

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PCC - USP



Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química

Doutoranda: Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo
Orientador: Paulo Helene

São Paulo, setembro de 2009

1

Objetivo

PCC - USP



Durabilidade da técnica de RAQ

Eficácia da repassivação das armaduras em concreto carbonatado
Novos ciclos de carbonatação acelerada

Medidas de E_{corr} (ASTM C 876) e EIE (espectroscopia de impedância eletroquímica)
Medidas de profundidade de carbonatação eco_2 (RILEM C18)

?

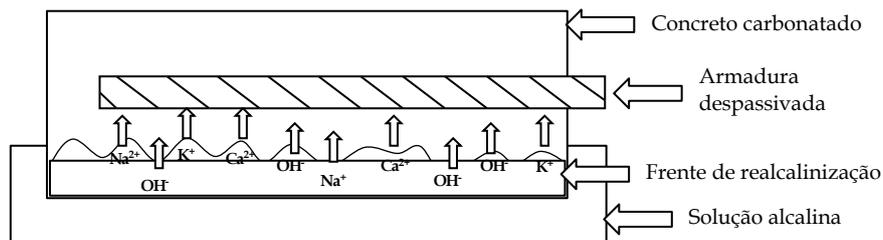
Slide 2 - 64

2

Realcalinização Química – RAQ



- Sem o emprego de corrente elétrica
- Princípio da absorção e difusão das soluções alcalinas
- Reparo não destrutivo
- Baixa geração de resíduos
- Utilização do local durante o tratamento



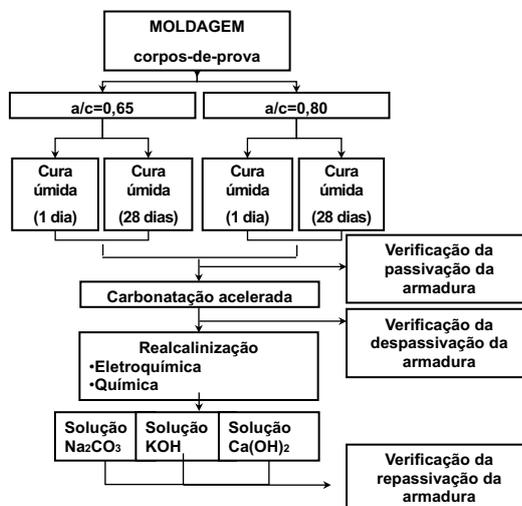
Slide 3 - 64

3

Metodologia



Ensaio eletroquímico (concreto armado)



Slide 4 - 64

4

Ensaio eletroquímico: preparação CP PCC - USP

corte longitudinal

12 cm

Selante

FRENTE DE CARBONATAÇÃO ou REALCALINIZAÇÃO

corte transversal

1,5 cm

4,0 cm

10 cm

FRENTE DE CARBONATAÇÃO ou REALCALINIZAÇÃO

região não selada

regiões seladas

Slide 5 - 64

5

Ensaio eletroquímico: RAQ PCC - USP

Na_2CO_3

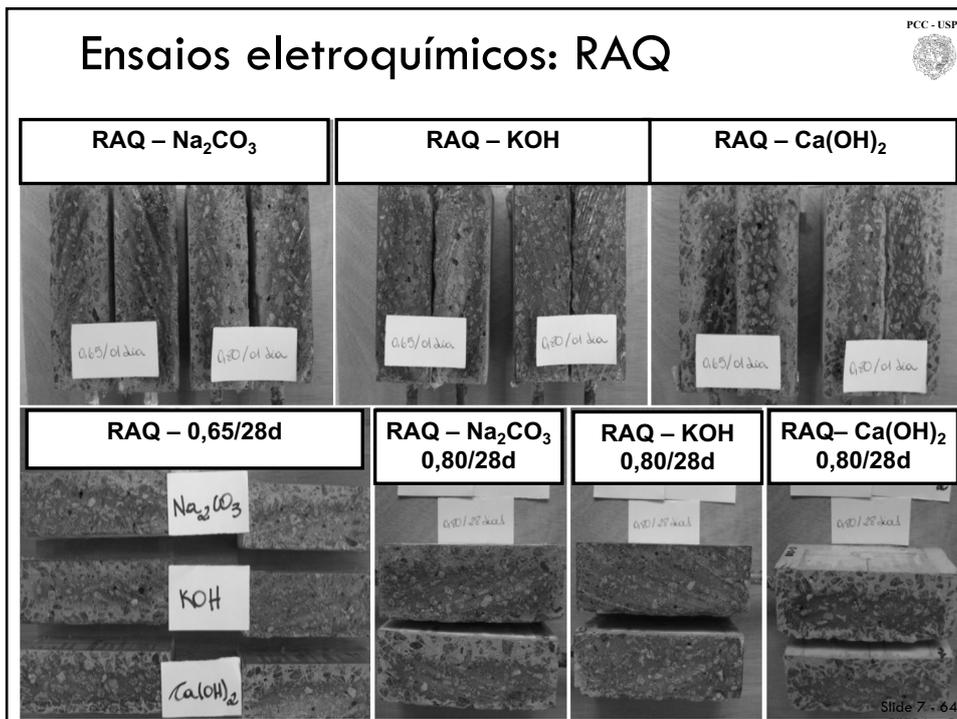
KOH

0,65/1d-0,65/28d-0,80/1d-0,80/28d

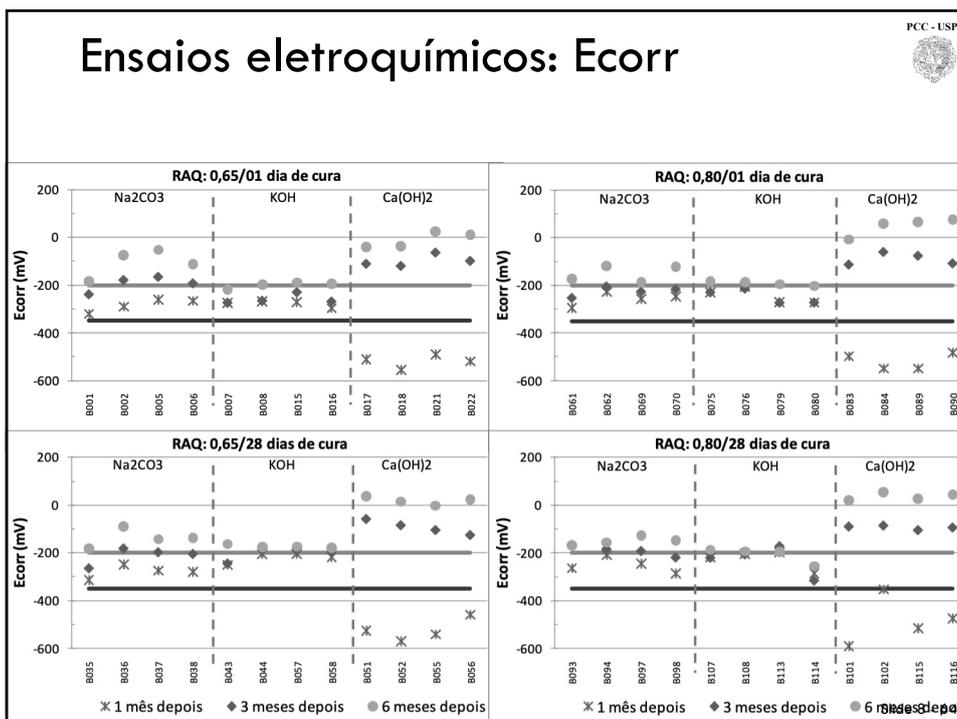
RAQ – Na_2CO_3

Slide 6 - 64

6



7



8

Ecorr – Passivação x Repassivação

PCC - USP

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p \times S}$$

Onde:

- I_{corr} → é a taxa, densidade ou intensidade de corrente de corrosão ($\mu A/cm^2$);
- B → é a constante de Stern-Geary, uma constante em função das características do sistema metal/meio;
- R_p → é a resistência de polarização ($K\Omega$);
- S → é a área efetiva do estudo (cm^2).

R_p

I_{corr}

Slide 9 - 64

9

Ecorr – Passivação x Repassivação

PCC - USP

RAQ: 0,65/01 dia de cura

RAQ: 0,65/01 dias de cura

RAQ: 0,65/28 dias de cura

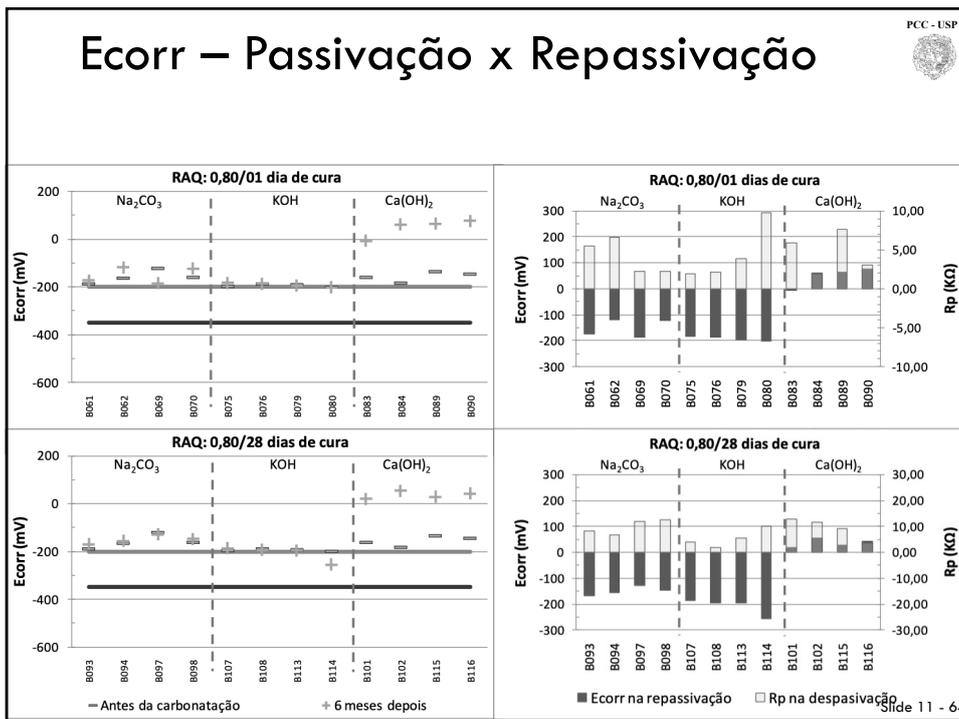
RAQ: 0,65/28 dias de cura

— Antes da carbonatação + 6 meses depois

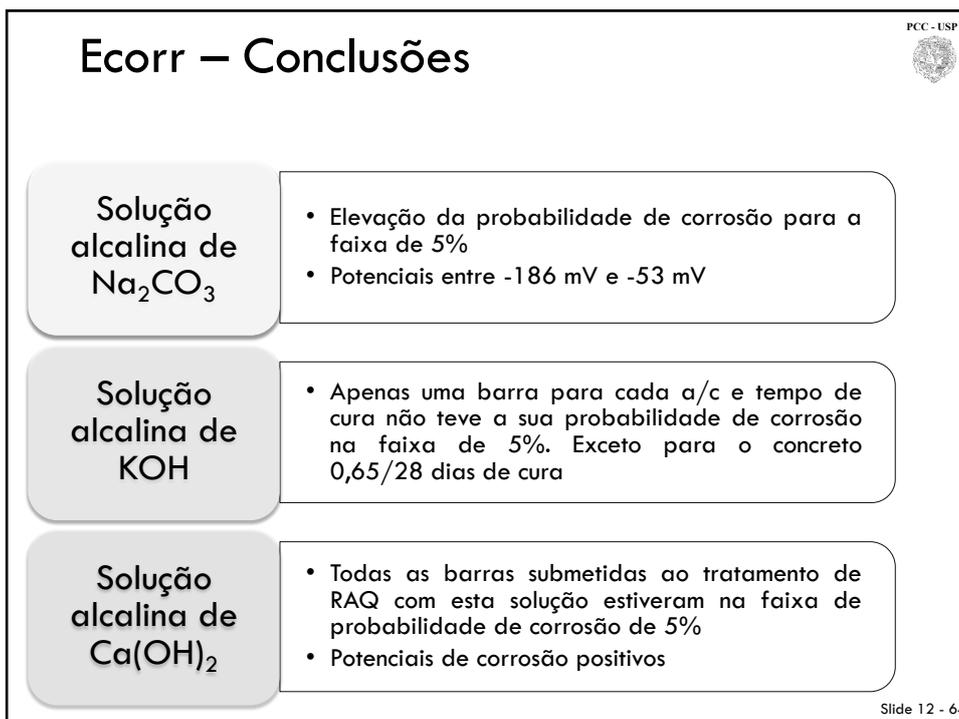
■ Ecorr na repassivação □ Rp na despassivação

Slide 10 - 64

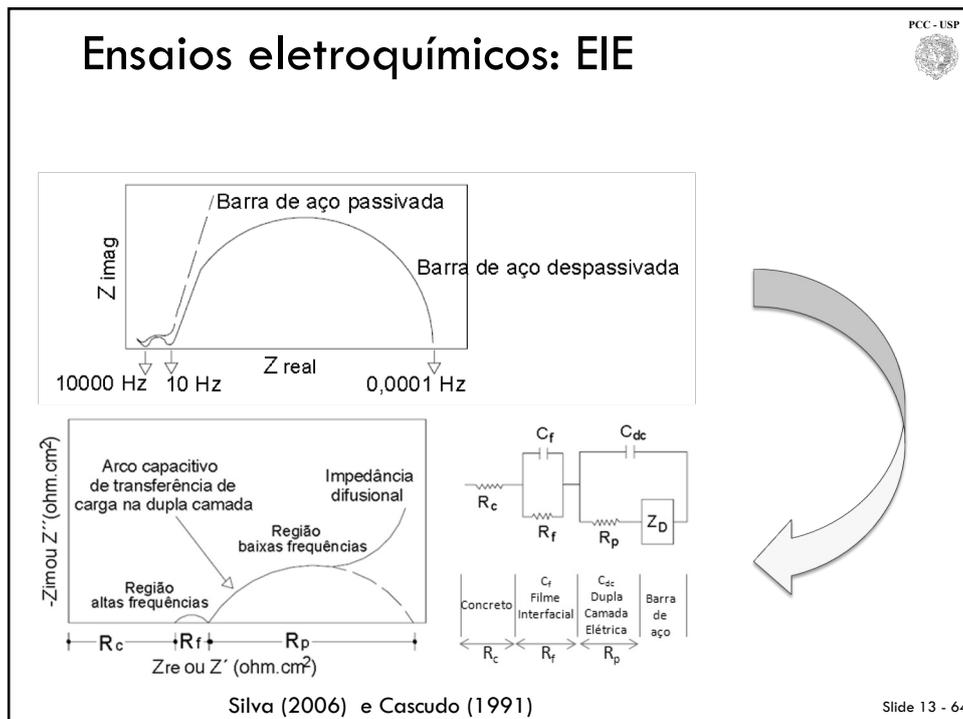
10



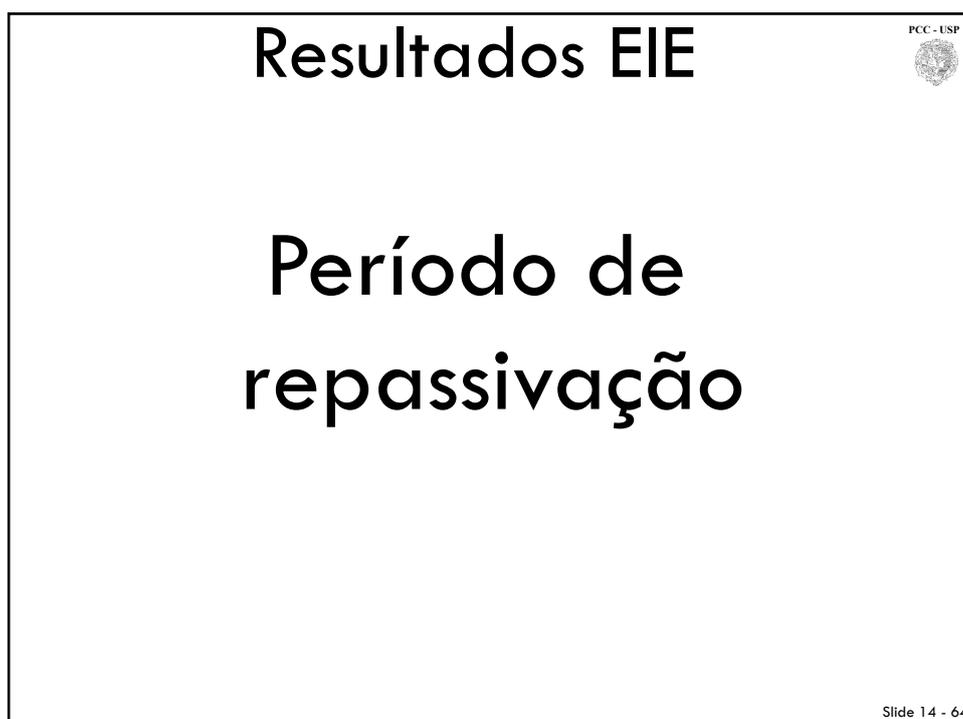
11



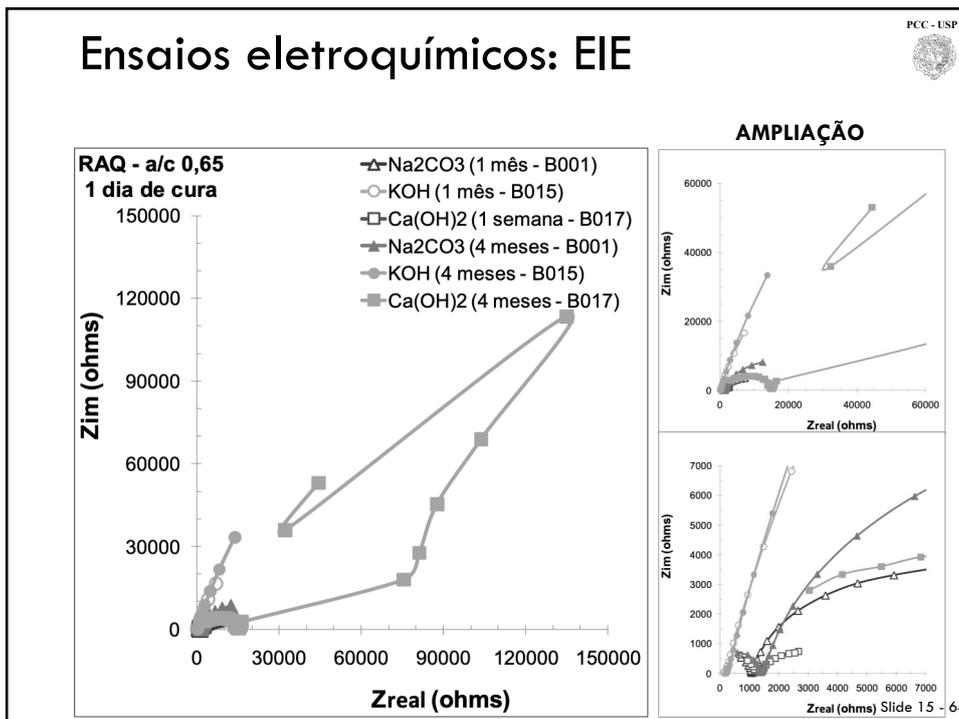
12



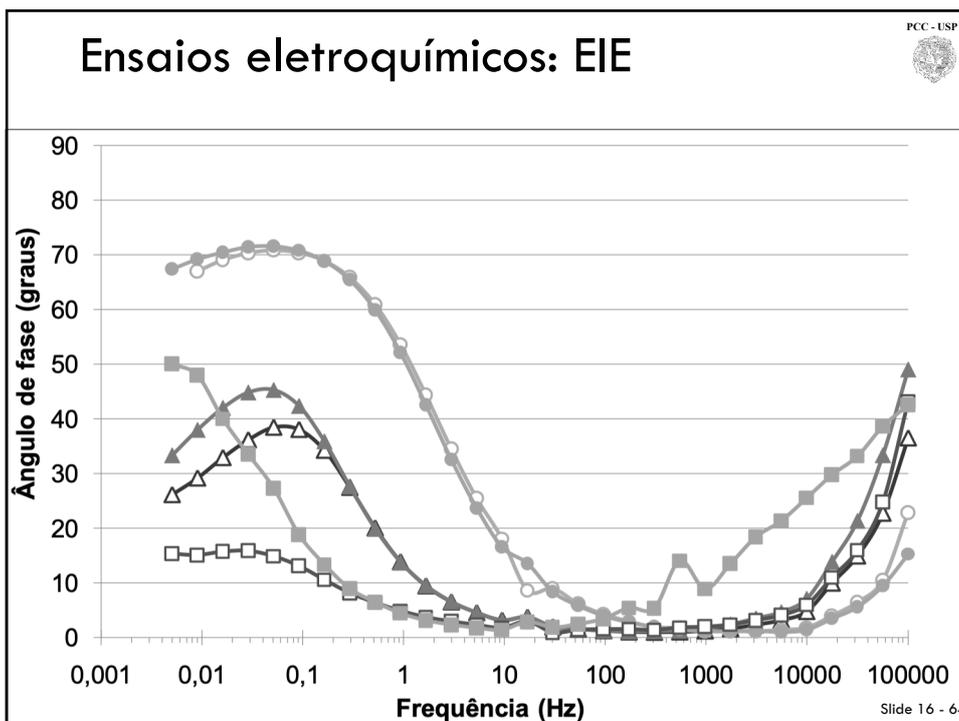
13



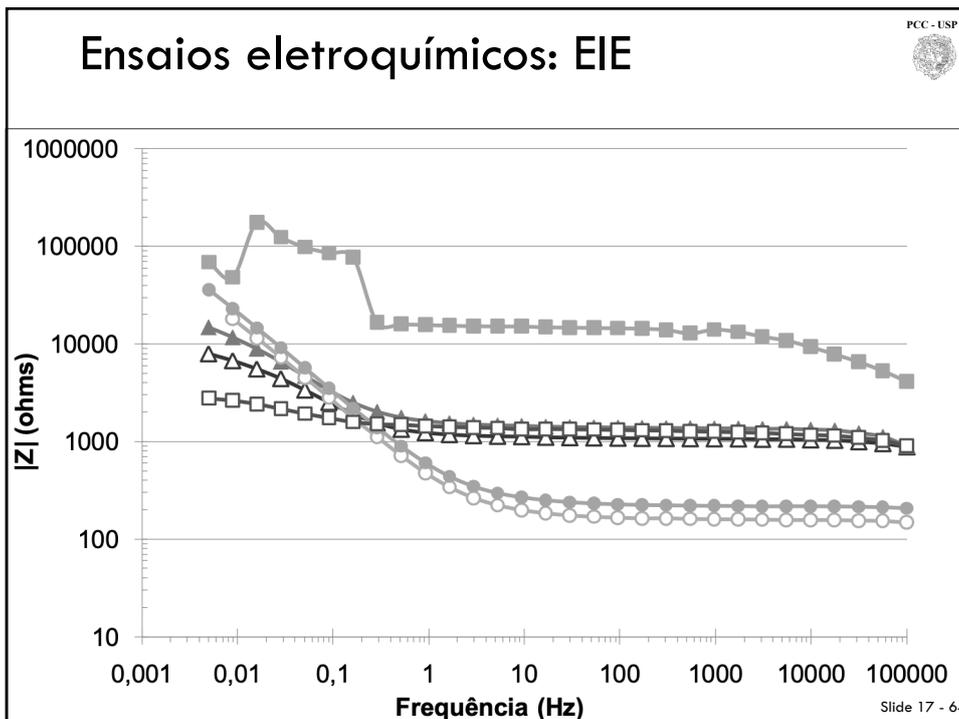
14



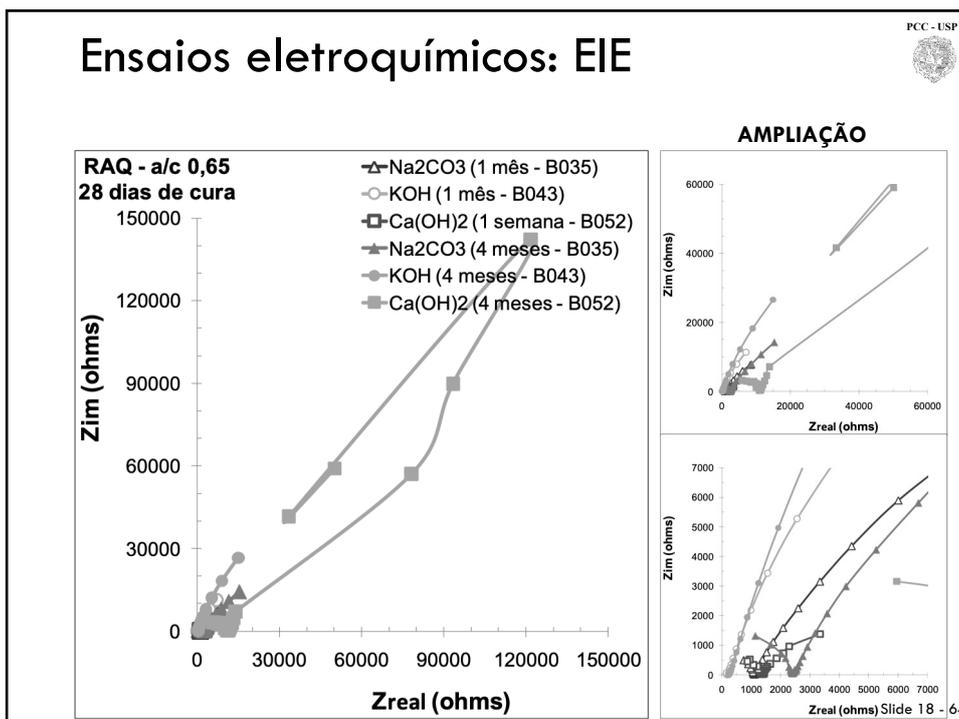
15



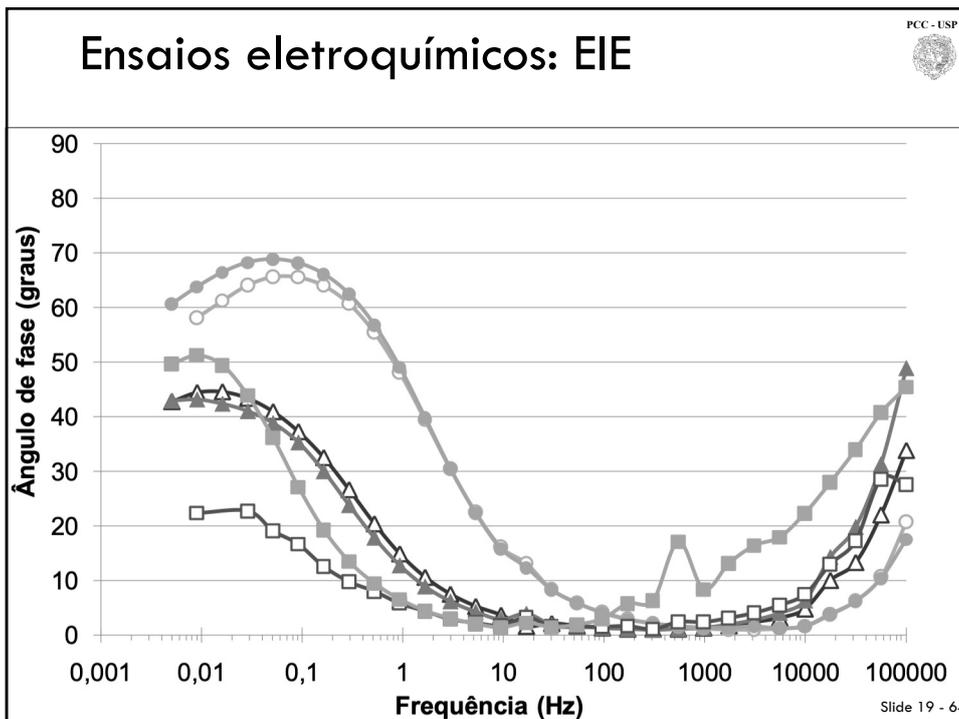
16



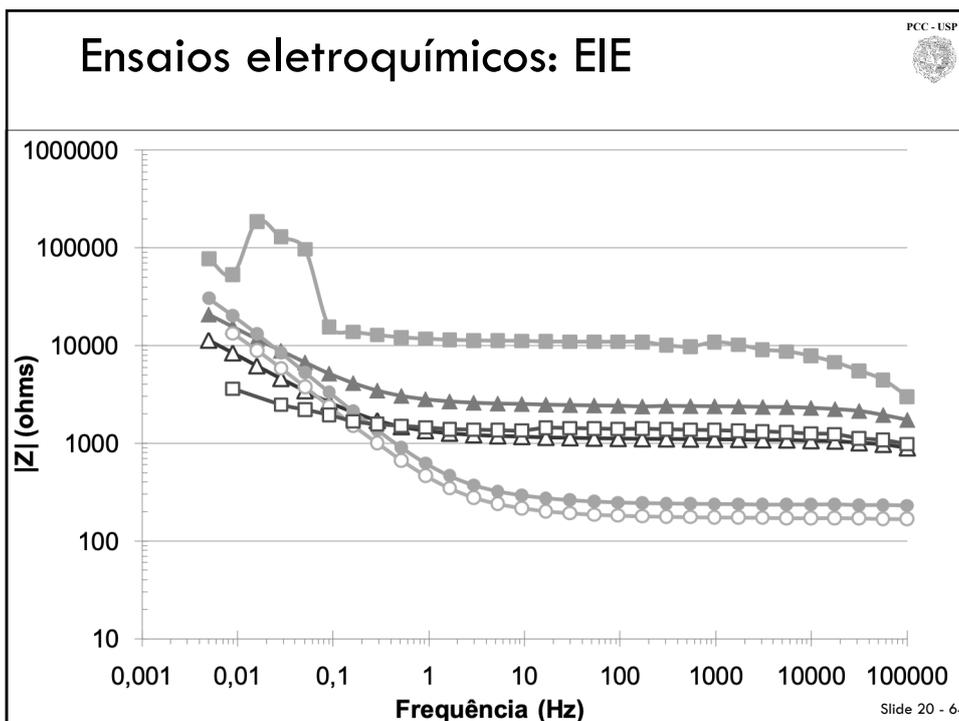
17



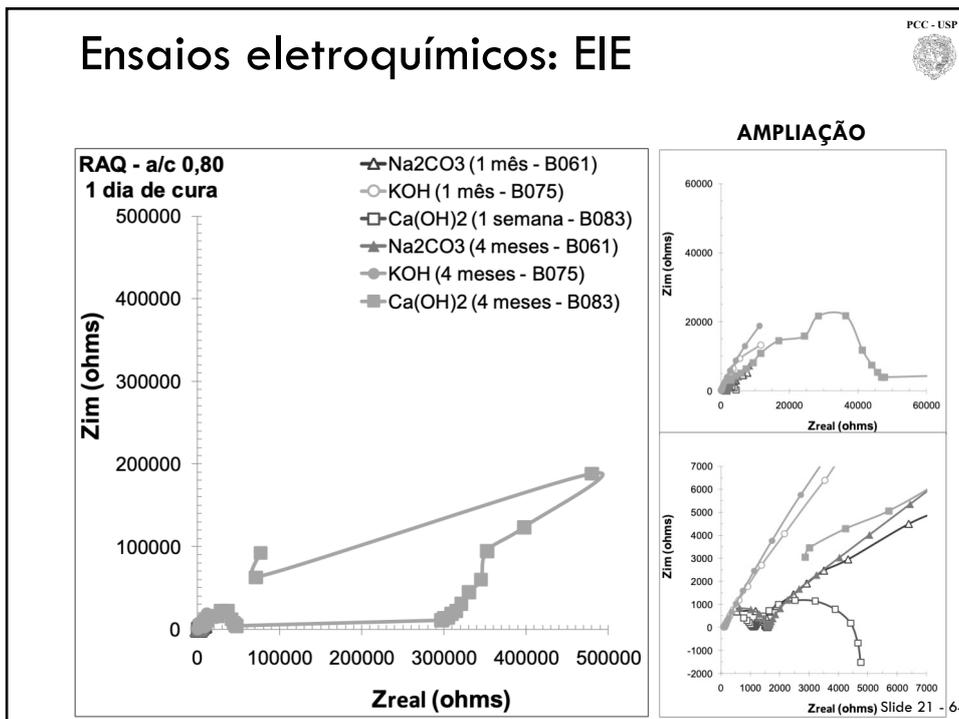
18



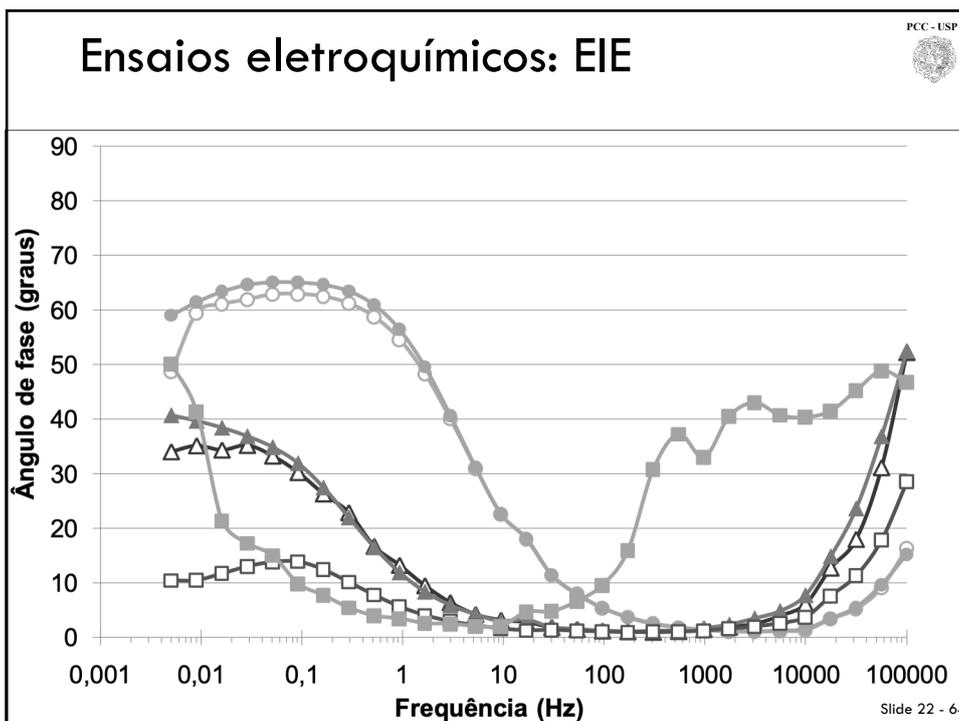
19



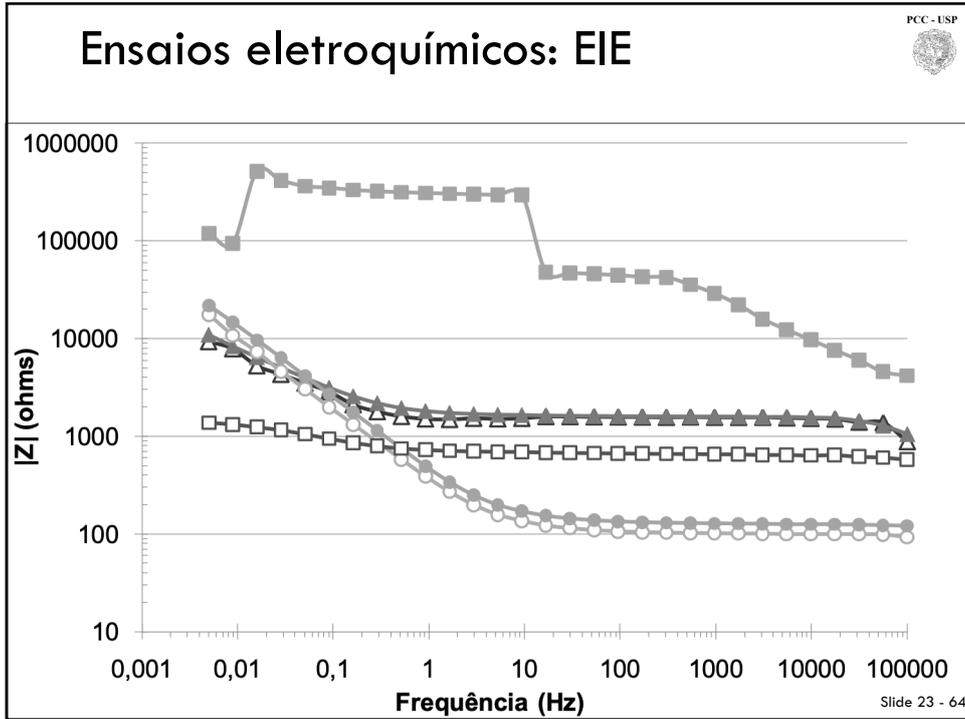
20



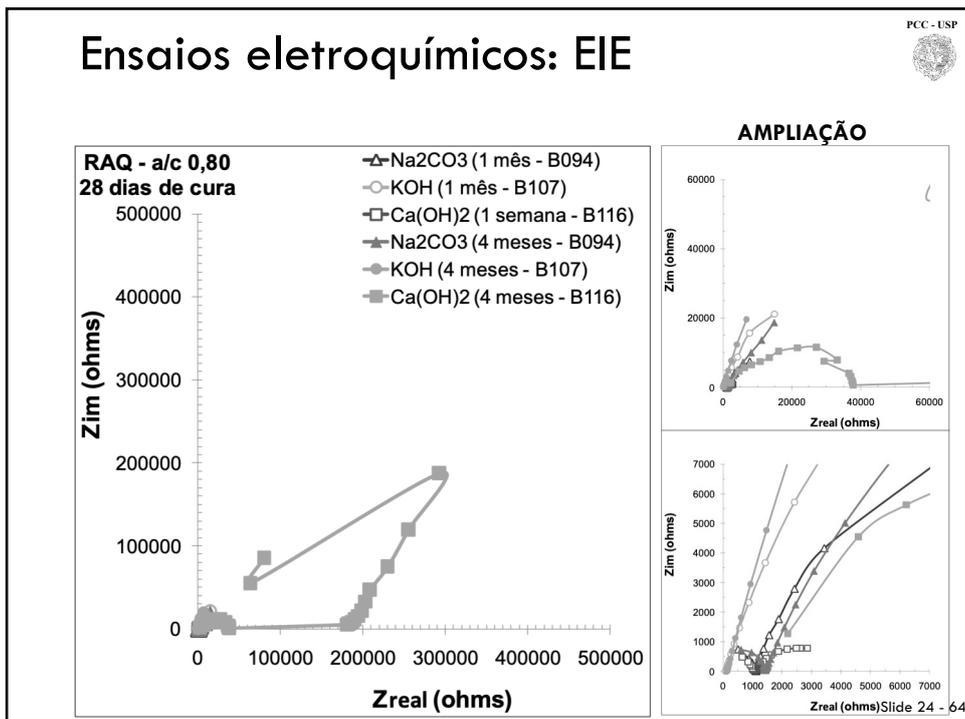
21



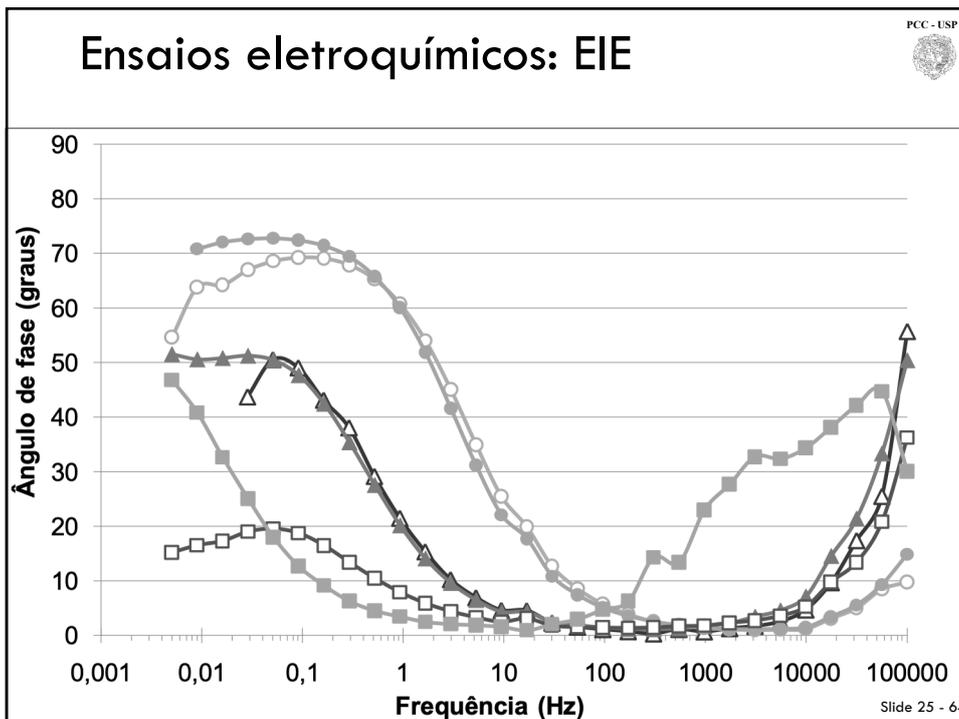
22



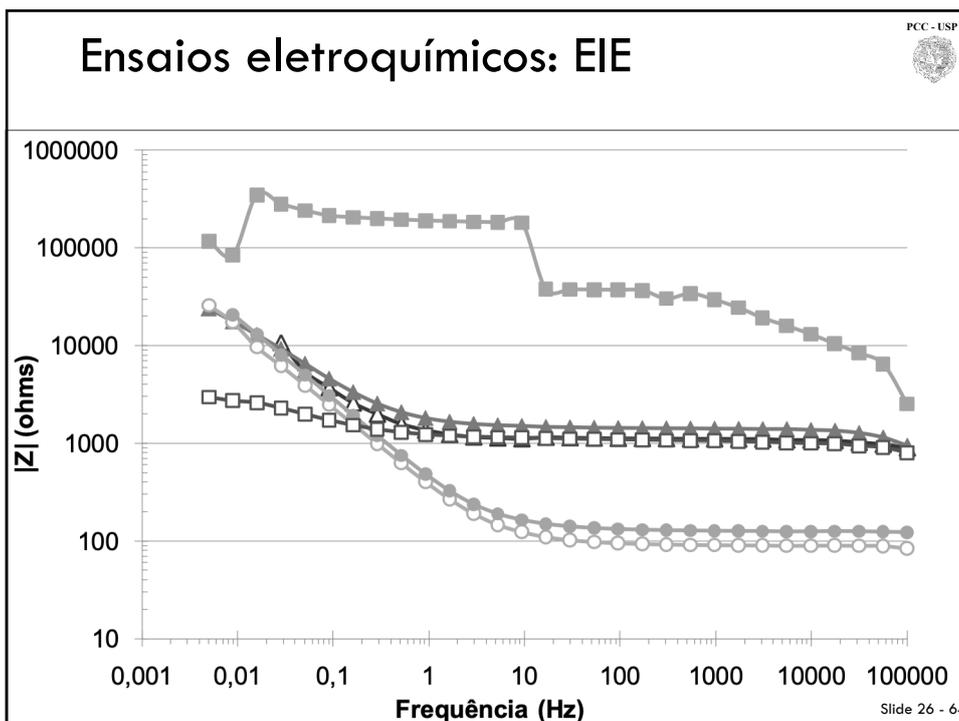
23



24



25



26

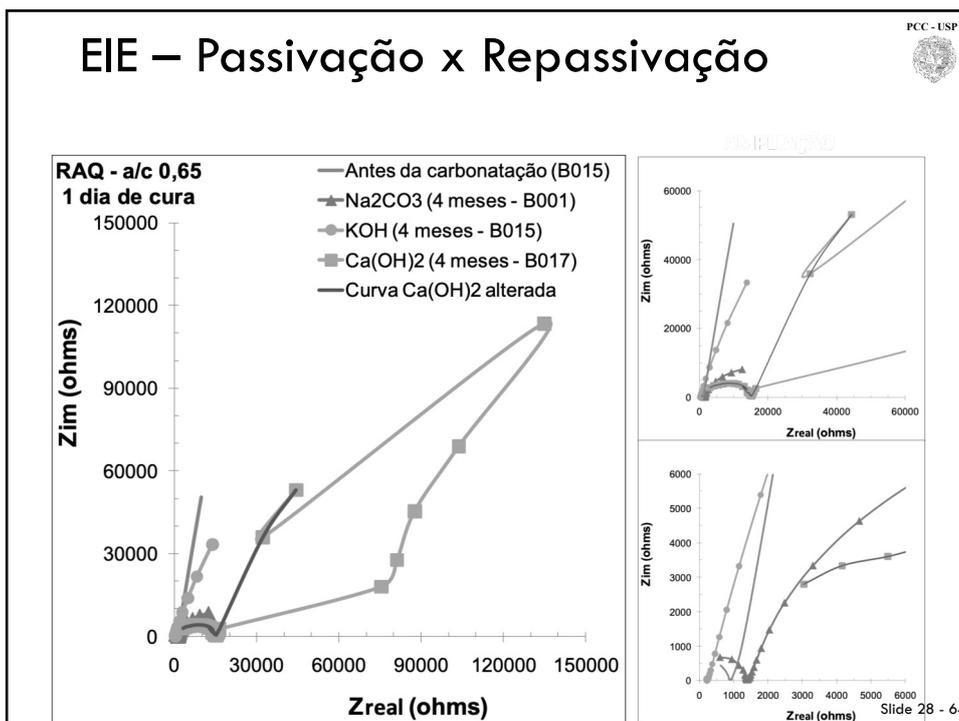
Resultados EIE



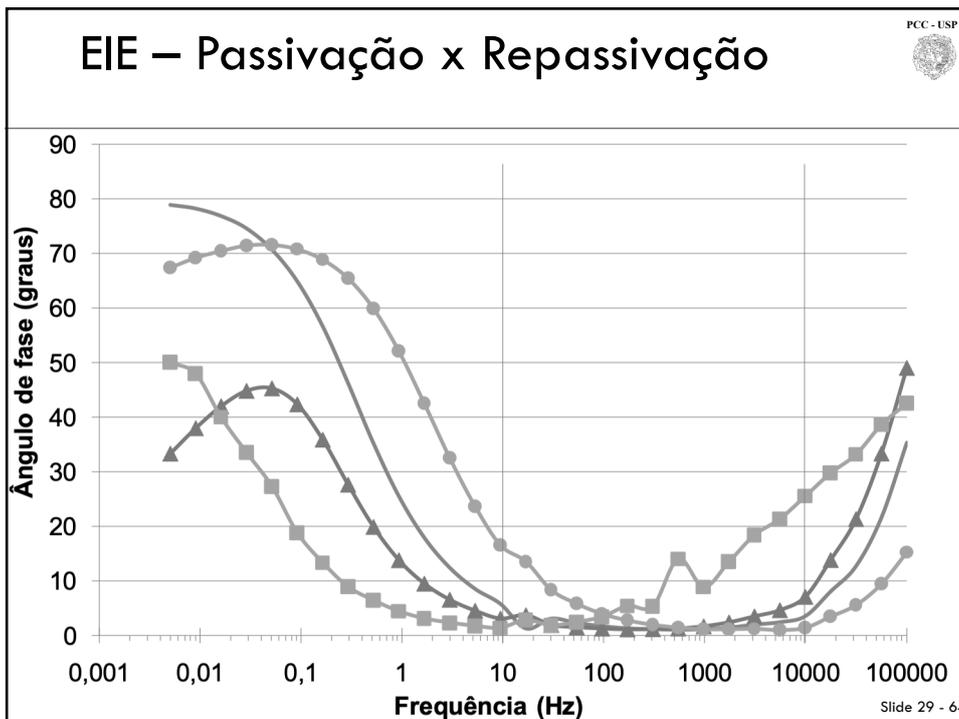
Passivação x Repassivação

Slide 27 - 64

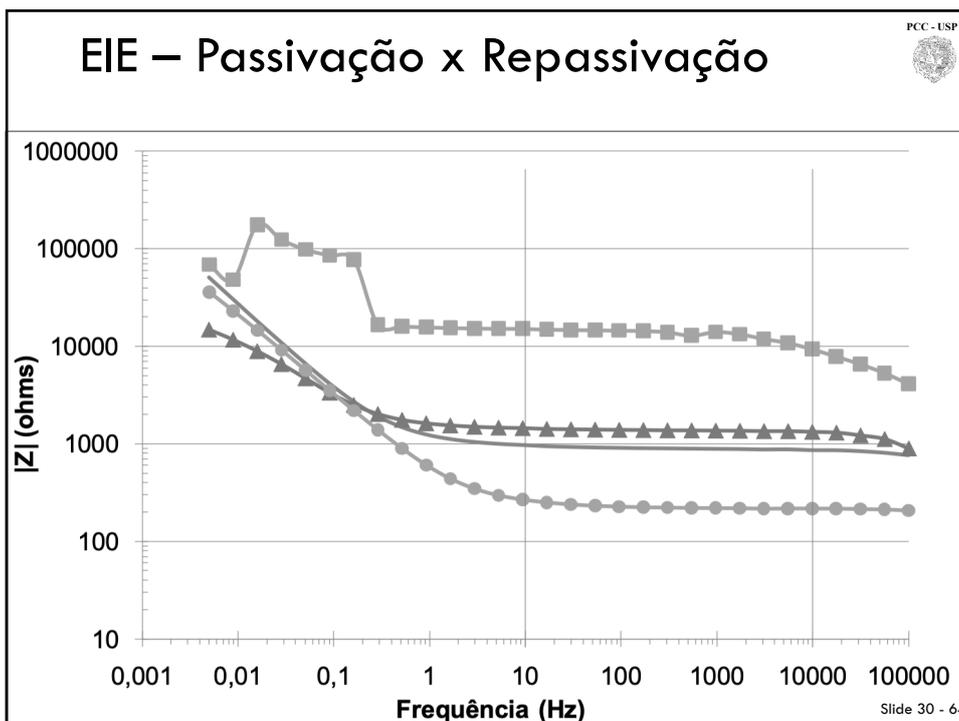
27



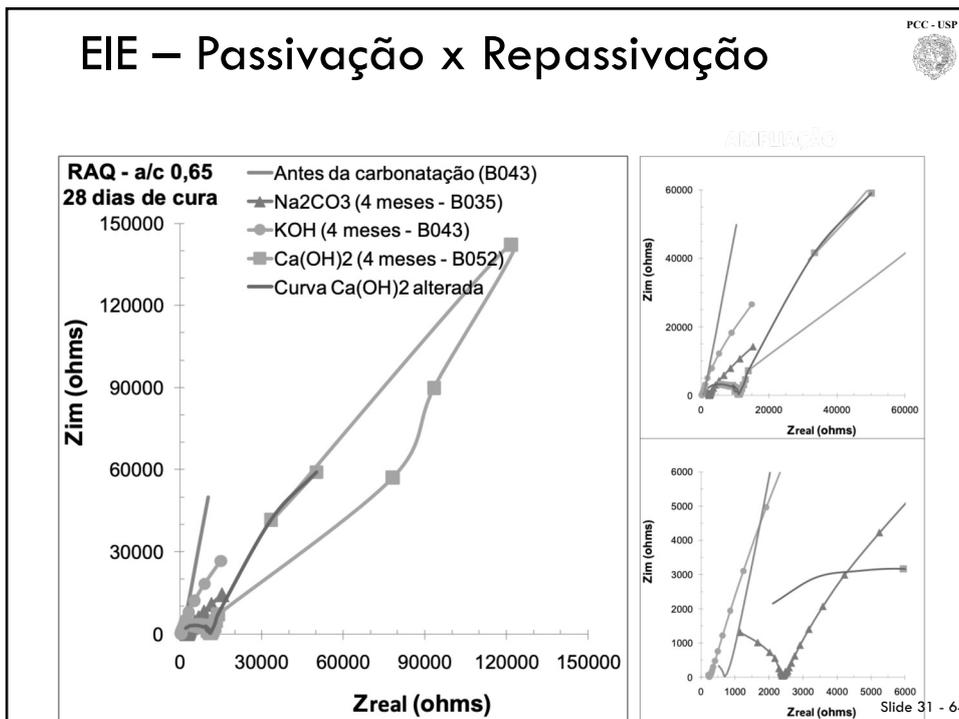
28



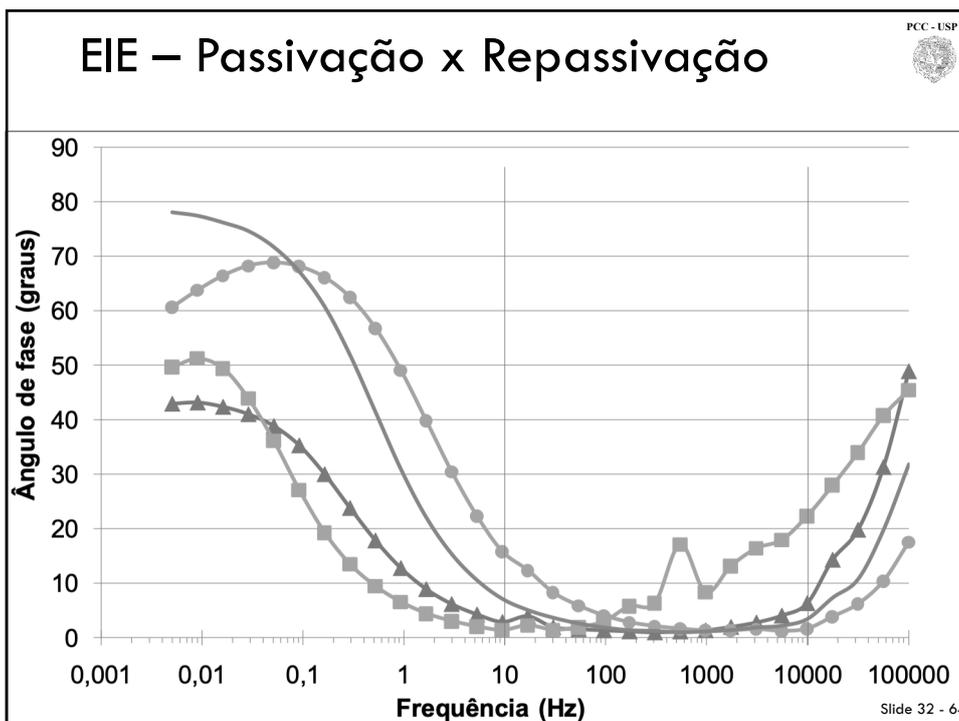
29



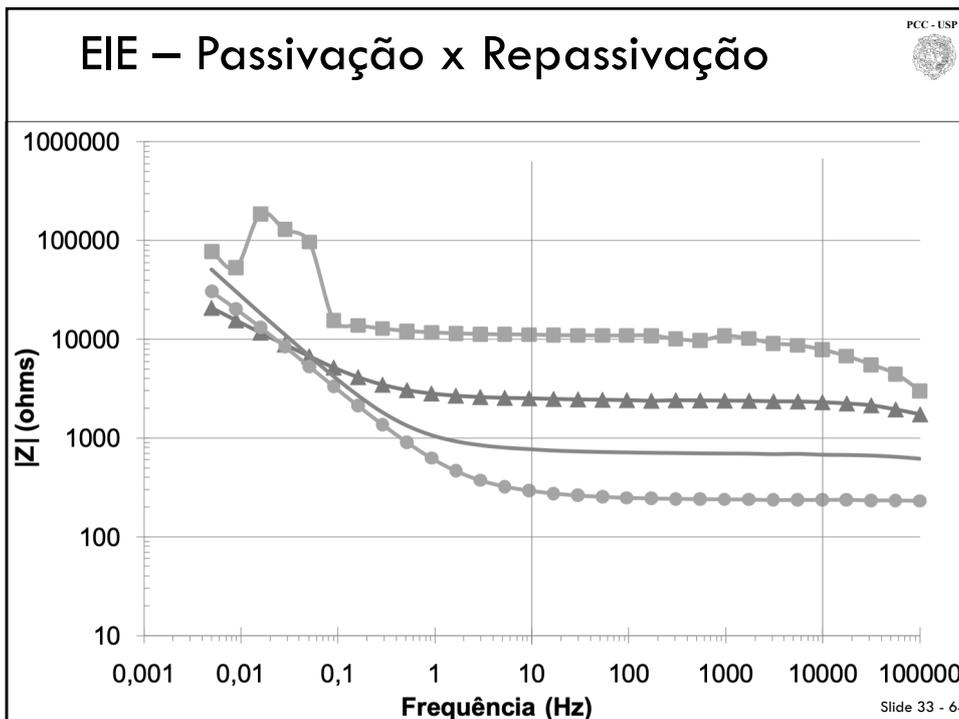
30



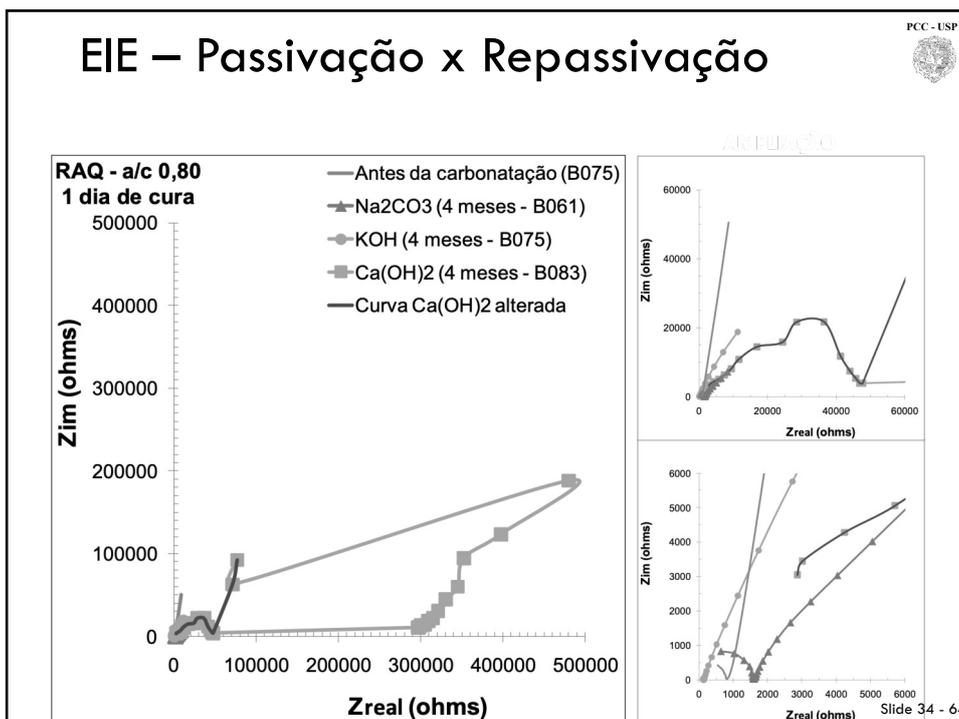
31



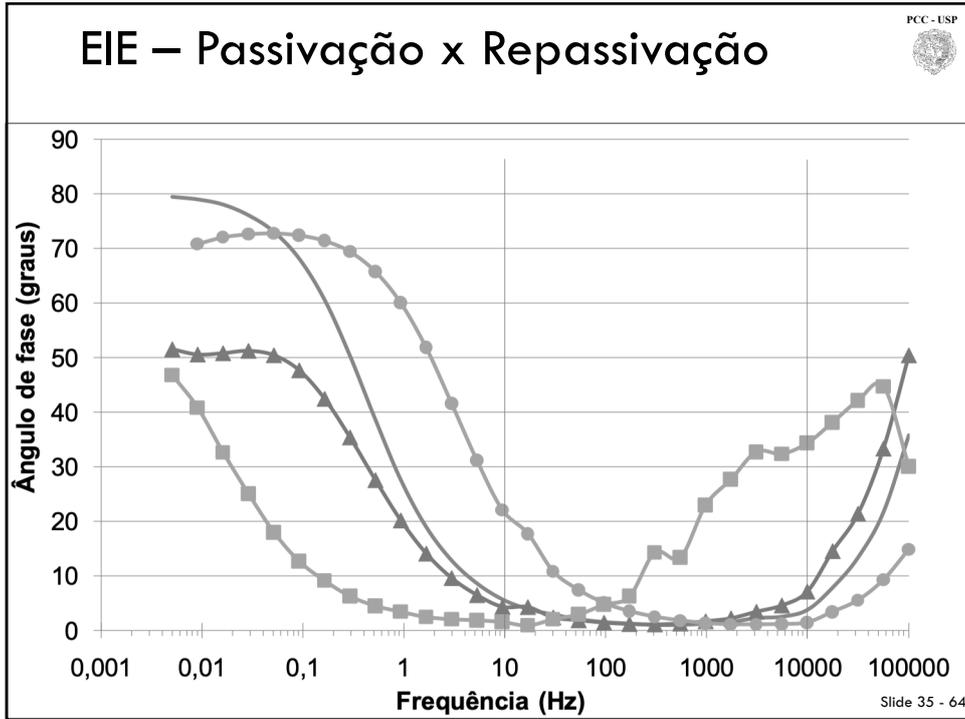
32



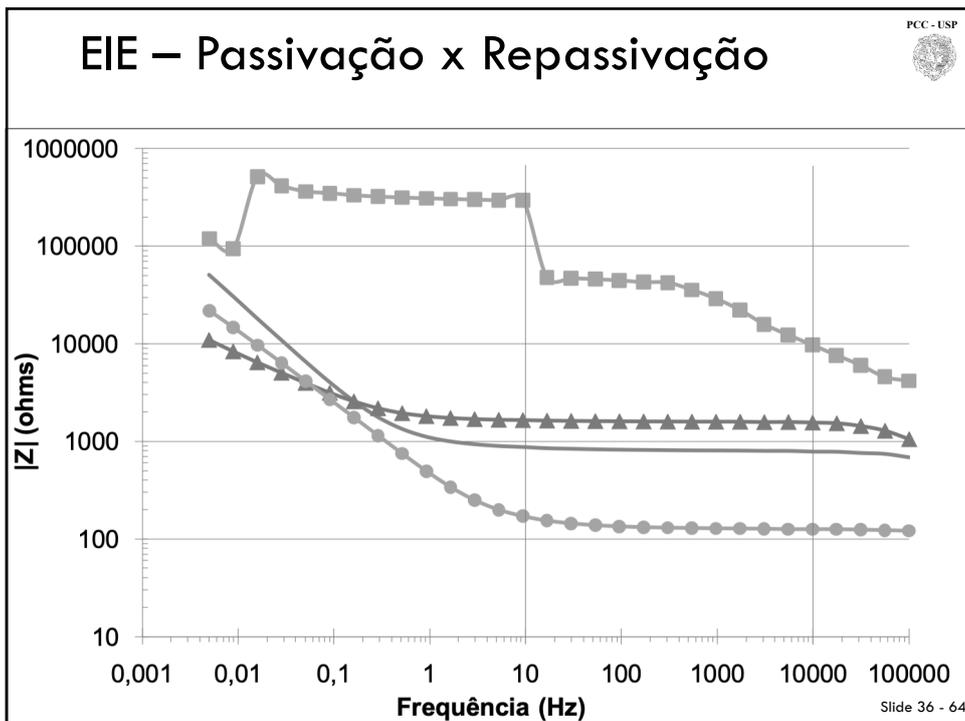
33



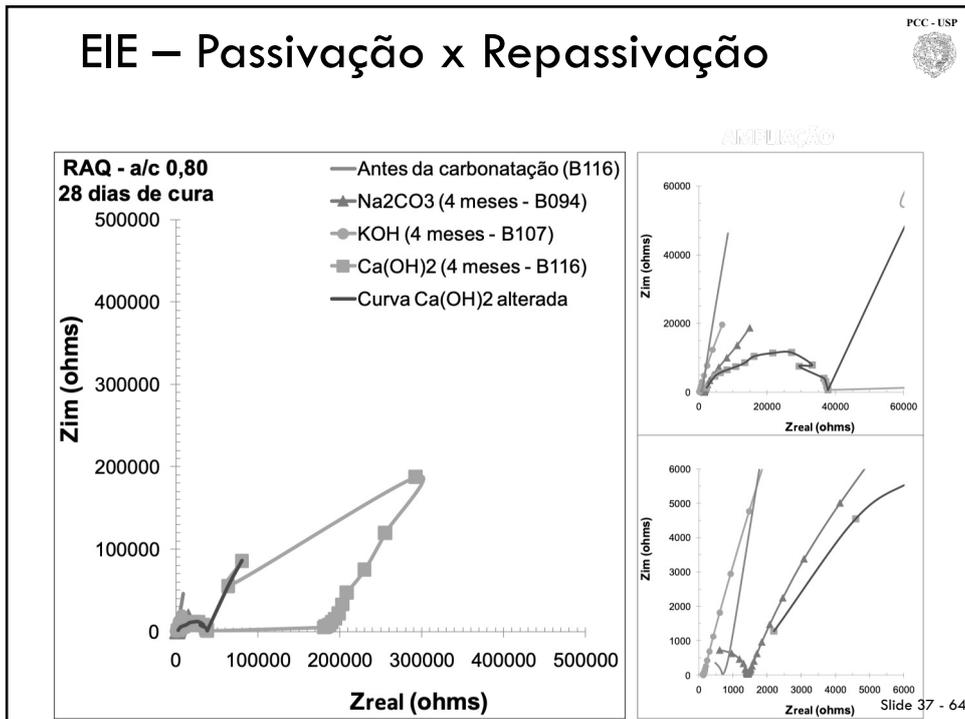
34



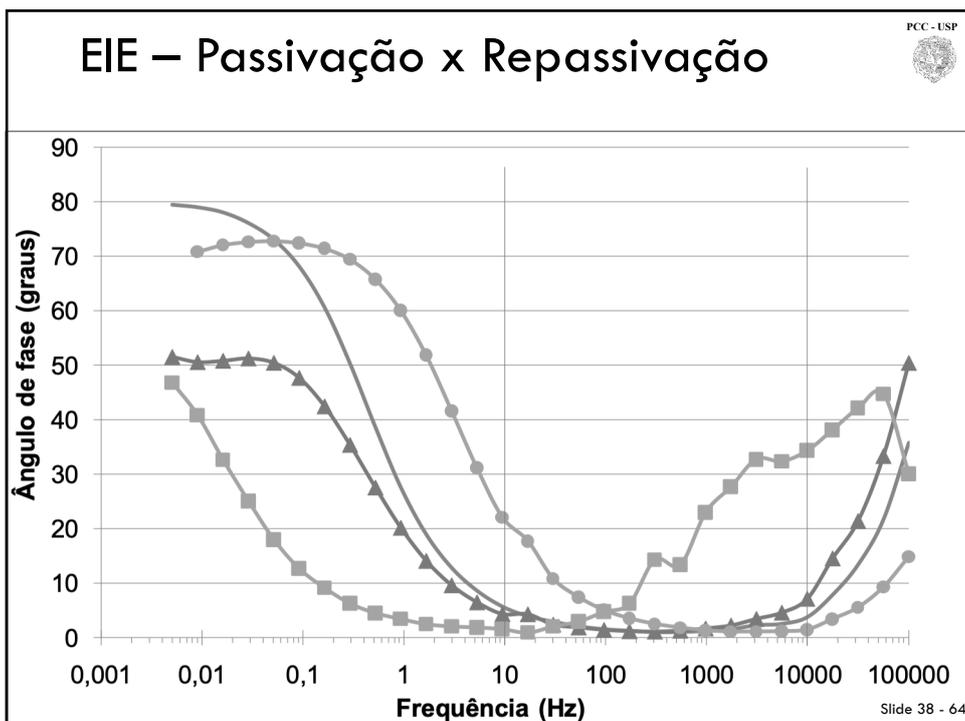
35



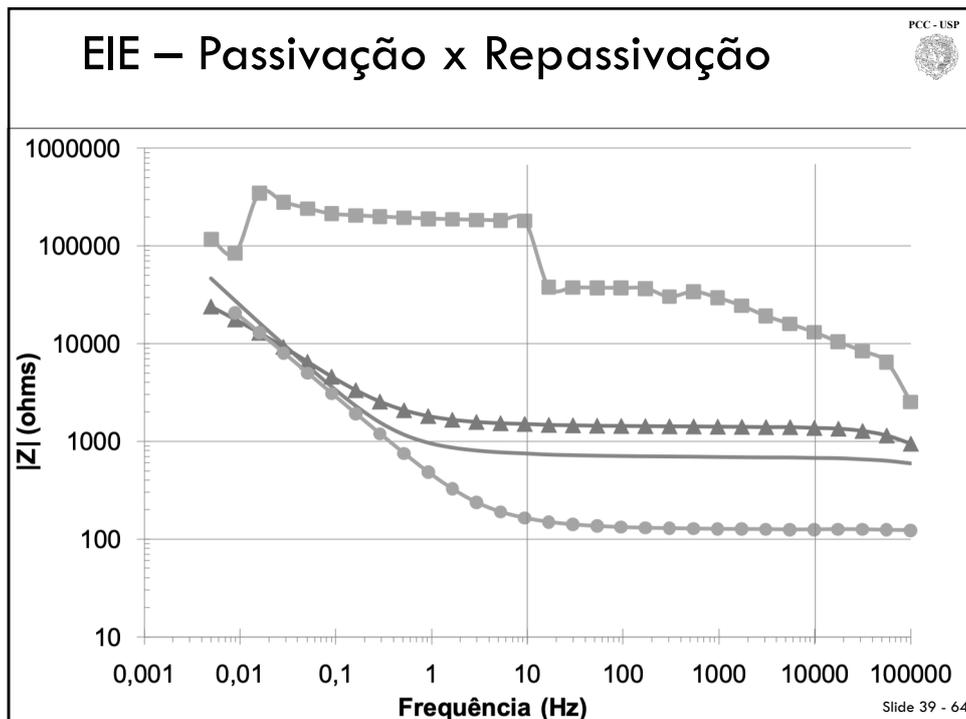
36



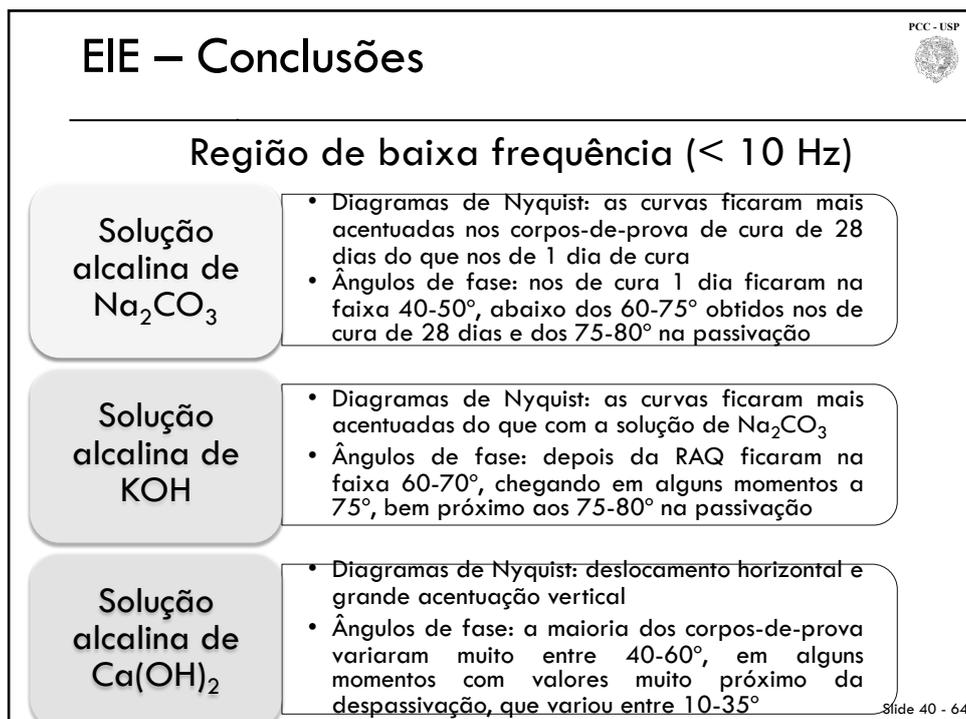
37



38



39



40

EIE – Conclusões

PCC - USP

Região de alta frequência ($> 10^4$ Hz)

<p style="text-align: center;">Solução alcalina de Na_2CO_3</p>	<ul style="list-style-type: none"> Nyquist: Aumento da resistência ôhmica de ~ 1.000 ohms para ~ 1.500 ohms Bode Z: resistência ôhmica muito próxima a de antes da carbonatação
<p style="text-align: center;">Solução alcalina de KOH</p>	<ul style="list-style-type: none"> Nyquist: Apresentou resistência ôhmica mais baixa do que antes da carbonatação Bode Z: mesmo comportamento de Nyquist
<p style="text-align: center;">Solução alcalina de $\text{Ca}(\text{OH})_2$</p>	<ul style="list-style-type: none"> Nyquist: Aumento da resistência ôhmica para ~ 15.000 ohms, em relação ao concreto antes da carbonatação Bode Z: mesmo comportamento de Nyquist

Slide 41 - 64

41

Metodologia

PCC - USP

Ensaio físicos (concreto não armado)

```

graph TD
    A[MOLDAGEM corpos-de-prova] --> B[a/c=0,65]
    A --> C[a/c=0,80]
    B --> D[Cura úmida 1 dia]
    B --> E[Cura úmida 28 dias]
    C --> F[Cura úmida 1 dia]
    C --> G[Cura úmida 28 dias]
    D --> H[Carbonatação acelerada]
    E --> H
    F --> H
    G --> H
    H --> I[Separação de corpos-de-prova de referência ou não carbonatado]
    H --> J[Separação de corpos-de-prova carbonatados]
    H --> K[Realcalinização Química]
    I --> L[Ensaio de durabilidade da RAQ]
    L --> M[Recarbonatação acelerada]
    J --> N[Ensaio de absorção e imersão]
    K --> O[Solução Na2CO3]
    K --> P[Solução KOH]
    K --> Q[Solução Ca(OH)2]
    O --> R[Separação de corpos-de-prova realcalinizados]
    P --> R
    Q --> R
    R --> N
    
```

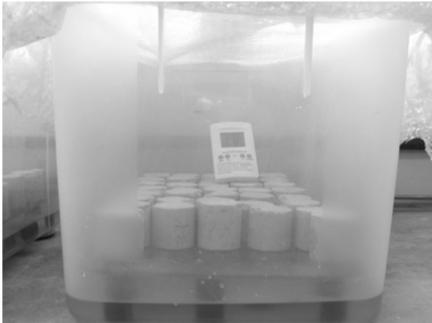
Slide 42 - 64

42

Ensaio físico: acondicionamento



Corpos-de-prova não carbonatados (referência)



Corpos-de-prova carbonatados

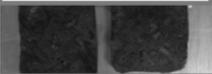
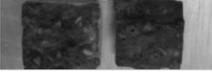
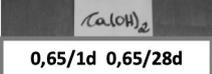
PCC - USP 

Slide 43 - 64

43

Ensaio físico: RAQ

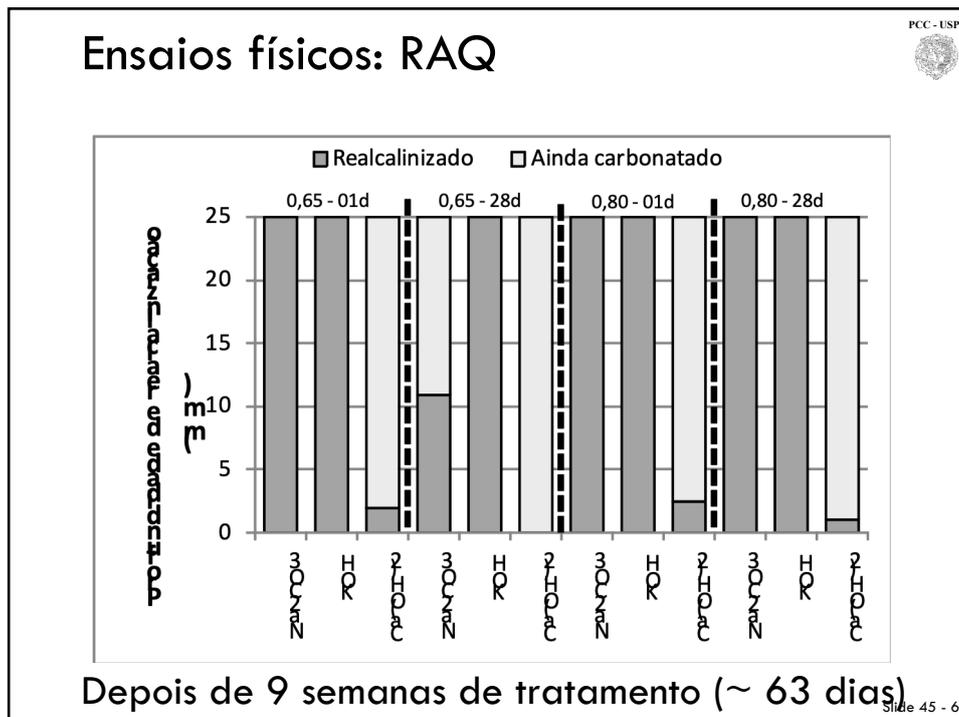



<p>Na_2CO_3</p> <p>0,80/1d 0,65/1d</p>  <p>0,80/28d 0,65/28d</p> 	<p>KOH</p> <p>0,80/1d 0,65/1d</p>  <p>0,80/28d 0,65/28d</p> 
<p>Ca(OH)_2</p> <p>0,65/1d 0,65/28d</p>  <p>0,80/1d 0,80/28d</p> 	

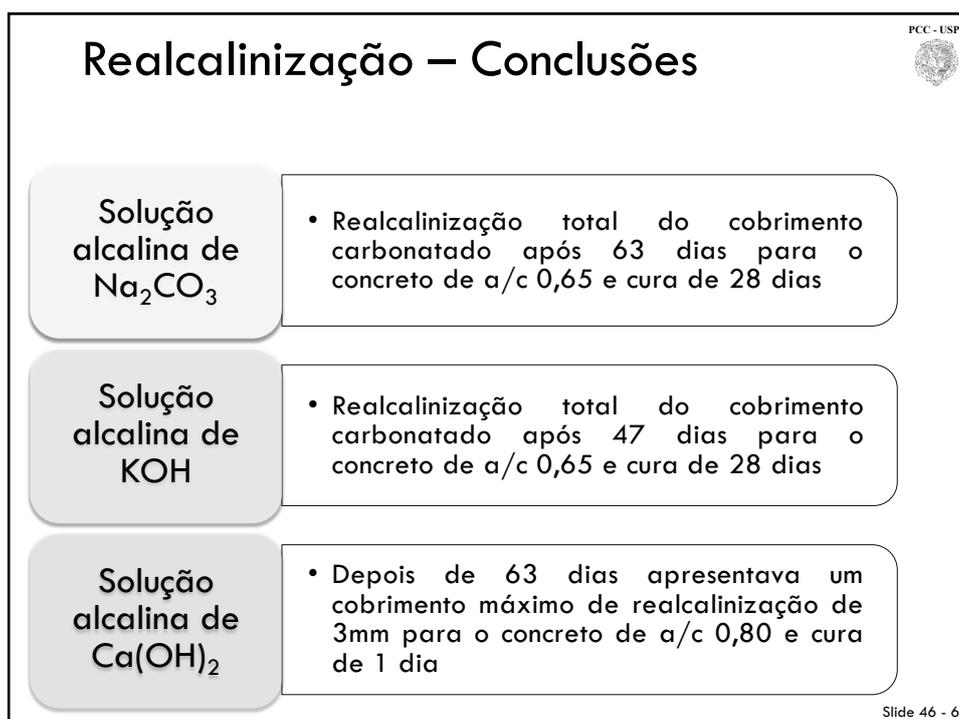
PCC - USP 

Slide 44 - 64

44



45



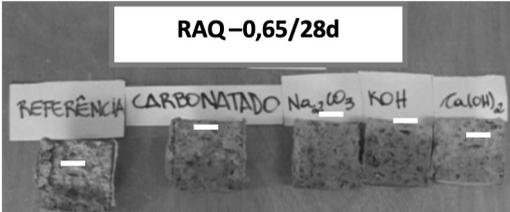
46

Ensaio físico: Ascensão capilar

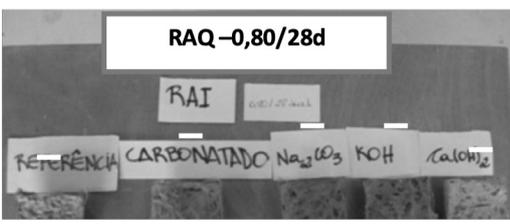




RAQ - 0,65/28d



RAQ - 0,80/28d

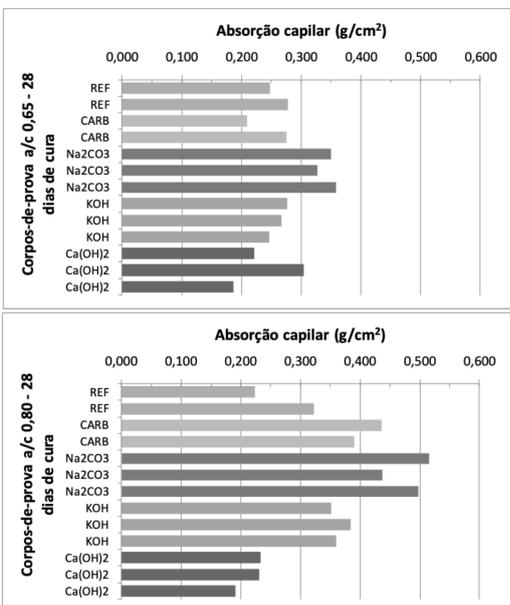


Slide 47 - 64

47

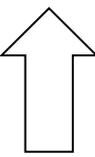
Ensaio físico: Absorção capilar





Espessura dos poros

Absorção capilar



Slide 48 - 64

48

Absorção capilar – Conclusões

PCC - USP

<p>Solução alcalina de Na_2CO_3</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentou os maiores valores de ascensão e de absorção capilar
<p>Solução alcalina de KOH</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentou resultados similares aos do concreto carbonatado
<p>Solução alcalina de $\text{Ca}(\text{OH})_2$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados semelhantes aos obtidos com os concretos de referência

Slide 49 - 64

49

Ensaio físico: recarbonatação

PCC - USP

0,65/01 dia

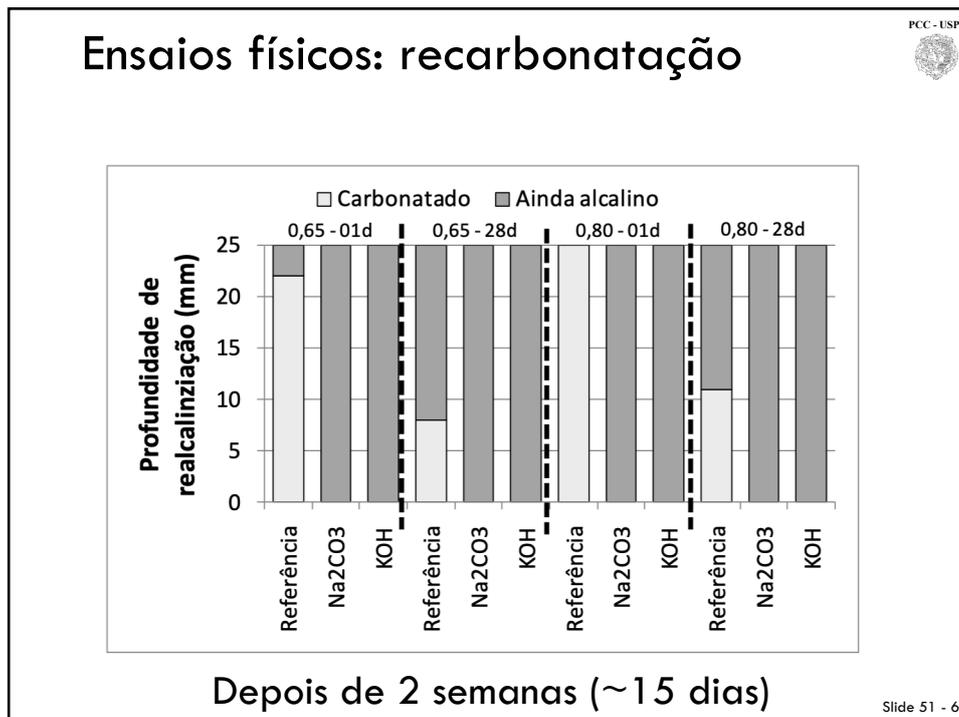
0,65/28 dias

0,70/01 dia

0,70/28 dias

Slide 50 - 64

50



51



52

Durabilidade – Conclusões

PCC - USP 

Referência	<ul style="list-style-type: none">• Depois de 45 dias na câmara de carbonatação acelerada, o concreto já se encontrava totalmente carbonatado, exceto 0,65/28 que ainda apresentava 2,5mm não carbonatado
Solução alcalina de Na_2CO_3	<ul style="list-style-type: none">• Nesta solução não apresentou qualquer vestígio de nova penetração do CO_2
Solução alcalina de KOH	<ul style="list-style-type: none">• Assim como na solução de Na_2CO_3, o concreto não apresentava qualquer indício de recarbonatação

Slide 53 - 64

53

Conclusões

PCC - USP 

Solução de Na_2CO_3

Slide 54 - 64

54

Influência da solução de Na_2CO_3

PCC - USP 

Repassivação	<ul style="list-style-type: none">• Bastante eficiente com Ecorr• Resultados pouco eficientes com a EIE
Realcalinização	<ul style="list-style-type: none">• Realcalinizou completamente o concreto de a/c 0,65 e 28 dias de cura após 63 dias de tratamento
Ascensão e absorção	<ul style="list-style-type: none">• Aumento da ascensão e da absorção após o tratamento da RAQ com a solução
Durabilidade	<ul style="list-style-type: none">• Não apresentou profundidades de recarbonatação mesmo depois de 45 dias na câmara de carbonatação

Slide 55 - 64

55

Conclusões

PCC - USP 

Solução de KOH

Slide 56 - 64

56

Influência da solução de KOH

PCC - USP 

Repassivação	<ul style="list-style-type: none">• Eficiente com Ecorr• Excelentes resultados com a EIE
Realcalinização	<ul style="list-style-type: none">• Realcalinizou completamente o concreto de a/c 0,65 e 28 dias de cura após 47 dias de tratamento
Ascensão e absorção	<ul style="list-style-type: none">• Valores de ascensão e absorção capilar semelhantes aos obtidos nos concretos carbonatados
Durabilidade	<ul style="list-style-type: none">• Não apresentou profundidades de recarbonatação mesmo depois de 45 dias na câmara de carbonatação

Slide 57 - 64

57

Conclusões

PCC - USP 

Solução de Ca(OH)_2

Slide 58 - 64

58

Influência da solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

PCC - USP 

Repassivação	<ul style="list-style-type: none"> Alcançou valores positivos de potencial de corrosão Bons resultados com a EIE
Realcalinização	<ul style="list-style-type: none"> Alcançou o cobrimento máximo de 3mm no concreto de a/c 0,80 e 1 dia de cura, depois de 63 dias de tratamento
Ascensão e absorção	<ul style="list-style-type: none"> Valores obtidos semelhantes aos dos concretos de referência
Durabilidade	<ul style="list-style-type: none"> Não foi estudado

Slide 59 - 64

59

Conclusões

PCC - USP 

Repassivação (Ecorr)

Na_2CO_3 : constatação da eficácia em todas as barras

KOH: resultados satisfatórios em 75% das barras estudadas

$\text{Ca}(\text{OH})_2$: resultados muito acima do esperado para 100% das barras

Slide 60 - 64

60

PCC - USP 

Conclusões

Repassivação (Ecorr)	Repassivação (EIE)
Na₂CO₃ : constatação da eficácia em todas as barras	Na₂CO₃ : teve baixa ascendência em Nyquist e baixo Z
KOH : resultados satisfatórios em 75% das barras estudadas	KOH : ótima ascendência em Nyquist e Z próximo da passivação
Ca(OH)₂ : resultados muito acima do esperado para 100% das barras	Ca(OH)₂ : teve excelente ascendência em Nyquist, mas um baixo Z

Slide 61 - 64

61

PCC - USP 

Conclusões

Repassivação (Ecorr)	Repassivação (EIE)	Durabilidade (novo ciclo de carbonatação)
Na₂CO₃ : constatação da eficácia em todas as barras	Na₂CO₃ : teve baixa ascendência em Nyquist e baixo Z	Referência: praticamente carbonatado após 45 dias
KOH : resultados satisfatórios em 75% das barras estudadas	KOH : ótima ascendência em Nyquist e Z próximo da passivação	Na₂CO₃ : não apresentou nenhuma carbonatação
Ca(OH)₂ : resultados muito acima do esperado para 100% das barras	Ca(OH)₂ : teve excelente ascendência em Nyquist, mas um baixo Z	KOH : não apresentou nenhuma carbonatação

Slide 62 - 64

62

Agradecimentos PCC - USP 

 **Universidade de São Paulo**
Brasil

 **PÓS-GRADUAÇÃO**

 **ipt** INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

 **Associação Brasileira de Cimento Portland**

 **Holcim**

 **FAPESP**

Equipe laboratorial do PCC/USP
Colegas da Pós-graduação
Família

Slide 63 - 64

63

PCC - USP 

64

Muito obrigada !

Slide 64 - 64

64