.

$$Tx_{\text{exsudação}} = \frac{(V_f - V_n)}{V_i}$$



106



Estado Fresco

• Massa Específica (NBR 9833 / 87)

“... massa por unidade de volume do concreto fresco adensado.”

• Teor de Ar Incorporado (NBR 9833 / 87)

“... volume de ar aprisionado ou incorporado ao concreto, expresso em porcentagem do volume total de concreto fresco adensado.”

$$Teor(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{prática}}}{\rho_{\text{teórica}}} \right) \quad \rho_{\text{teórica}} = \frac{M_c + M_a + M_b + M_{H_2O}}{\frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_a}{\rho_a} + \frac{M_b}{\rho_b} + \frac{M_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}}$$

107



Estado Endurecido

• Permeabilidade

“ ... propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso”

- Porosidade
- Densidade

Desgaste;

Fissuras (pressão de cristalização de sais nos poros);

Corrosão das Estruturas de Concreto Armado (Cl⁻).

108

Estado Endurecido

- Permeabilidade - Mecanismos de Transporte
- Permeabilidade;
- Absorção Capilar;
- Difusão;
- Migração Iônica.

109

Técnicas de Análise e Quantificação dos Poros

110

Porosidade

Conventional categories of pores structure

111

Porosidade

Filled pores as a function of RH: Kelvin Laplace equation

$$R_{pk} = -p_l \cdot \frac{M}{RT} \cdot (2 \cdot \sigma(T) \cdot \cos \beta) \cdot \frac{1}{\ln(HR)}$$

112

Porosidade

Distribuição de Tamanho de Poros

Porosimetria de Hg

113

Porosidade

Distribuição de Tamanho de Poros

Porosimetria de Hg

114



Porosidade

• Cuidados

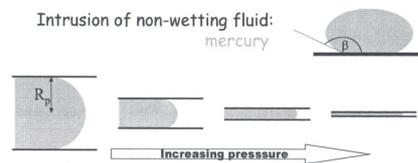
- Os métodos convencionais necessitam secagem (resultados mascarados);
- Porosimetria de Intrusão de Hg é muito usada, mas criticada (pouca representatividade, destrói a estrutura e não alcança todos os poros);
- Novos resultados com NMR (Ressonância Magnética Nuclear), com alta precisão e materiais sem secagem;
- Porosimetria (MIP) não é ruim, se você entender o que está acontecendo...

115



Porosidade

• Distribuição de Tamanho de Poros Porosimetria de Hg



$$\Delta P = - \frac{2\sigma \cos \alpha}{r}$$

116



Porosidade

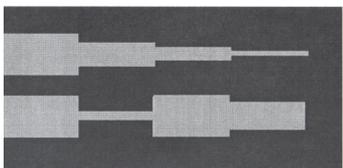
• Distribuição de Tamanho de Poros

- Porosimetria de Hg - Problemas

Tamanho das Amostras

Pré-secagem

Efeito "Ink bottle"



117



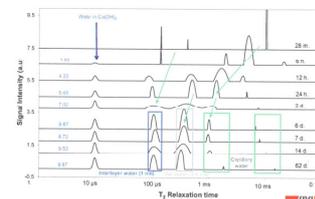
Porosidade

• Ressonância Magnética Nuclear (NMR)

- Eco Sólido: H₂O da Portlandita

- Sequência do pulso: H₂O intercadas, gel C-S-H, H₂O dos poros capilares.

Evolution of pore structures with hydration



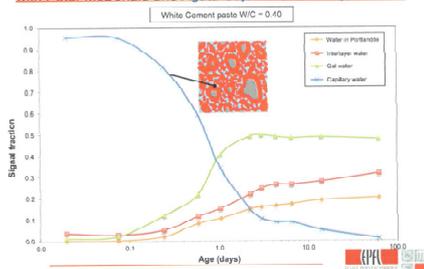
118



Porosidade

• Ressonância Magnética Nuclear (NMR)

TRANSCEND ITN: project 7 Arnaud Muller, EPFL with Peter McDonald and Agata Gajewicz, U Surrey, UK



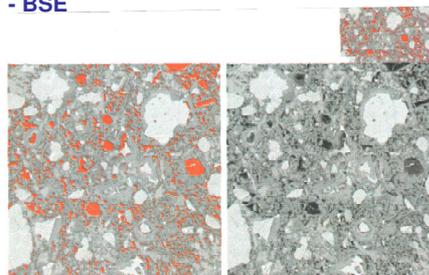
119



Porosidade

• Distribuição de Tamanho de Poros

MEV - BSE



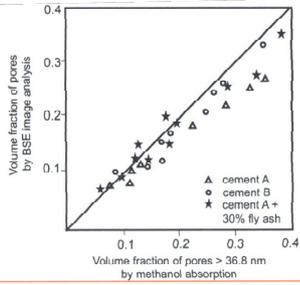
120



Porosidade

• Distribuição de Tamanho de Poros

MEV - BSE



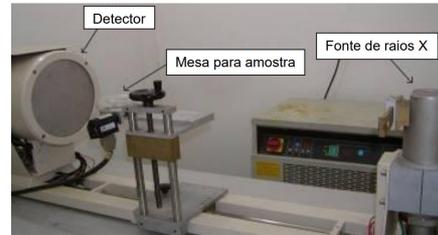
121



Porosidade

• Distribuição de Tamanho de Poros

Tomografia Computadorizada (TC)



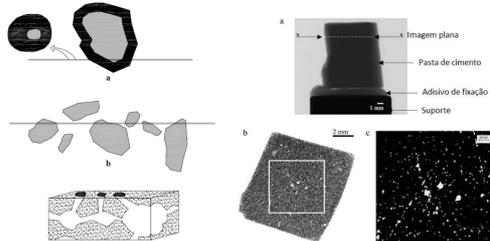
122



Porosidade

• Distribuição de Tamanho de Poros

Tomografia Computadorizada (TC)



Fonte: SCRIVENER, 2004

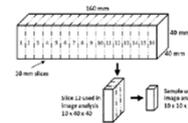
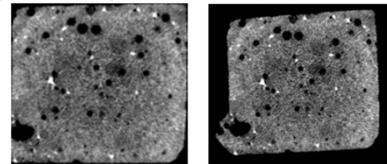
123



Porosidade

• Distribuição de Tamanho de Poros

Tomografia Computadorizada (TC)



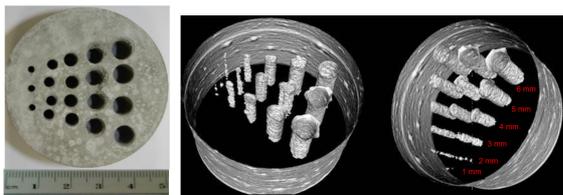
124



Porosidade

• Distribuição de Tamanho de Poros

Tomografia Computadorizada (TC)



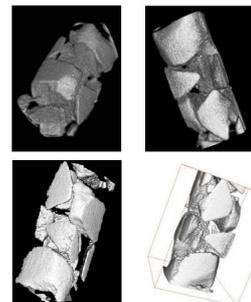
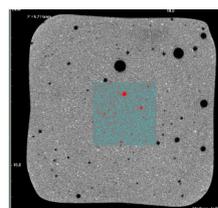
125



Porosidade

• Distribuição de Tamanho de Poros

Tomografia Computadorizada (TC)

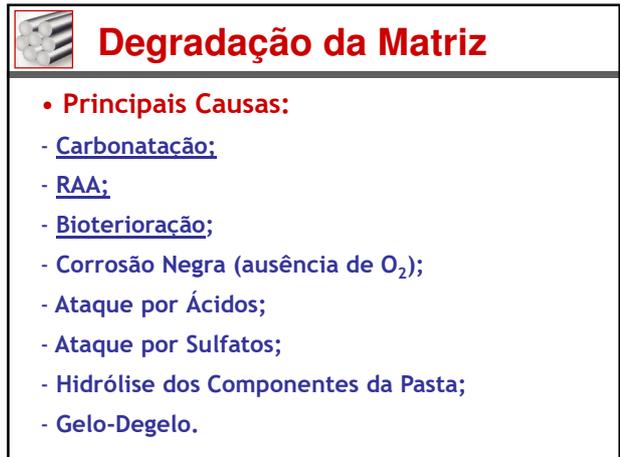


126



Degradation da Matriz Cimentícia

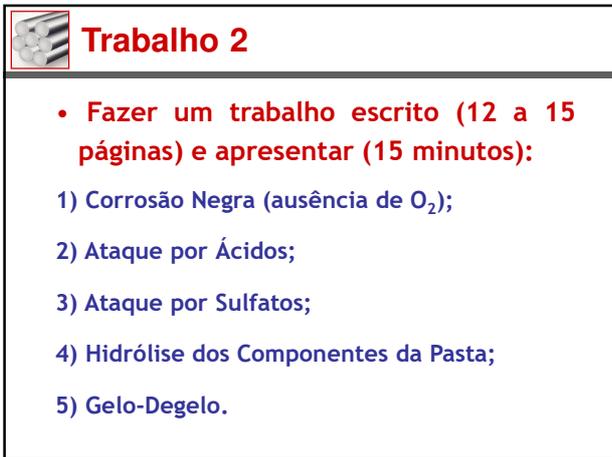
127



Degradation da Matriz

- Principais Causas:
 - Carbonatação;
 - RAA;
 - Bioterioração;
 - Corrosão Negra (ausência de O₂);
 - Ataque por Ácidos;
 - Ataque por Sulfatos;
 - Hidrólise dos Componentes da Pasta;
 - Gelo-Degelo.

128

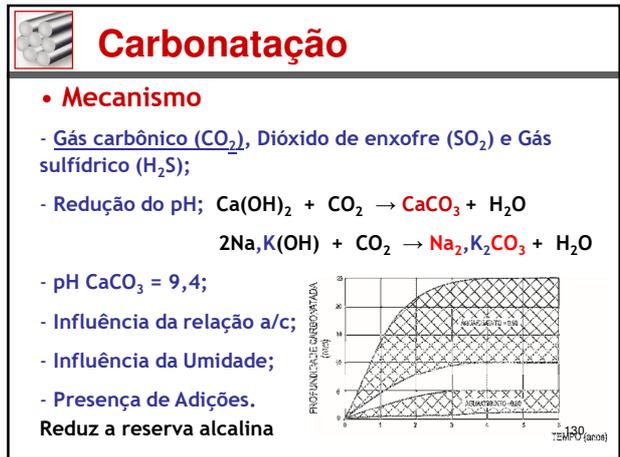


Trabalho 2

- Fazer um trabalho escrito (12 a 15 páginas) e apresentar (15 minutos):

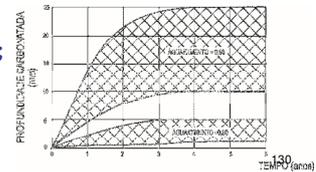
 - 1) Corrosão Negra (ausência de O₂);
 - 2) Ataque por Ácidos;
 - 3) Ataque por Sulfatos;
 - 4) Hidrólise dos Componentes da Pasta;
 - 5) Gelo-Degelo.

129

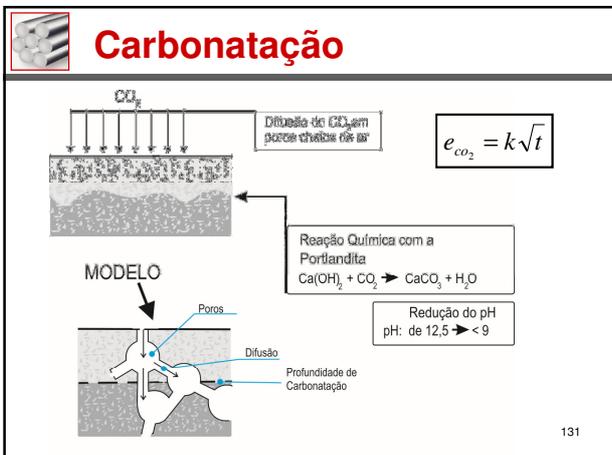


Carbonatação

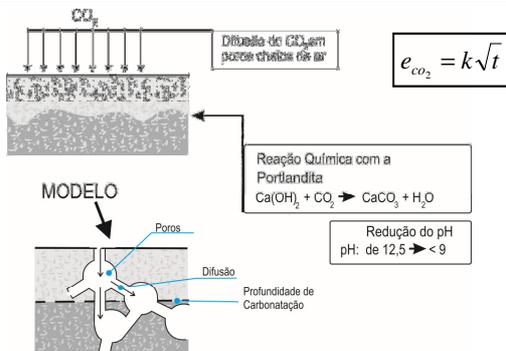
- Mecanismo
 - Gás carbônico (CO₂), Dióxido de enxofre (SO₂) e Gás sulfídrico (H₂S);
 - Redução do pH; $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
 - $2\text{Na, K(OH)} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2, \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
 - pH CaCO₃ = 9,4;
 - Influência da relação a/c;
 - Influência da Umidade;
 - Presença de Adições.
- Reduz a reserva alcalina



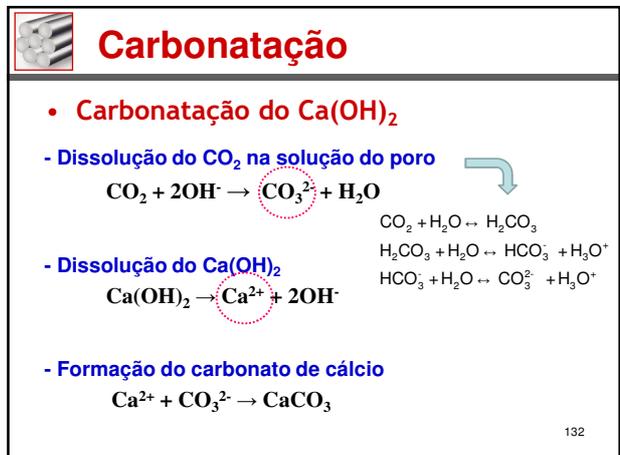
130



Carbonatação



131



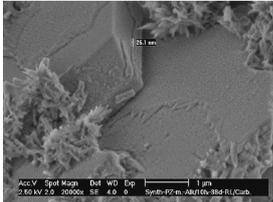
Carbonatação

- Carbonatação do Ca(OH)₂
 - Dissolução do CO₂ na solução do poro
 - $\text{CO}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
 - $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
 - $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}_3\text{O}^+$
 - $\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_3\text{O}^+$
 - Dissolução do Ca(OH)₂
 - $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$
 - Formação do carbonato de cálcio
 - $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$

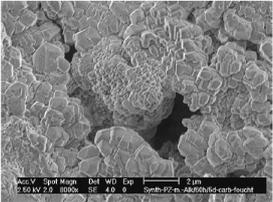
132

Carbonatação

- Carbonatação do CH



Camada de CaCO₃ sobre o Ca(OH)₂



Cimento hidratado completamente carbonatado

(HÄUBLER *et al.*, 2001)¹³³

133

Carbonatação

- Carbonatação de bases alcalinas (NaOH e KOH)

"Em presença de bases alcalinas (NaOH e KOH), a solubilidade do Ca(OH)₂ é baixa e a sua carbonatação é lenta. No entanto, essas bases podem se carbonatar."

- Carbonatação do NaOH e KOH:

$$\text{H}_2\text{CO}_3 + 2\text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$$

$$\text{H}_2\text{CO}_3 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$$

"A carbonatação das bases alcalinas aumenta a solubilidade do Ca(OH)₂, que passa a se carbonatar em maior quantidade."

- Formação do carbonato de cálcio:

$$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{CO}_3 + 2\text{KOH}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{CO}_3 + 2\text{NaOH}$$

134

134

Carbonatação

- Carbonatação de outros compostos da pasta de cimento hidratada (silicatos e aluminatos)

- O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é inicialmente descalcificado, diminuindo sua relação Ca/Si e, posteriormente, é convertido em sílica gel:

$$\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$$

Ácido carbônico

C-S-H

Carbonato de cálcio

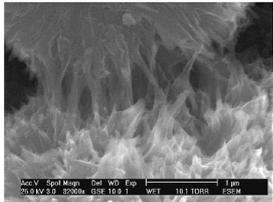
Sílica gel

135

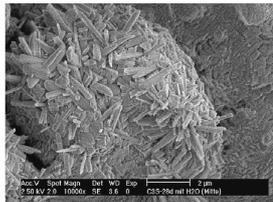
135

Carbonatação

- Carbonatação do C-S-H



C-S-H proveniente da hidratação do C₃S



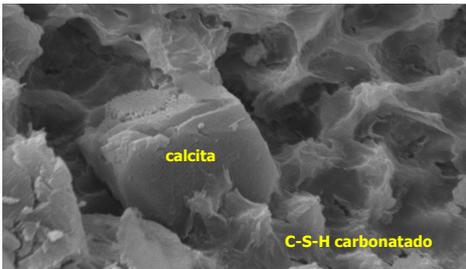
C-S-H carbonatado (3% CO₂ por 28 dias)

(HÄUBLER *et al.*, 2001)

136

Carbonatação

- Carbonatação do C-S-H



calcita

C-S-H carbonatado

FURNAS TECNOLOGIA Detector = SE1 Date: 21 Nov 2002
MAG = 12.00 K X 2µm

137

Carbonatação

- Carbonatação de outros compostos da pasta de cimento hidratada (silicatos e aluminatos)

- Carbonatação da etringita e monossulfato:

"A etringita e o monossulfato produzem alumina gel e gesso"
- Carbonatação dos aluminatos hidratados:

"Os aluminatos hidratados C₄AH_x são convertidos rapidamente em C₄AH_x e posteriormente em alumina gel"

$$\text{4CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O} + 4\text{CO}_2 \rightarrow 4\text{CaCO}_3 + 2\text{Al(OH)}_3 + 10\text{H}_2\text{O}$$

Aluminato de cálcio hidratado

Carbonato de cálcio

Alumina gel

138

138

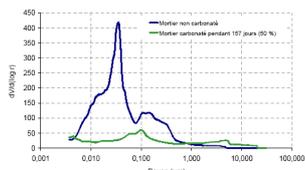


Carbonatação

- Efeitos sobre a microestrutura do concreto
 - Redução da porosidade total e/ou refinamento de poros: CaCO_3 que possui volume maior (cerca de 11% maior que do Ca(OH)_2) → colmatção dos poros;

1 mol de $\text{Ca(OH)}_2 = 33,2 \text{ cm}^3 \rightarrow$ 1 mol de $\text{CaCO}_3 = 36,9 \text{ cm}^3$ (↑11%)

1 mol de C-S-H são = $12 \text{ cm}^3 \rightarrow$ 1 mol de C-S-H carbonatado = 16 cm^3 (↑33%)



139

139



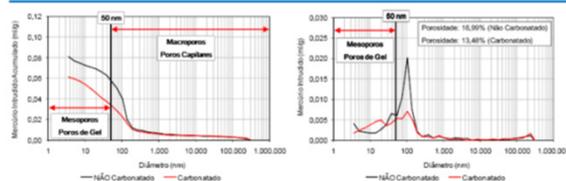
Carbonatação

- Efeitos sobre a microestrutura do concreto

Fisicamente

- Redução da porosidade
- Refinamento dos poros

CP V – ARI



140

140



Carbonatação

- Efeitos sobre a microestrutura do concreto
 - Influência da Carbonatação na Difusão de Cloretos (Cl^-)

	Cimento CEM I	Cimento CEM II	Cimento CEM III
D ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) Concreto não carbonatado	1,5	3,3	0,8
D ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) Concreto carbonatado	0,2	0,5	0,3

(OLLIVIER, 2009)

141

141



Carbonatação

- Efeitos sobre a microestrutura do concreto

- Retração por Carbonatação

- Perda de moléculas de água na reação principal de carbonatação;

- Diminuição de volume na pasta de cimento endurecida (dissolução do Ca(OH)_2 em zonas onde ele está sob tensão e a precipitação do CaCO_3 em espaços não sujeitos à tensão).

✓ Se confunde com a retração por secagem e contribui para a parcela irreversível dessa retração (NEVILLE, 1997);

✓ Pode contribuir com fissuração generalizada da superfície exposta do concreto e pode ser significativa em pequenos CPs (TAYLOR, 1990).

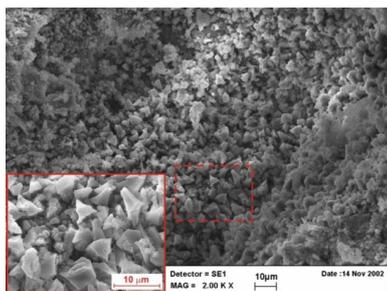
142

142



Carbonatação

- Morfologia típica da calcita (CaCO_3) vista ao MEV



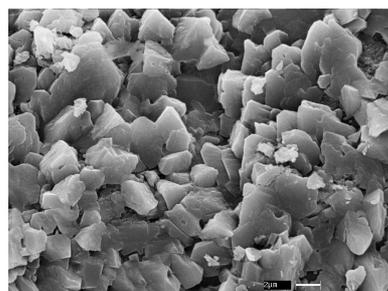
143

143



Carbonatação

- Morfologia típica da calcita (CaCO_3) vista ao MEV

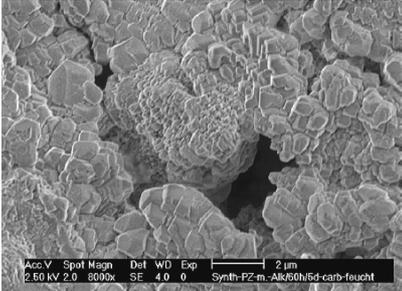


144

144

Carbonatação

- Morfologia típica da calcita (CaCO_3) vista ao MEV



Acc.V Spot Magn Det WD Exp 2 µm
2.50 kV 2.0 8000x SE 4.0 0 Synth-PZ-m-Alt96h/5d-carb-feucht

145

Carbonatação

- Efeitos
- Redução do pH:
 - pH do concreto → 12,5 a 13,5
 - pH crítico (despassivação) → 11,5 a 11,8
 - pH de precipitação do CaCO_3 → 8,3 a 9,0

Efeito negativo

- principal "efeito colateral" da carbonatação
- importante agente iniciador da corrosão

146

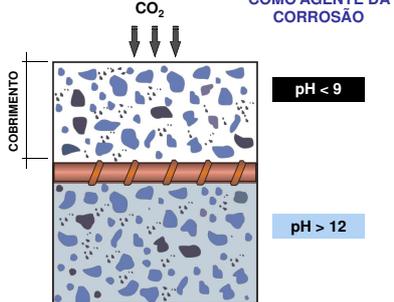
Carbonatação

- Frente de carbonatação.

CO₂

COBRIMENTO

CARBONATAÇÃO COMO AGENTE DA CORROSÃO



pH < 9

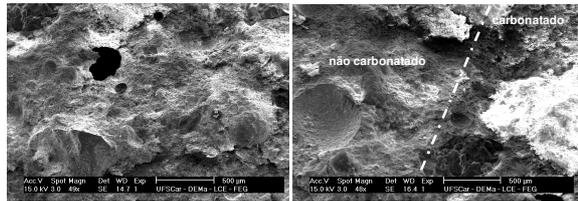
pH > 12

(CASTRO, 2002)

147

Carbonatação

- MEV



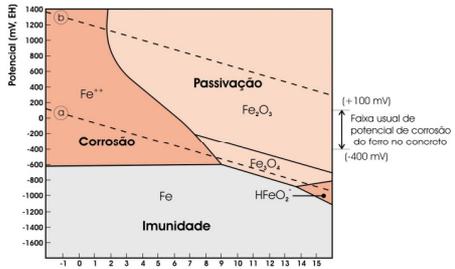
Região Carbonatada

Interface

148

Carbonatação

- Diagrama de Equilíbrio Termodinâmico do Sistema Fe-H₂O a 25 °C - Diagrama de Pourbaix.



Potencial (mV/EH)

pH

Corrosão

Passivação

Imunidade

Fe²⁺

Fe₂O₃

Fe₃O₄

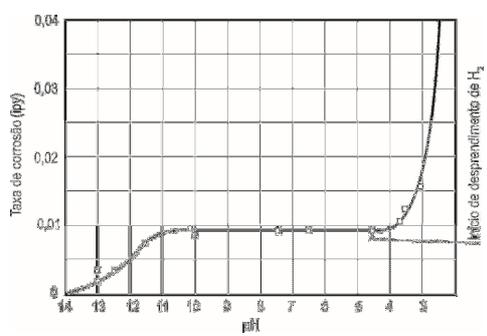
Fe

HFeO₂⁻

Faixa usual de potencial de corrosão do ferro no concreto (-400 mV) (+100 mV)

149

Carbonatação

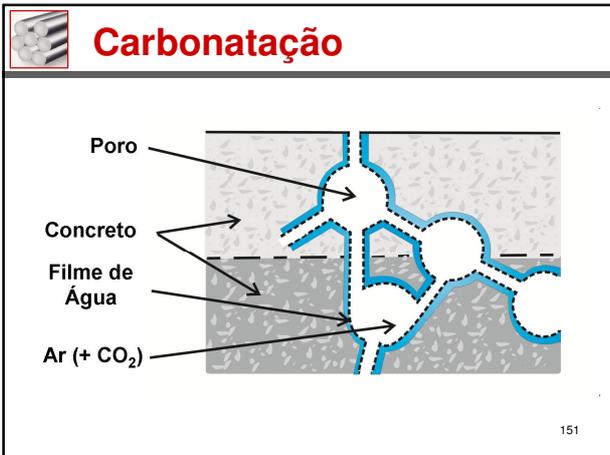


Taxa de corrosão (ppb)

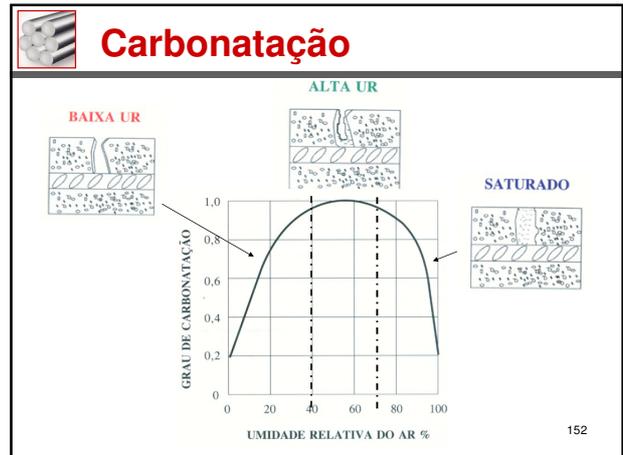
pH

Início de desprendimento de H₂

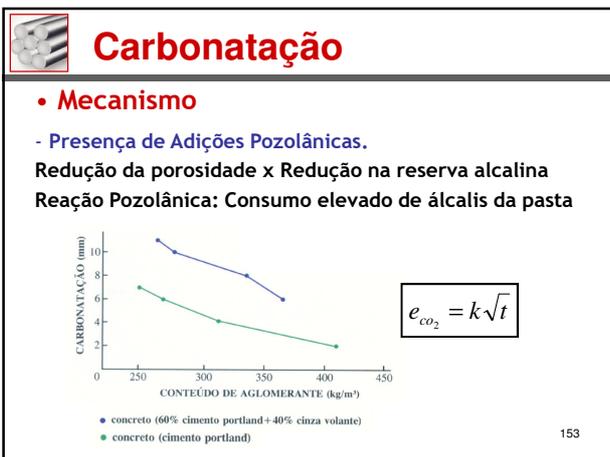
150



151



152



153

- ### Carbonatação
- Métodos**
 - Determinação precisa: prismas Nicol;
Dupla refração sofrida pelo carbonato de cálcio.
Técnica pouco acessível.
 - Indicador Fenolftaleína (pH = 9,5) ou indicador Timolftaleína (pH = 10,5);
Solução aquo-alcóolica com 1% do indicador.
 - Uso de Câmara de Carbonatação;
 - MEV;
 - Análises Térmicas;
 - Resistência à Flexão, outros...
- 154

154



155



156

Carbonatação

- Carbonatação x corrosão

(D) 52 dias

(E) 91 dias

(F) 180 dias

157

157

Carbonatação

- A previsão do início da corrosão, baseada na velocidade de avanço da carbonatação e na espessura do cobrimento, pode ser feita pela seguinte equação:

$$e = k \cdot t^{1/2}$$

Onde: "e" é o cobrimento em cm, "t" é a idade prevista para início da corrosão; "k" é uma constante que varia com o a/c, fck, % de CO₂ do ar e com a agressividade do meio.

$k_c = 1,8 \text{ a } 12,0 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$
(BATISTA; CASCUDO; CARASEK, 2013)

158

158

Carbonatação

Medida da Frente de Carbonatação

Fenolftaleína (8,3 – 10,0)

Amarelo de Alizarina GG (10,1 – 12,0)

159

159

Carbonatação

- Frente de Carbonatação

(GONÇALVES; SALTA, 1996)

160

160

Carbonatação

- Métodos
- Termogravimetria;

161

161

Carbonatação

- Métodos
- Difração de raios X - DRX;

162

162

Carbonatação

- Métodos
- Espectroscopia de infravermelho;

YLMÉN; JÄGLID, 2013) 163

163

Carbonatação

- Métodos
- Análise Petrográfica;

(OLIVEIRA apud CASCUDO; CARASEK, 2011) 164

164

Carbonatação

- Dúvidas
- As adições minerais realmente produzem queda no desempenho do concreto em relação à carbonatação? Mito ou verdade?
- Existem riscos de que, baseados na resistência (fck), os concretos com adições minerais não atinjam VUPs de 50, 63 ou 75 anos, conforme previsto na NBR 15575 (norma de desempenho)?
- Quais os parâmetros de controle (das adições e dos concretos) para que se garanta durabilidade e vida útil?

165

165

Carbonatação

VARIÁVEIS

- Cura**
 - Cura úmida (UR=90%)
 - Cura em local seco e protegido de intempéries
- Adições minerais**
 - Sílica ativa
 - Cinza de casca de arroz
 - Metacaulim
 - Cinza volante
 - Escória de alto-forno
 - Sem adição (Referência)
- Relação a/ag**
 - 0,40
 - 0,55
 - 0,70

166

166

Carbonatação

Concreto a/ag = 0,40 - Cura Úmida

Concretos: relação a/ag = 0,40

Concreto a/ag = 0,40 - Cura Seca

167

167

Carbonatação

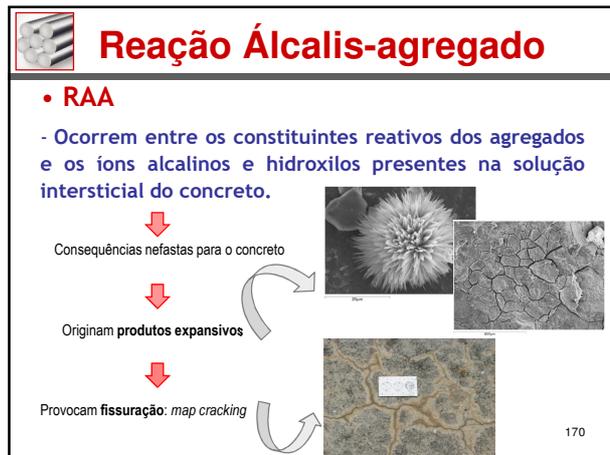
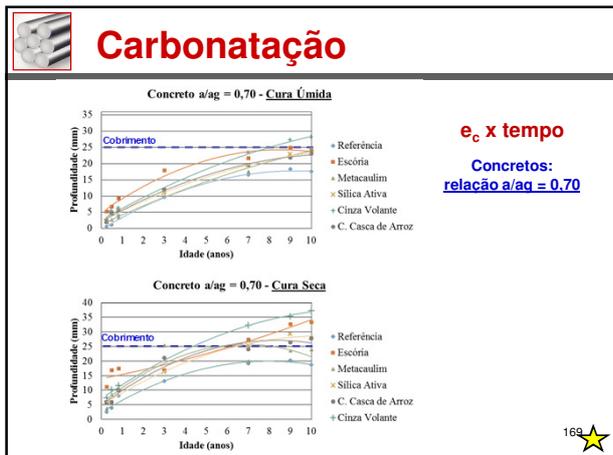
Concreto a/ag = 0,55 - Cura Úmida

Concretos: relação a/ag = 0,55

Concreto a/ag = 0,55 - Cura Seca

168

168



A Sílica (SiO₂)

- Formas Cristalinas.
 - Natural: β -quartzo, $\beta 1$, $\beta 2$, tridimita, cristobalita; coesita; stishovita; moganita, keatita;
 - Sintética: Keatita, sílica W, porosils.
- “Formas” Amorfas
 - Natural: Opala, sílica biogênica, terras diatomáceas, fibras de sílica, sílica vítrea;
 - Sintética: Sílica fundida, microsílica, pirogênica ou sílica evaporada, sílica precipitada, sílica coloidal, sílica gel.

171



Reação Álcalis-agregado

- RAA
- Se desenvolvem entre constituintes reativos dos agregados e íons alcalinos e hidroxilas presentes na solução intersticial da pasta de cimento, podendo ter um efeito altamente prejudicial para o concreto

Sílica reativa;

Reação com caráter fortemente expansivo;

Facilita a ocorrência da carbonatação e da corrosão.

$$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + 2 \text{NaOH} \rightarrow \text{SiO}_2\text{Na}_2 + (n+1)\text{H}_2\text{O}$$

$$x\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + 2 \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 + (n+1)\text{H}_2\text{O}$$

173

Reação Álcalis-agregado

- Tipos
- Reação álcalis-sílica (RAS, mais comum)
- Reação álcalis sílica + silicato
- Sílica reativa - estrutura mais ou menos desordenada, com maior instabilidade (tais como opala, calcedônia, cristobalita e tridimita, certos tipos de vidros naturais vulcânicos e artificiais);
- Reação entre íons alcalinos (Na⁺, K⁺) e hidroxila (OH⁻);
- Produto: gel de álcali-silicato;
- RAS é, geralmente, sinônimo de RAA.

174

Reação Álcalis-agregado

• Tipos

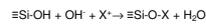
- Reação álcalis-carbonato (RAC)
- Agregados rochosos carbonáticos ou calcário-dolomíticos;
- Decomposição do carbonato duplo de cálcio e magnésio (dolomita) por ação da solução intersticial alcalina;
- Não há formação do gel expansivo, mas, há cristalização de compostos como brucitas, carbonatos alcalinos, carbonato cálcico e silicato magnésiano

175

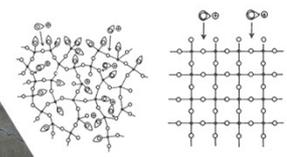
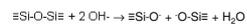
175

Reação Álcalis-agregado

Parâmetros que afetam a velocidade de degradação do concreto por RAA



Em que X representa os íons Na^+ ou K^+

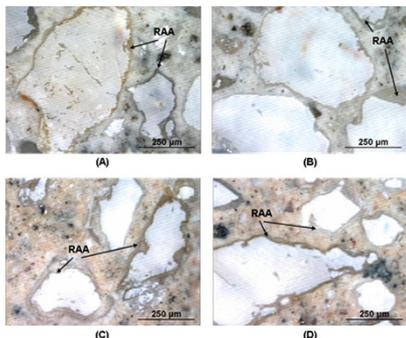


176

176

Reação Álcalis-agregado

• RAA

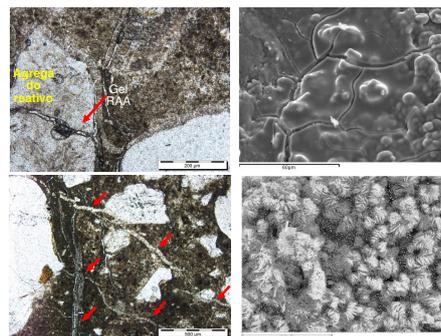


177

177

Reação Álcalis-agregado

Efeitos microscópicos no concreto



- Expansão do gel
- Fissuração do agregado e da pasta

178

178

Reação Álcalis-agregado

Efeitos microscópicos no concreto



- Expansão do gel
- Fissuração do agregado e da pasta

179

179

Reação Álcalis-agregado

Efeitos macroscópicos no concreto

- Expansão da estrutura e degradação



180



Reação Álcalis-agregado

• Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

1. Classificar as Estruturas (classes A, B ou C)
2. Determinar o grau de reatividade do agregado (R0 a R3)
3. Determinar o grau de risco da reatividade do agregado e as dimensões e condições de exposição
4. Estabelecer a intensidade da ação preventiva (MPO a MP4)

181

181



Reação Álcalis-agregado

• Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

1. Classificar as Estruturas (classes A, B, C ou D)

Classificação da Estrutura	Consequências da RAA	Exemplos
Classe A	Consequências pequenas ou insignificantes do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança	Estruturas temporárias, elementos não expostos à umidade, elementos não estruturais no interior de edifícios, canteiro de obras
Classe B	Consequências moderadas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança apenas se ocorrer degradação generalizada	Calçadas, calhas, telhas, muros, etc.
Classe C	Consequências significativas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração	Pavimentos de concreto, elementos de fundação, tubos, postes, alvenarias, tubulões, barreiras de segurança, estradas de baixo tráfego, dormentes, etc.
Classe D	Consequências sérias e de gravidade do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração	Grandes pontes, estádios, hidrelétricas, obras de arte, barragens, nucleares, torres eólicas, instalações de tratamento de água e esgoto, túneis e estruturas de difícil acesso

182



Reação Álcalis-agregado

• Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

2. Determinar o grau de reatividade do agregado (R0 a R3)

Reatividade Potencial do Agregado	Expansão das barras de argamassa, 30 dias (%)	Expansão dos prismas de concreto, 365 dias (%)
Potencialmente inócuo, R0	Menor que 0,19%	Menor que 0,04%
Potencialmente reativo, R1	Entre 0,19% e 0,40%	Entre 0,04% e 0,12%
Potencialmente reativo, R2	Entre 0,41% e 0,60%	Entre 0,13% e 0,24%
Potencialmente reativo, R3	Maior que 0,60%	Maior que 0,24%

183

183



Reação Álcalis-agregado

• Métodos de caracterização da reatividade dos agregados



Análise petrográfica



Ensaio acelerado de barra de argamassa (14d a 80°C)



Ensaio de prisma de concreto (3/5 meses a 60°C; 12/24 meses a 38°C)



Ensaio em condições de exposição natural

184



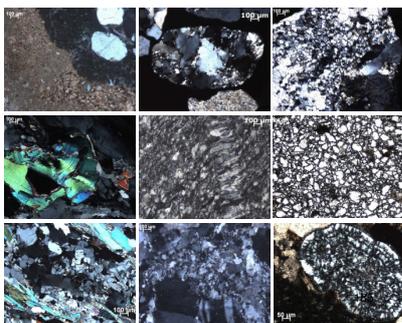
Reação Álcalis-agregado

• Métodos de caracterização da reatividade dos agregados



Análise petrográfica

- Rápido;
- A confiabilidade depende da experiência do petrógrafo;
- Dificuldade na identificação de alguns minerais reativos;
- Recomendação da realização de ensaios complementares.



185



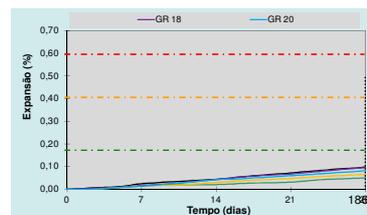
Reação Álcalis-agregado

• Métodos de caracterização da reatividade dos agregados



Ensaio acelerado de barra de argamassa (28 dias a 80°C)

- Ensaio rápido (30 dias);
- Permite avaliar a eficácia de adições minerais;
- Não deteta a reatividade de agregados de reatividade lenta e retardada;
- Considerado um ensaio severo, tem tendência a classificar como reativos agregados com bom desempenho em serviço.



186

Reação Álcalis-agregado

- RAA

1. Determinação da Reatividade dos agregados

NBR 15577-4 ("Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado")
2. Determinação da eficiência das adições ativas em mitigar a RAA

NBR 15577-5 ("Agregados - Reação álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado")



187

187

Reação Álcalis-agregado

- Método Acelerado das Barras de Argamassa

- NBR 15577-4:2018

Moldagem dos corpos de prova de argamassa;
Desmolde após 24h;
Manutenção por 24h em água a $80 \pm 2^\circ\text{C}$;
Manutenção em solução de NaOH (1M) a $80 \pm 2^\circ\text{C}$ e realizam-se medidas do comprimento a cada 2 dias (28 d);
Expansão superior a 0,19%: potencialmente Reativo (R1 a R3)



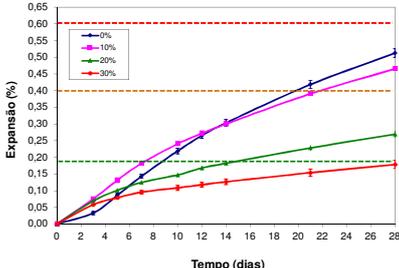
188

188

Reação Álcalis-agregado

- RAA

- NBR 15577:2018 - Exemplo



189

189

Reação Álcalis-agregado

- Método do Prisma de Concreto

- NBR 15577-6:2018

Moldagem dos prismas de concreto ($285 \times 75 \times 75 \text{ mm}^3$);
Utilização de cimento padrão e hidróxido de sódio na água de amassamento;
Desmolde após 24h;
Manutenção em estufa a $38 \pm 2^\circ\text{C}$ por 12 meses;
Para avaliação de mitigação: 24 meses
Se a expansão final for superior a 0,04%, o agregado é considerado potencialmente reativo (R1 a R3).

190

190

Reação Álcalis-agregado

- Método Acelerado do Prisma de Concreto

- NBR 15577-7:2018

Moldagem dos prismas de concreto ($285 \times 75 \times 75 \text{ mm}^3$);
Utilização de cimento padrão e hidróxido de sódio na água de amassamento;
Desmolde após 24h;
Manutenção em cura térmica a $60 \pm 2^\circ\text{C}$ por 20 semanas (4,5 meses)
Se a expansão final for superior a 0,03%, o agregado é considerado potencialmente reativo.

191

191

Reação Álcalis-agregado

- Métodos de caracterização da reatividade dos agregados

- O ensaio a 38°C (RILEM AAR-3, ASTM C 1293)
 - Considerado de referência para o estudo de agregados e composições de concreto;
 - Não deleta a reatividade de agregados de reatividade lenta e retardada e tem o inconveniente da duração.
- O ensaio a 60°C (RILEM AAR-4, NF P 18-454)
 - Tem a vantagem da duração ser menor;
 - Limites de reatividade ainda em avaliação;
 - Melhor desempenho na avaliação da reatividade de agregados de reatividade lenta e retardada.



Ensaio de prisma de concreto
3/5 meses @ 60°C
12/24 meses @ 38°C

192

192

Reação Álcalis-agregado

- Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

3. Determinar o grau de risco da reatividade do agregado e as dimensões e condições de exposição

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de Reatividade do Agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco (UR < 60%)	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Elemento Maciço (menor dimensão > 1m) em ambiente seco	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas expostas à umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito Alto
Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço (água do mar, solos contaminados, lençol freático contendo álcalis, etc.)	Desprezível	Alto	Muito Alto	Muito Alto

193

Reação Álcalis-agregado

- Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

4. Estabelecer a intensidade da ação preventiva (MP0 a MP4)

Risco de Ocorrência	Classe da Estrutura			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Desprezível	MP0	MP0	MP0	MP0
Mínimo	MP0	MP0	MP1	MP2
Moderado	MP0	MP1	MP2	MP3
Alto	MP0	MP3	MP4	MP4
Muito Alto	MP0	MP4	MP4	MP4

194

Reação Álcalis-agregado

- Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

4. Estabelecer a intensidade da ação preventiva (MP0 a MP4)

Intensidade da Medida Preventiva	Opção 1	Opção 2	Opção 3
MP0	Nenhuma ação é necessária		
MP1	Limitar o teor de álcalis a valores inferiores a 2,4 kg/m ³ de Na ₂ O _{eq} .	Utilizar cimentos dos tipos CPII-E, CPII-Z, CPIII ou CPIV	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva MP2
MP2	Usar o cimento CP III com no mínimo 60% de escória de alto forno	Usar o cimento CP IV com no mínimo 30% de pozolana	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva MP3
MP3	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação (acel.)	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação (2 anos)	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva MP4
MP4	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação (acel.)	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação (2 anos)	Trocar o agregado

195

Patologias - RAA

Métodos de prevenção da RAA

- Controlar o teor de álcalis do concreto
 - Limitar o teor de álcalis do concreto (cimento, adições, agregados ??);

196

Patologias - RAA

Métodos de prevenção da RAA

- Controlar o teor de álcalis do concreto
 - Utilização de adições pozolânicas (cinzas volantes, metacaulim, sílica fumo, escórias de alto-forno, ...).

197

Patologias - RAA

Métodos de prevenção da RAA

- Controlar o teor de umidade
 - Considerado na fase de projeto, recorrendo a revestimentos adequados

Adequado?

198

Patologias - RAA

Estruturas com RAA – Mitigação/Reparação

- Demolição
- Vias paliativas
 - reforço mecânico
 - corte

199

Patologias - RAA

Estruturas com RAA – Mitigação/Reparação

- Vias preventivas
 - impermeabilização
 - sais de lítio

200

Patologias - RAA

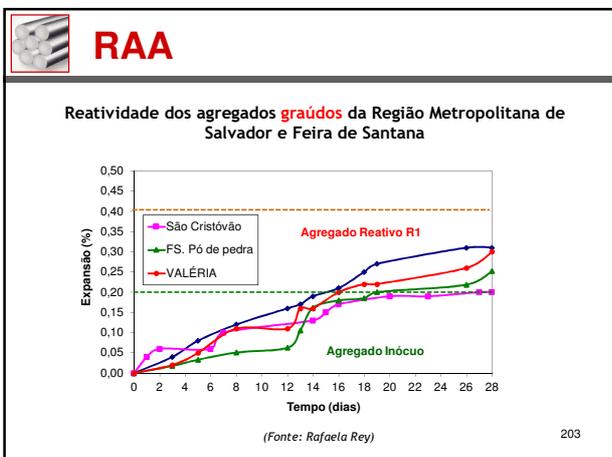
Estruturas com RAA – Mitigação/Reparação

201

Patologias - RAA

Estruturas com RAA – Mitigação/Reparação

2004 2013 202



RAA

- Prevenção da RAA:
 - Avaliação da reatividade dos agregados
 - Utilização de ADIÇÕES ATIVAS para mitigar a reação

Mecanismo de minimização da RAA - ADIÇÕES ATIVAS

- Diluição dos álcalis
- Redução do pH
- Redução da permeabilidade
- Retenção dos álcalis

204

RAA

- **Determinação da eficiência da sílica ativa em mitigar a RAA (CUIDADO!!!!)**

Fonte: Rafaela Rey

205

RAA

- A análise de desempenho das argamassas ratificou que a utilização de **sílica ativa melhora as propriedades** das matrizes cimentícias, resultando em argamassas mais resistentes à compressão e à tração na flexão e com menor permeabilidade;
- A **sílica ativa, mostrou capacidade em mitigar as expansões** ocasionadas pela reação álcalis-agregado quando aplicada nos teores de **10% e 15%**;
- Quando **utilizada em excesso pode ocorrer uma "saturação" da sílica ativa** na solução intersticial dos poros da matriz cimentícia, assim, a parcela que não reagirá com o Ca(OH)_2 , em excesso, ficará disponível para reagir com os álcalis que não foram incorporados na estrutura do C-S-H;

206

RAA

- **Determinação da eficiência da metacaulim em mitigar a RAA**

Fonte: Rafaela Rey

207

RAA

Anais do 11º Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas
Junho de 2015

INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS NA RAA EM ARGAMASSAS

R. OLIVEIRA REY
Graduada em Engenharia Civil
Universidade Federal da Bahia
Bahia, Brasil
rafaelarey2@gmail.com

D. VERAS RIBEIRO
Professor Adjunto II
Universidade Federal da Bahia
Bahia, Brasil
verasribeiro@hotmail.com

RESUMO

A reação álcalis-agregado (RAA) é uma manifestação patológica associada a reações químicas e está ligada diretamente à seleção dos materiais, que podem comprometer a durabilidade das estruturas. Analisou-se o efeito da sílica ativa e resíduo de corte de mármores e granito (RCMO) na capacidade de mitigar ou acelerar as reações provenientes da RAA. Foram produzidos corpos de prova em que a sílica ativa substituiu o cimento em teores de 10%, 15% e 20% e, em outros corpos de prova, o RCMO substituiu o agregado miúdo em teores de 10% e 20%, sendo estes comparados a amostras de referência, sem adições. Os resultados confirmam que a adição mineral com características pozolônicas possui capacidade de mitigar a RAA, porém, se utilizada em teores muito elevados pode contribuir para o desenvolvimento da reação. Os resultados referentes ao RCMO indicam que este resíduo é potencialmente inócuo, principalmente devido à alta cristalinidade do material.

Palavras-chave: RAA, materiais, adições minerais, mitigação.

208

RAA

- **Determinação da eficiência da cinza de eucalipto em mitigar a RAA**

Fonte: Rafaela Rey, Luciano Ferreira, Débhora França

209

RAA

FRANÇA, D. F. S.; REY, R. G.; FERREIRA, L. B. C.; RIBEIRO, D. V. Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 183-194, jul./set. 2014. ISSN 1518-2621 Associação Nacional de Tecnologia de Arquitetura e Construção. <http://dx.doi.org/10.1590/1518-26211403000300096>

Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland

Evaluation of mortar rheology, AAR and properties, in fresh state, using eucalyptus ash as partial replacement to Portland cement

Débhora Flávia Soto França
Rafaela Oliveira Rey
Luciano Renato Conceição Ferreira
Daniel Veras Ribeiro

Resumo

De acordo com o Balanço Energético Nacional (ano-base 2013), o consumo nacional de lenha foi de 79,29 milhões de toneladas. Estimase uma produção de cinza no orden de 3% durante esse processo, o que ocasiona problemas de armazenamento e de descarte. Sendo assim, a potencial transformação desses resíduos em matéria-prima para elementos construtivos apresenta-se como uma oportunidade para a preservação do meio ambiente e para a redução do custo de materiais da construção civil. O presente trabalho objetiva, portanto, avaliar a viabilidade desse reaproveitamento por meio da análise das propriedades das argamassas no estado fresco, incluindo a reologia, além da susceptibilidade potencial (RAA), utilizando cinza proveniente da queima de carvões de eucalipto com teores de 10%, 20% e 30% de substituição, em massa, ao cimento Portland. Através dos ensaios realizados verificou-se que a utilização da cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento não altera significativamente as propriedades de argamassas no estado fresco e não apresenta suscetibilidade significativa, apresentando-se como uma alternativa de uso tecnicamente viável.

Palavras-chaves: Cinza de eucalipto, Argamassas, Reologia, RAA, Propriedades.

210

Reação Álcalis-agregado

- **Determinação da eficiência da lama vermelha em mitigar a RAA**

Tempo (dias)	0% (Azul)	10% (Roxo)	20% (Verde)	30% (Vermelho)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.05	0.05	0.05	0.05
4	0.10	0.10	0.10	0.10
6	0.15	0.15	0.15	0.15
8	0.20	0.20	0.18	0.15
10	0.25	0.25	0.20	0.16
12	0.30	0.30	0.22	0.17
14	0.35	0.35	0.23	0.17
16	0.40	0.40	0.24	0.18
18	0.45	0.45	0.25	0.18
20	0.50	0.50	0.26	0.19
22	0.55	0.55	0.27	0.19
24	0.60	0.60	0.28	0.20
26	0.65	0.65	0.29	0.20
28	0.70	0.70	0.30	0.21

211

Reação Álcalis-agregado

Cerâmica 58 (2012) 90-98

Estudo das reações álcalis-silica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento

Volume 5, Number 4 (August, 2012) p. 451-467 • ISSN 1983-4195

REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS
IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL

Effect of red mud addition on the corrosion parameters of reinforced concrete evaluated by electrochemical methods

Efeito da adição de concreto eletroquímico.

Cement and Concrete Research

Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete

D.V. Ribeiro^{1*}, J.A. Labrinha², M.R. Moreira³

*Department of Structural Control and Planning, Federal University of Bahia, Rua Adilberto Neto, 01, Federação, 40130-010, Salvador-BA, Brazil

2Department of Chemical Engineering, University of Maranhão (UEMA), Universidade de São João, 65065-900, São Luís, Maranhão, Brazil

3Department of Chemical Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Av. Pasteur, 209, 21541-900, Rio de Janeiro, Brazil

Abstract

212

Bioteração

- **Bioreceptividade**
 - Capacidade de ser colonizado por organismos vivos (rugosidade, porosidade, umidade e composição);
- **Tipos**
 - Bioteração Física ou Mecânica;
 - Bioteração Estética;
 - Bioteração Química Assimilatória;
 - Bioteração Química não Assimilatória.

213

Bioteração

- **Bioteração Física ou Mecânica**
 - Rompimento do material devido à pressão exercida (locomoção ou crescimento);
- **Bioteração Estética**
 - Mudança de coloração, colônias e manchas escuras
- **Bioteração Química**
 - Assimilatória: reação com mudança da microestrutura
 - Não Assimilatória: Formação de constituintes sobre a superfície.

214

Degradação

- **Impacto dos materiais cimentícios suplementares (SCM)**

Degradação	1º. Mecanismo	2º. Mecanismo	Impacto Geral
Carbonatação	Ligação	Transporte	Negativo
Cloretos	Transporte	Ligação	Positivo
RAS	pH da Solução nos poros	Alumina	Positivo
Gelo-Degelo	Saturação	????	Negativo
Sulfatos	Conversão do Afm embutido no C-S-H em ettringita	Transporte	Aparente Positivo

215

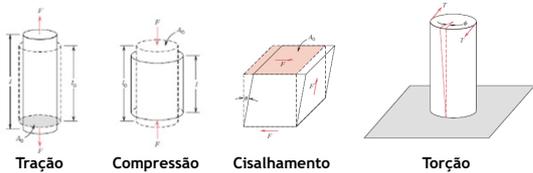
Efeito da Microestrutura nas Propriedades dos Materiais Cimentícios

216



Introdução

- **Conceitos de Tensão e Deformação.**
- **Tensões :** tração, compressão, cisalhamento e torção
- **Deformações:** elásticas e plásticas.



Tensão de Engenharia: $\sigma = \frac{F}{A_0}$

Deformação de Engenharia: $\epsilon = \frac{L_t - L_0}{L_0}$

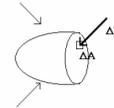
217



Tensão

- Grandeza que representa a relação da força interna no corpo deformável pela área em que atua;
- As tensões que se desenvolvem entre as partículas de um corpo são consequência dos esforços internos desenvolvidos;
- Esforços são elementos vetoriais (módulo, direção e sentido) → a tensão também é vetorial.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$



218



Deformação

- Deformação é a alteração da forma que sofre um corpo submetido a solicitações, devido ao movimentos das partículas que o constituem;
- Relação entre o alargamento (δ) e o comprimento (L) da peça;
- Tendência dos corpos de voltarem a forma original → força de atração entre as partículas.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{d\delta}{dL}$$

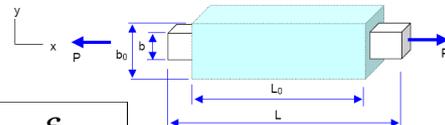
219



Deformação

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \epsilon = \frac{P \cdot L}{E \cdot A}$$

- **Coefficiente de Poisson (ν):**



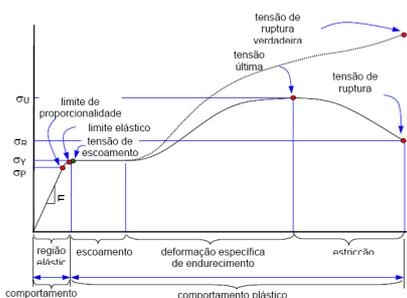
$$\nu = - \frac{\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{axial}}$$

220



Diagrama Tensão-deformação

- Gráfico $\sigma \times \epsilon$

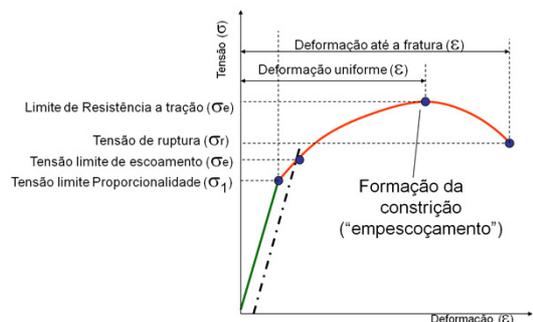


221



Diagrama Tensão-deformação

- Curva Típica Tensão x Deformação ($\sigma \times \epsilon$)



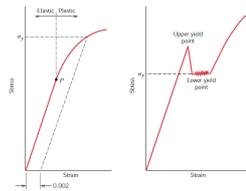
222



Diagrama Tensão-deformação

• Comportamento Plástico:

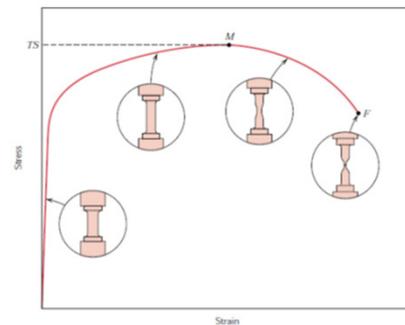
- Para a maioria dos materiais metálicos, as deformações puramente elásticas ocorrem até deformações de ~0,5%.
- Quando as deformações ultrapassam esse limite, a relação entre a tensão e a deformação deixa de ser linear (lei de Hooke), produzindo-se deformação permanente (não recuperável), chamada deformação plástica.



223



Diagrama Tensão-deformação

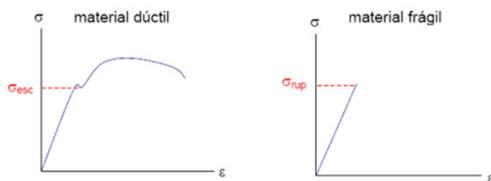


224



Ductilidade

- Representa a medida do grau de deformação plástica que foi suportado quando da fratura;
- Pequena deformação plástica ao romper : frágil
- Grande deformação plástica ao romper: dúctil



225

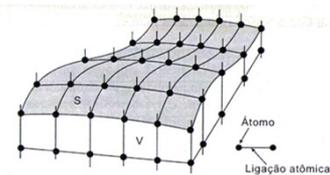


Fratura

- Energia de fratura (G) X Energia Superficial (γ)

$$G_c \geq 2 \cdot \gamma$$

- γ tem origem nas ligações atômicas de ligação interrompidas, isto é, f(densidade atômica)



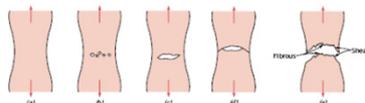
226



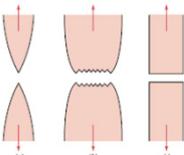
Fratura

• Fratura:

- Formação;
- Propagação.



• Fratura Dúctil x Fratura Frágil



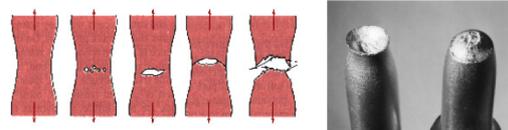
227



Fratura

• Fratura Dúctil:

- O material se deforma substancialmente antes de fraturar;
- O processo se desenvolve de forma relativamente lenta à medida que a trinca propaga;
- Este tipo de trinca é denominada estável, pois ela resiste a qualquer extensão adicional a menos que exista um aumento na tensão aplicada.



228



Fratura

- **Fratura Frágil:**
 - o material se deforma pouco, antes de fraturar;
 - O processo de propagação pode ser muito veloz, gerando situações catastróficas;
 - A partir de um certo ponto, a trinca é dita instável, pois ela se propagará mesmo sem aumento na tensão aplicada.

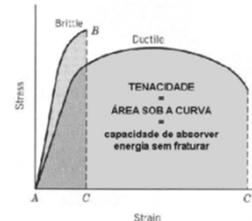


229



Tenacidade

- **Medida da habilidade de um material em absorver energia até a sua fratura;**
- f (geometria do CP e forma como a carga é aplicada)
- **Tenacidade ao entalhe: ensaio de impacto**



230



Mecânica da Fratura

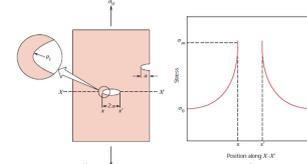
- **A resistência à fratura de um material sólido é uma função das forças de coesão que existem entre os átomos;**
- **Resistência coesiva teórica = E/10**
- Valor real = 10 a 1000 vezes menor
- **Concentração de Tensões**
- Presença de Defeitos (poros, trincas ou imperfeições);
- f (geometria e orientação da trinca).

231



Mecânica da Fratura

- **Resistência Mecânica**



- **Trinca com formato elíptico;**
- **Fator de concentração de tensões (K_t).**

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

232



Mecânica da Fratura

- **Teoria de Griffith**
- Todos os materiais frágeis possuem uma grande quantidade de defeitos e trincas;
- A fratura ocorrerá quando a resistência à tração teórica do material for excedida na extremidade de um desses defeitos;
- A tensão crítica exigida para a propagação da trinca:

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

E = módulo de elasticidade
 γ_s = energia superficial específica
 a = metade do comprimento de uma trinca interna

233



Estrutura x Propriedades

- **Fases Heterogêneas (tamanho e morfologia);**
- As propriedades são controladas pelos extremos microestruturais e não pela microestrutura média;
- Evolução microestrutural;
- Propriedades reológicas (melhor dispersão de partículas);
- Variações locais da relação a/c → estrutura heterogênea;
- **Resistência;**
- Forças de Van der Waals;
- Extensão e natureza das superfícies envolvidas
- Porosidade.

234



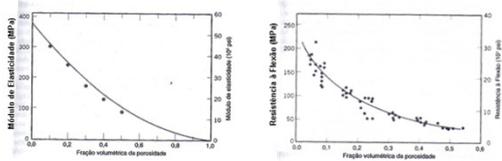
Estrutura x Propriedades

Resistência Mecânica

Influência da porosidade

Reduzem a resistência e o módulo de elasticidade, pois:

- Os poros reduzem a área de seção reta através da qual a carga é aplicada;
- Atuam como concentradores de tensão.

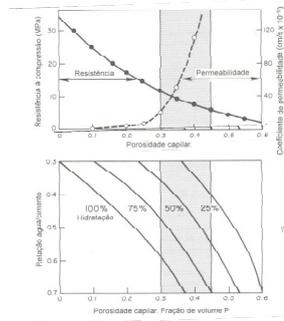


235



Estrutura x Propriedades

Resistência Mecânica



236

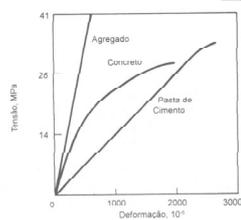


Estrutura x Propriedades

Comportamento Elástico

Medida indireta da rigidez do material;

O concreto e seus elementos não são perfeitamente elásticos (não linearidade $\sigma \times \epsilon$).



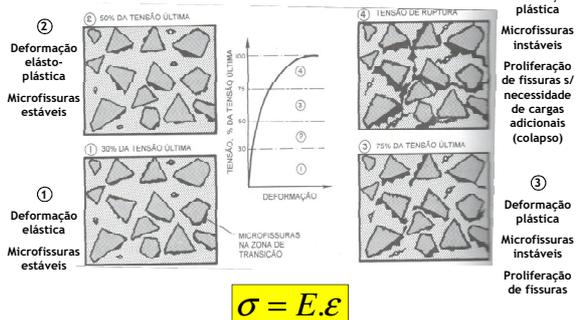
$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

237



Estrutura x Propriedades

Comportamento Elástico



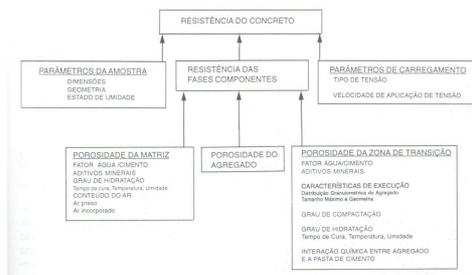
$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

238



Estrutura x Propriedades

Resistência Mecânica



239



Estrutura x Propriedades

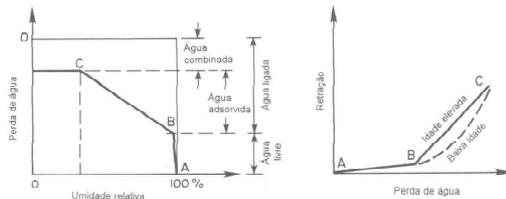
Estabilidade Dimensional

Resfriamento → contração térmica

Perda de água → retração por secagem

Menos importante para peças muito espessas;

Quando totalmente restringida, gera tensões de tração ($=E \cdot \epsilon$).



240



Estrutura x Propriedades

- **Remoção da água adsorvida**

- **Retração por secagem;**

Força motriz: ΔT

- **Tensão cte. aplicada \rightarrow fluência;**

Força motriz: Tensão aplicada

Fatores:

Materials e Dosagem;
Teor de agregado (coef. de deformação);
a/c;
Temperatura e Umidade;
Geometria.



241



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Escola Politécnica

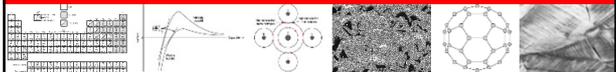
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

PPEC - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

ENG K25 - Ciência dos Materiais Cimentícios

UNIDADE II - Estados de Tensão, Reologia, Porosidade,
Degradação da Matriz Cimentícia, Microestrutura x
Propriedades

Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro
verasribeiro@hotmail.com



242