

Infraestrutura sustentável de concreto: Será que já chegamos lá?

Jussara Tanesi, PhD, FACI*
Embaixadora do ACI

IBRACON
Bonito, MS, Outubro 2015



Uma pequena introdução sobre o American Concrete Institute



American Concrete Institute

Always advancing



O ACI visa um futuro onde todos tenham o conhecimento necessário para que o concreto seja usado efetivamente para suprir as demandas de um mundo em transformação.

* * * * *

O ACI desenvolve e dissemina informação consensual sobre o concreto e o seus usos.



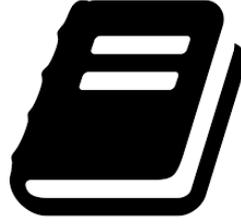
Um Instituto de Membros e Regionais

- Mais de 18,000 membros de 120 países
- Além de cerca de 20,000 membros das regionais e das seções de estudantes
- Engenheiros, pesquisadores, estudantes, empreiteiros, arquitetos, educadores, fabricantes, produtores, governo e mais.





Filiação
Rede de contatos
Convenções
Regionais



Documentos técnicos
Publicações
Concrete International
Revistas



Treinamento para certificação
Exames de certificação



Universidade do ACI
Webinars
Aprendizado Online



Fundação ACI
Pesquisa
Bolsas de estudo
Thought Leadership

Recursos Técnicos do ACI (sustentabilidade)

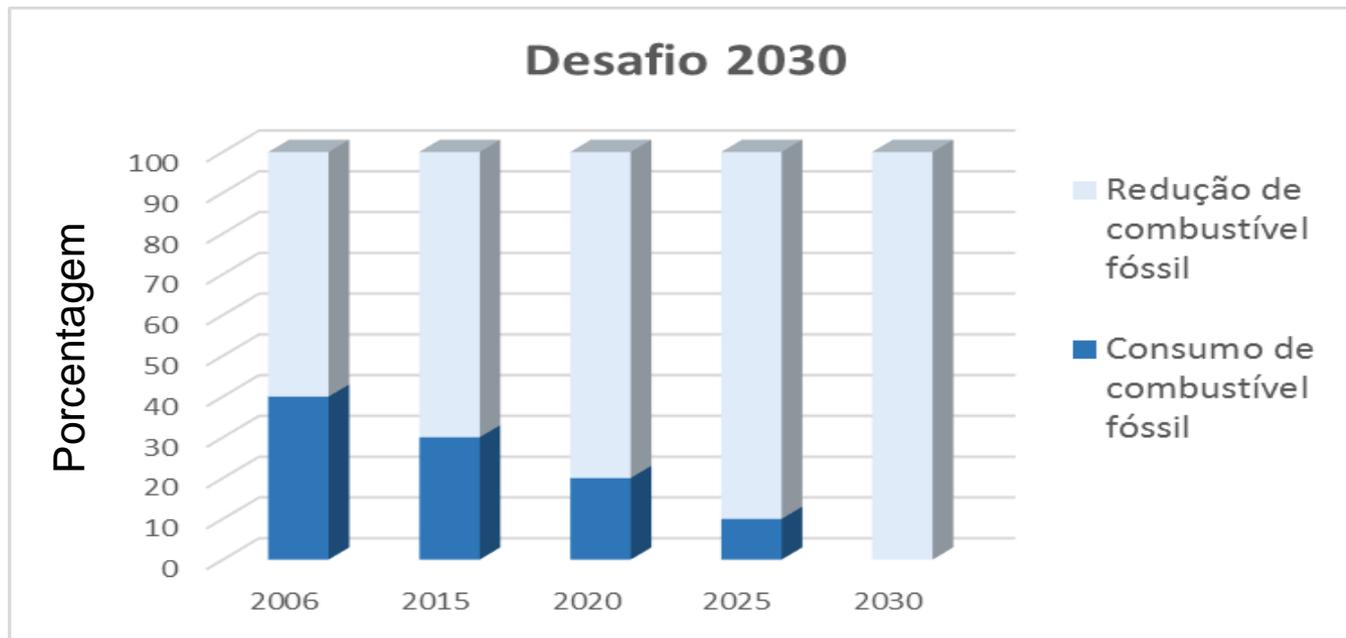
- Eficiência energética/Massa térmica (comitê 122)
- Sustentabilidade do concreto (comitê 130)
- Durabilidade do concreto (comitê 201)
- Cinza volante (comitê 232)
- Cimento de escória (comitê 233)
- Concreto de “ultra-alto” desempenho (comitê 239)
- Nano tecnologia (comitê 241)
- Ambiental (comitê 350)
- Vida útil (comitê 365)
- Concreto drenante (comitê 522)
- Reparo e manutenção do concreto (comitês 345, 546, 562, 563)
- Concreto reciclado (comitê 555)

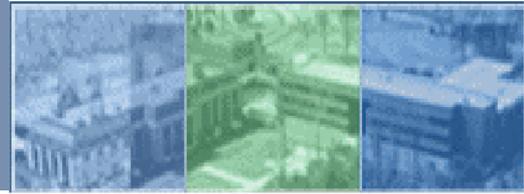
União Sustentável do Concreto

- Criada em 2009
- Composta de 29 institutos e associações que representam a indústria
- www.sustainableconcrete.org
- Focos:
 - Administração de recursos naturais,
 - Administração de recursos financeiros,
 - Segurança e resiliência,
 - Estética

Outras Iniciativas da Indústria

- **Núcleo Sustentabilidade do Concreto do MIT** (<https://cshub.mit.edu/>)
- **NRMCA** : declaração ambiental de produto (EPD), certificação de concreteiras, certificação de profissionais, Conselho de sustentabilidade do concreto (CSC), especificações por desempenho, desafio 2030.
- **ASTM** : Regras de categoria de produtos (PCR), EPD





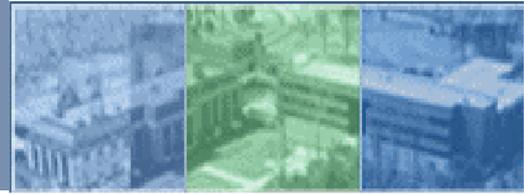
Federal Highway Administration (FHWA)

Agência do Ministério dos Transportes que dá apoio os governos locais no projeto, construção e manutenção do sistema rodoviário.

Turner-Fairbank Highway Research Center TFHRC

Centro nacional de pesquisa do governo com mais de 20 laboratórios.





Programa de Pesquisa e Tecnologia do FHWA

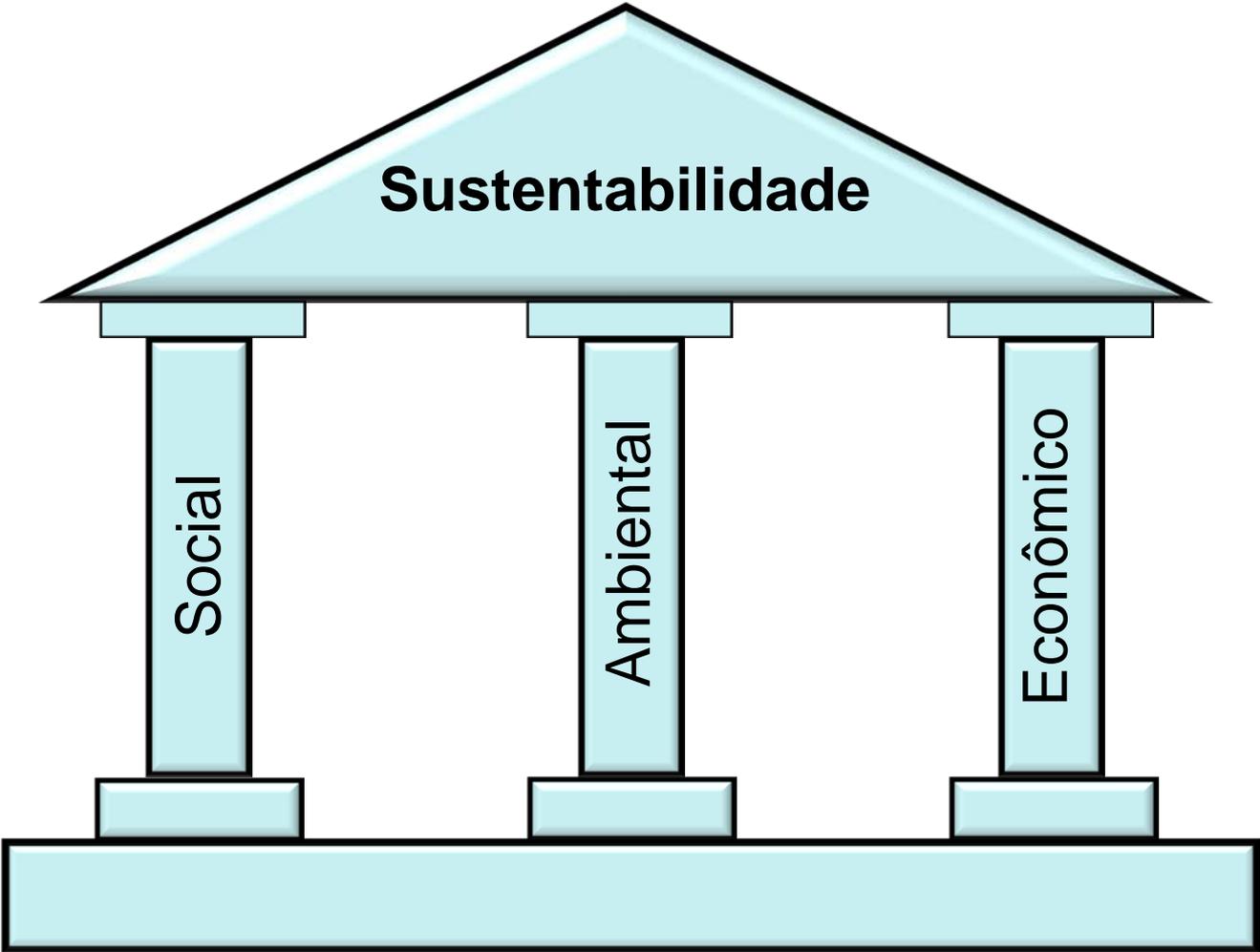
Seis desafios rodoviários de alta prioridade

- Avanço da segurança
- Melhoria da mobilidade

Promoção da sustentabilidade

- Manutenção da integridade da infraestrutura
- Melhoria de desempenho
- Preparação para o futuro







Turner-Fairbank Highway Research Center

TFHRC Pesquisa e Desenvolvimento de:

Infraestrutura: materiais, construção, operação e preservação de pavimentos, pontes, túneis, etc. (13 labs)

Segurança: fatores humanos, segurança de pedestres e ciclistas, segurança em cruzamentos e rodovias, gerenciamento de velocidade e visibilidade



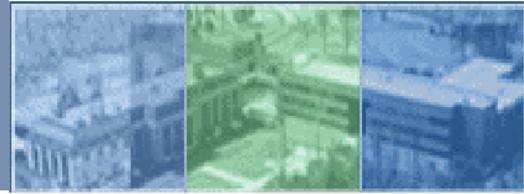
econômica e ambiental

Operações: Tecnologias de capacitação de transporte (sistema veículo-rodovia), conexão de veículos, etc.



social, econômica





Promoção da Sustentabilidade no TFHRC



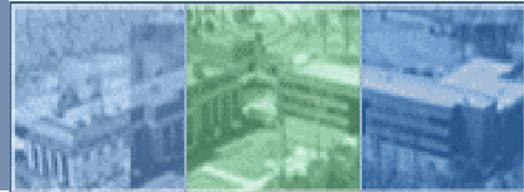
Diminuição do consumo de cimento

Aumento da durabilidade



1. Materiais cimentícios alternativos
2. Maneiras de superar efeitos colaterais do uso de baixo teor de cimento
3. Métodos de ensaios





Misturas com Altos Teores de Cinza Volante

Misturas sustentáveis

Atrasa o acabamento e o corte de juntas

- Redução de emissão de CO₂

Atrasa a remoção de formas e o crissistema de produção

- Aumento do uso de resíduos e produtos
- Conservação de recursos naturais

Requer cura mais prolongada (14 d), Sensibilidade a temperatura, energias de ativação diferentes

Efeitos de diluição, retardamento severo

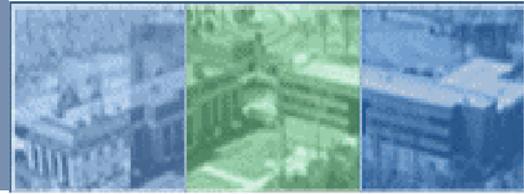


- Tempo de pega atrasado

Uso limitado de ATCV

- Aumento da sensibilidade às condições de cura





Aumento do uso de misturas com ATCV

Métodos de ensaio

Calorimetria isotérmica

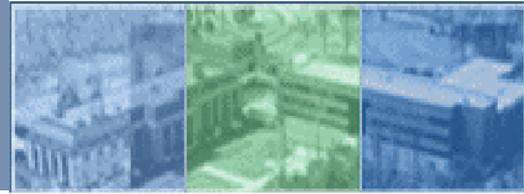
Reologia

Adições

“Filler” calcário

Nanopartículas





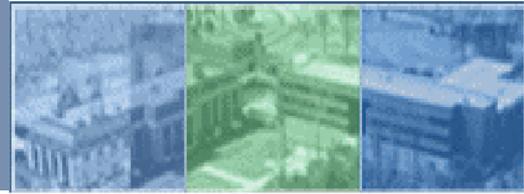
Métodos de ensaio

Objetivos

Uso do calorímetro isotérmico e do reômetro de cisalhamento dinâmico como ferramentas de avaliação rápida para:

- Prever/avaliar propriedades de baixas idades
- Desenvolver um protocolo de pré-qualificação





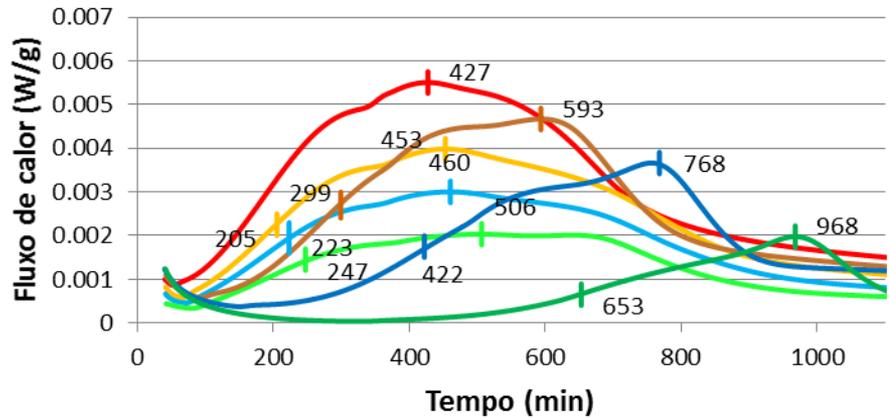
Métodos de ensaio – Plano experimental

- **Materiais:** 2 cimentos – alto ou baixo teor de álcalis
2 cinzas volantes – tipos F ou C
Substituições de cimento portland de 0%, 20%, 40% ou 60%
a/cm = 0.4
14 misturas diferentes
- **Ensaio em Argamassas:** Consistência (espalhamento)
Resistência à compressão 3, 7, 28, 56, 91 e 119 dias
Tempo de pega
- **Ensaio em Pastas:** Calorimetria isotérmica
Propriedades reológicas com pratos paralelos a 8, 30, 50, 70 e 90 minutos.

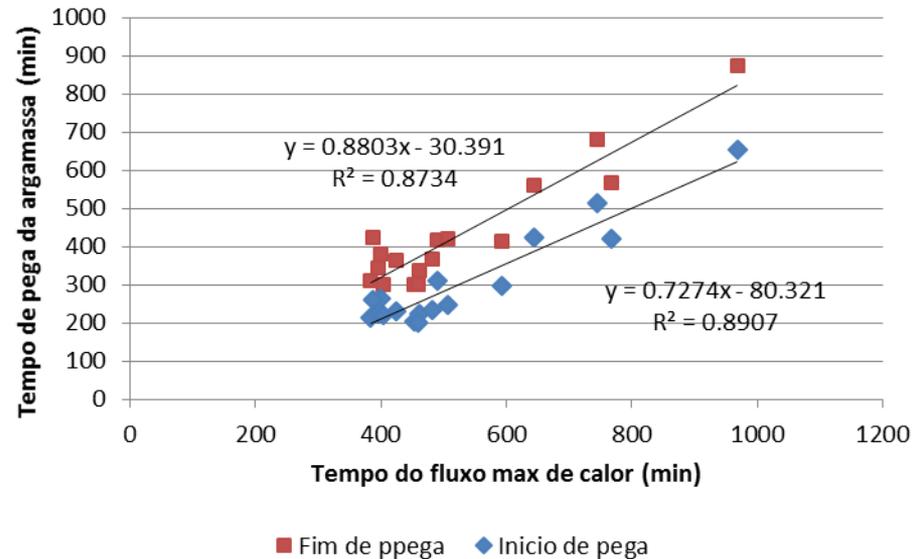
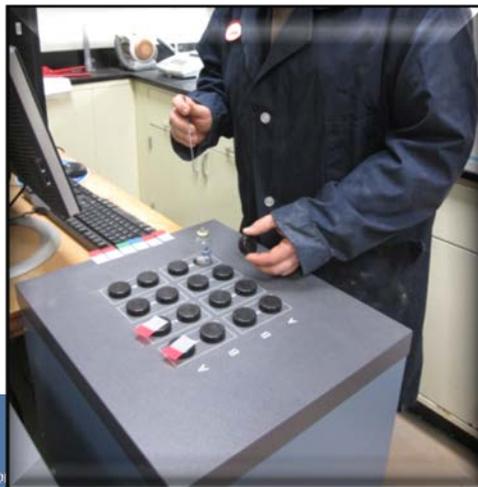
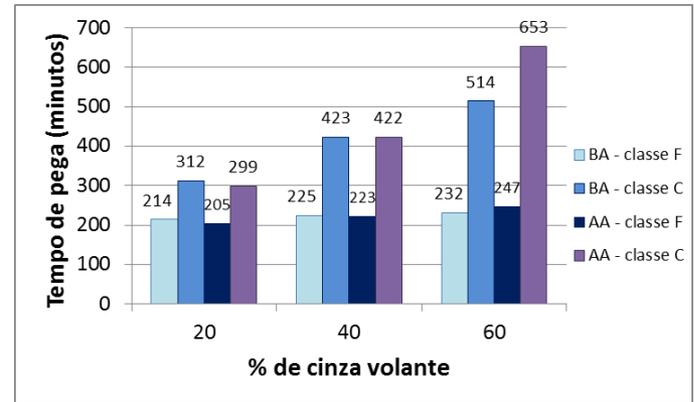


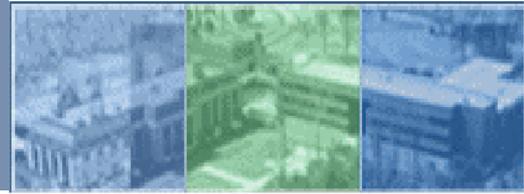


Métodos de ensaio

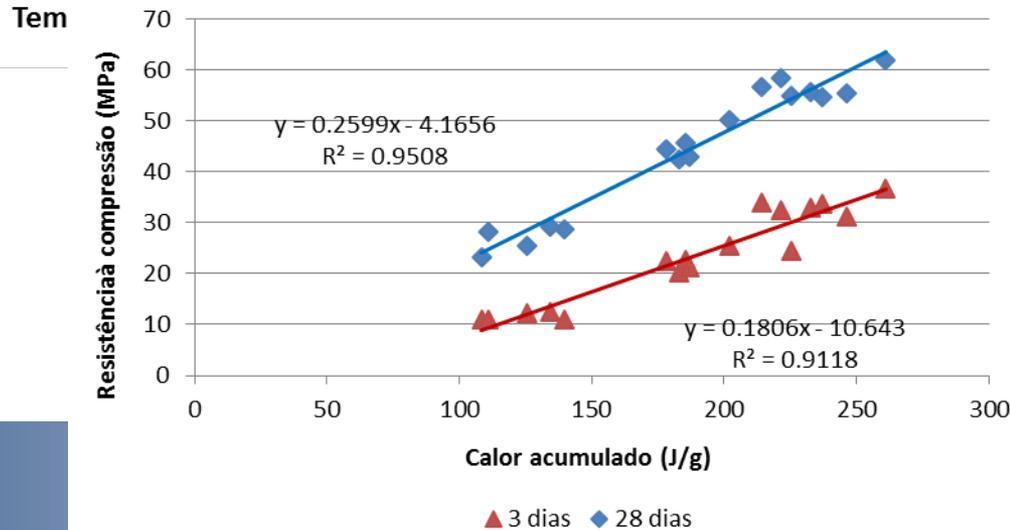
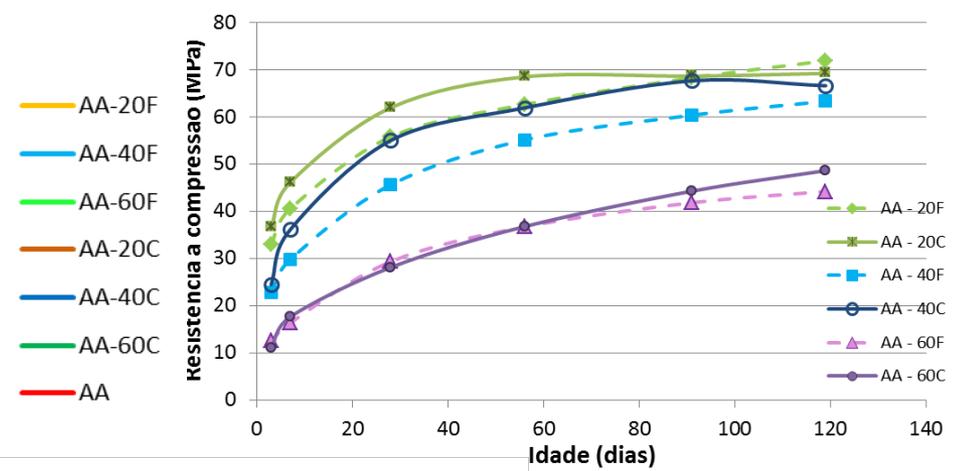
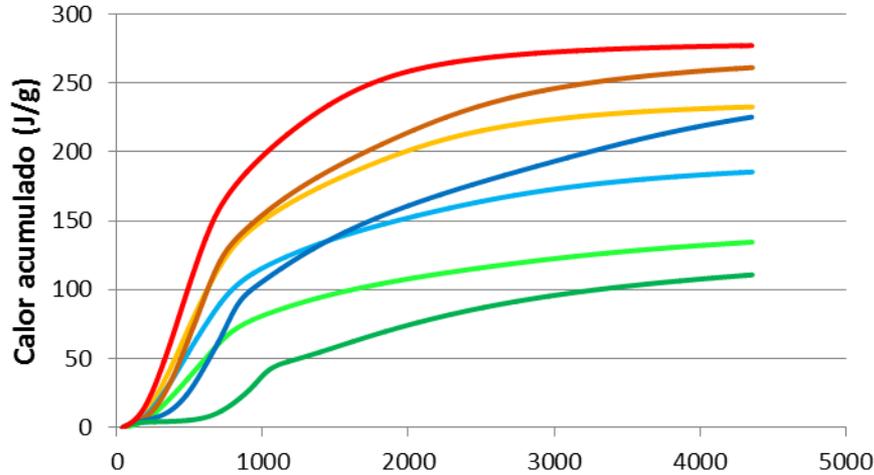


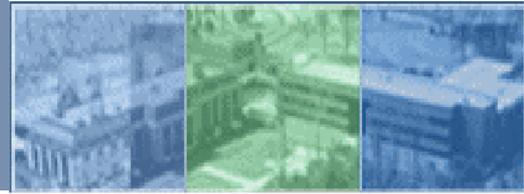
— HA — HA20F — HA40F — HA60F — HA20C — HA40C — HA60C





Métodos de ensaio





Adições

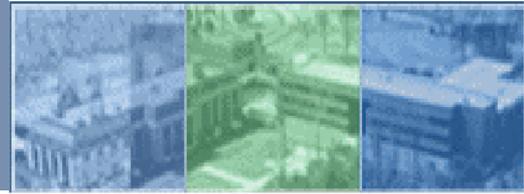
Adições



“Filler” calcário

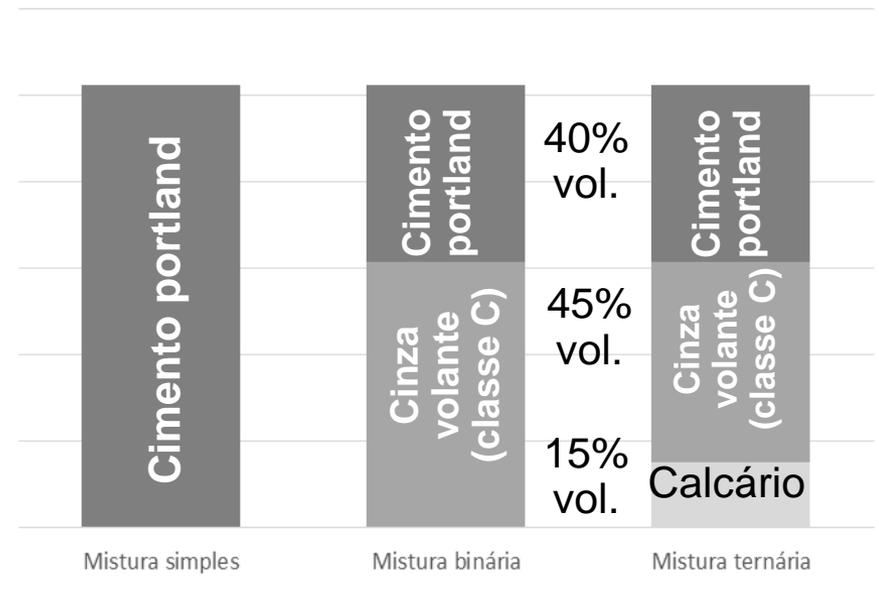
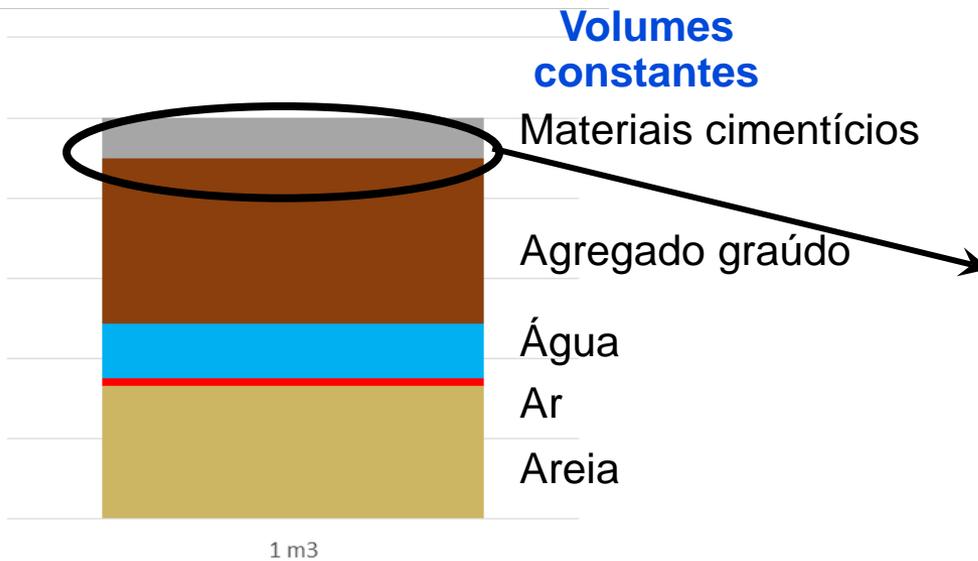
Nanopartículas





Filler Calcário – Projeto com NIST

- Cimento Portland – 335 kg/m³
- Agregado graúdo – 1038 kg/m³
- $a/cm = 0.4 = 134 \text{ kg/m}^3$
- Substituições de cimento portland de 0%, 40% ou 60%
- 2 cinzas volantes – tipos F ou C

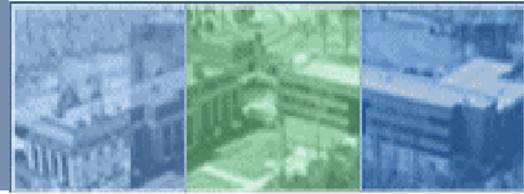




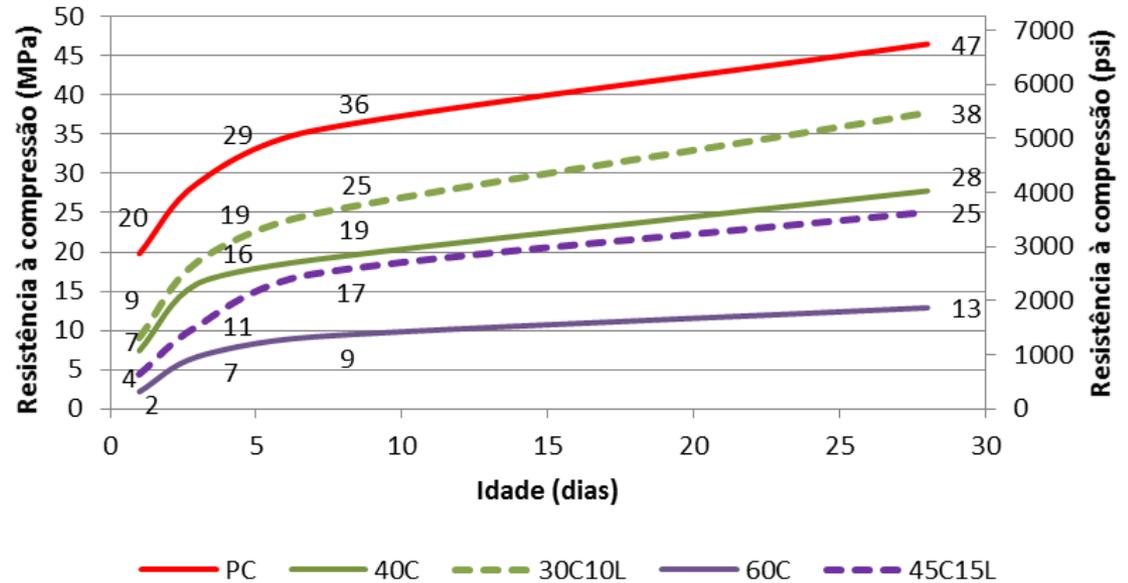
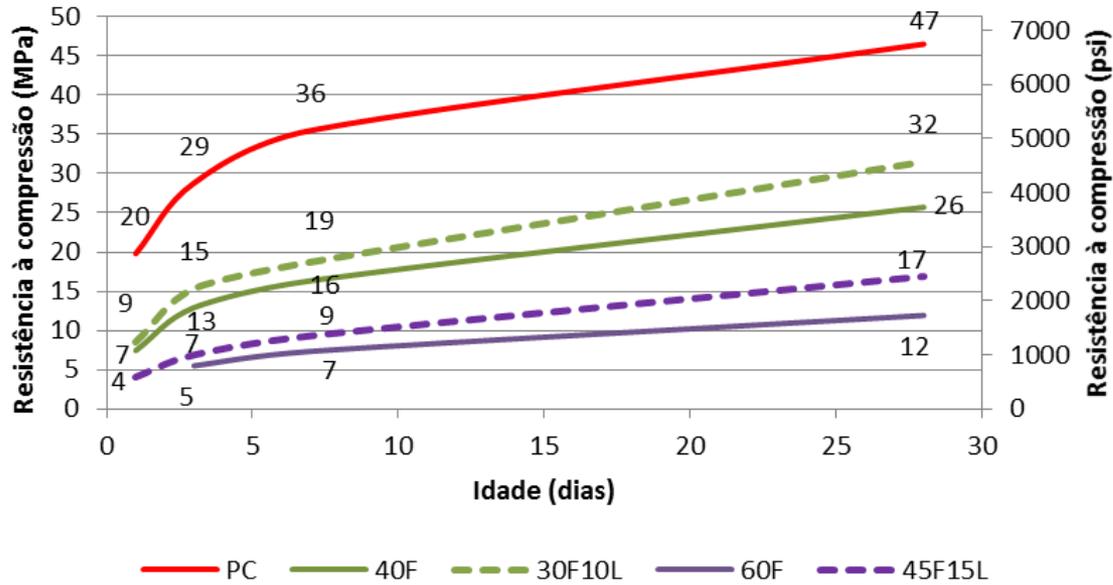
Filler Calcário – Projeto com NIST

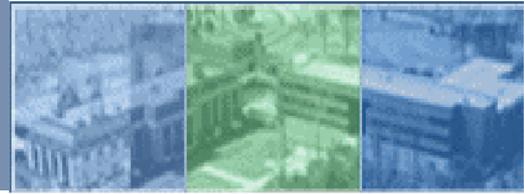
Materiais	Tipo de cinza					% volume			
	PC	40F	30F10L	40C	30C10L	60F	45F15L	60C	45C15L
Cimento (% do total do volume cimentício)	100*	60	60	60	60	40	40	40	40
Cinza volante classe F (% do total do volume cimentício)	0	40	30	0	0	60	45	0	0
Cinza volante classe C (% do total do volume cimentício)	0	0	0	40	30	0	0	60	45
Calcário 0.7 μ m (% do total do volume cimentício)	0	0	10	0	10	0	15	0	15
Agregado graúdo, lb/yd ³	988	988	988	988	988	988	988	988	988
Areia, lb/yd ³	921	921	921	921	921	921	921	921	921
Água, lb/yd ³	131	131	131	131	131	131	131	131	131
<i>a/cm (por massa)</i>	0.40	0.46	0.45	0.43	0.43	0.50	0.49	0.45	0.45



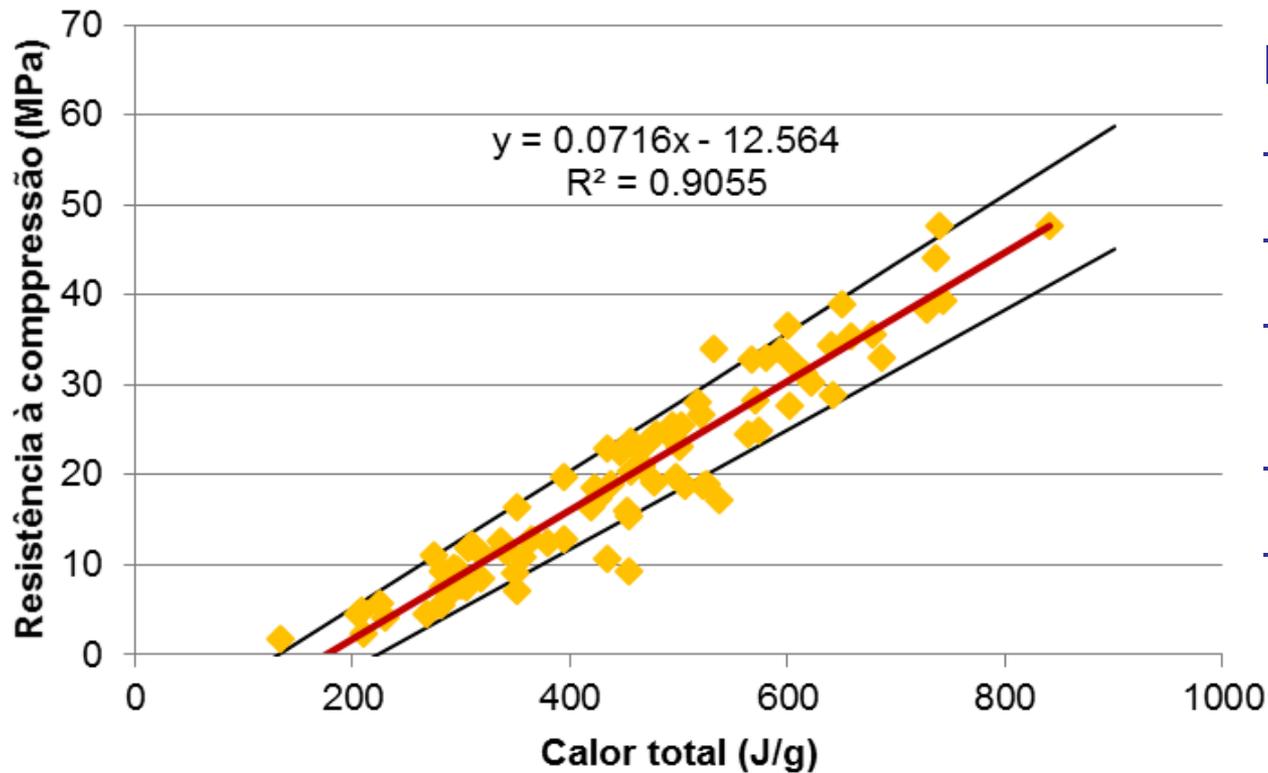


Resistência à compressão





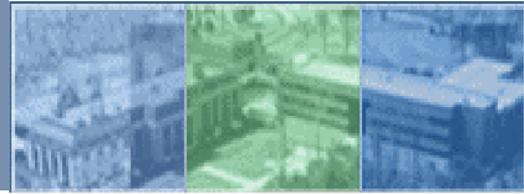
Modificação das Misturas



Inclui:

- Misturas PC
- Misturas ATCV
- Misturas ATCV + calcário fino
- Concreto
- Argamassa

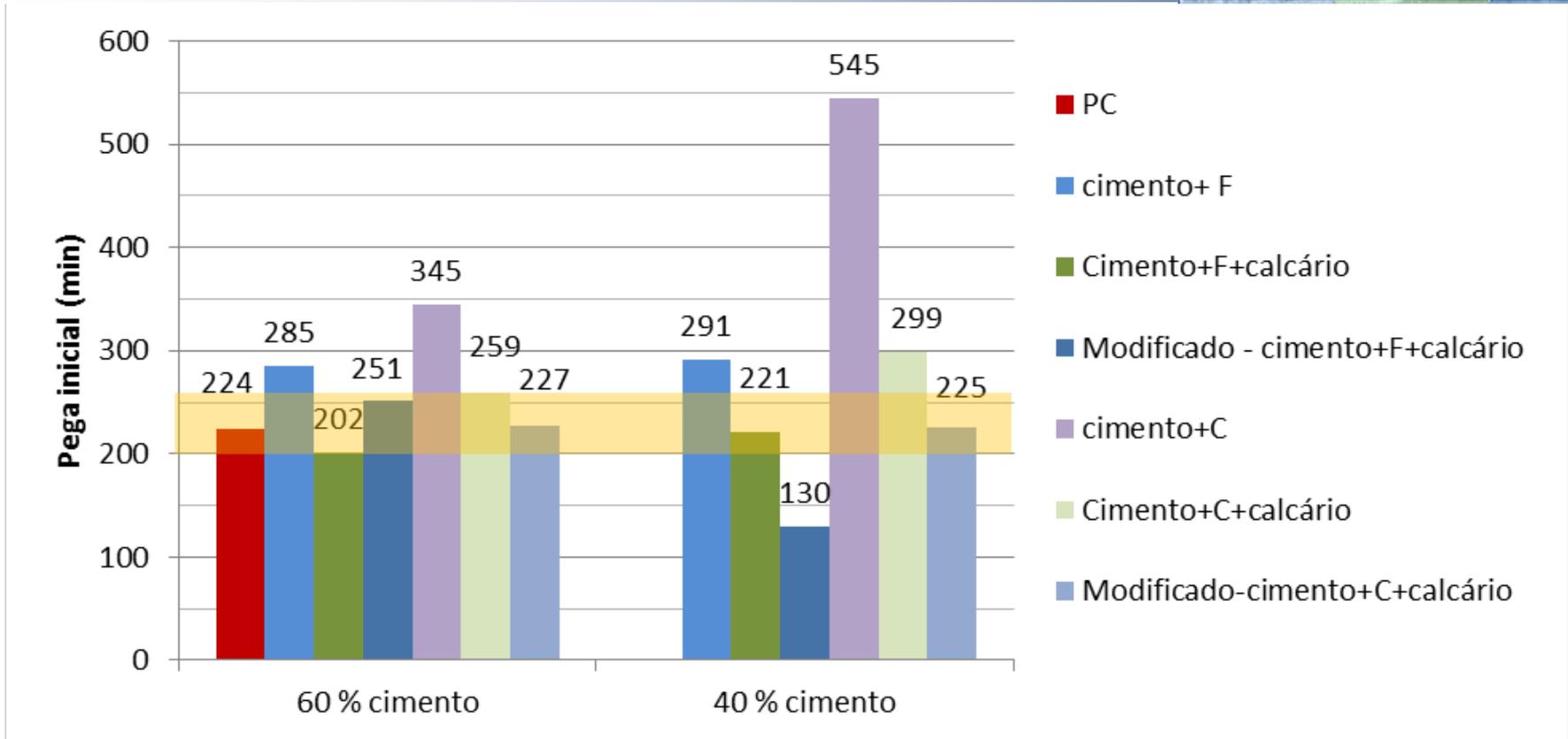




Fase II

- Resistência 1 dia de 13.8 MPa (2000 psi)
- Para 40 % substituição, a/cm foi reduzida e o conteúdo de areia aumentado
 - $a/cm = 0.34$ e 0.37 para F e C, respectivamente
- Para 60 % substituição, cimento de alta resistência inicial e a/cm foi reduzida
 - Misturas alcançaram redução de cimento de ~50 %
 - $A/cm = 0.31$ e 0.29 para F e C, respectivamente
 - Volume de água foi substituído pela mistura ternária





- Calcário reduziu tempo de pega
- Diminuição de a/cm aumentou tempo de pega pelo aumento do superplastificante



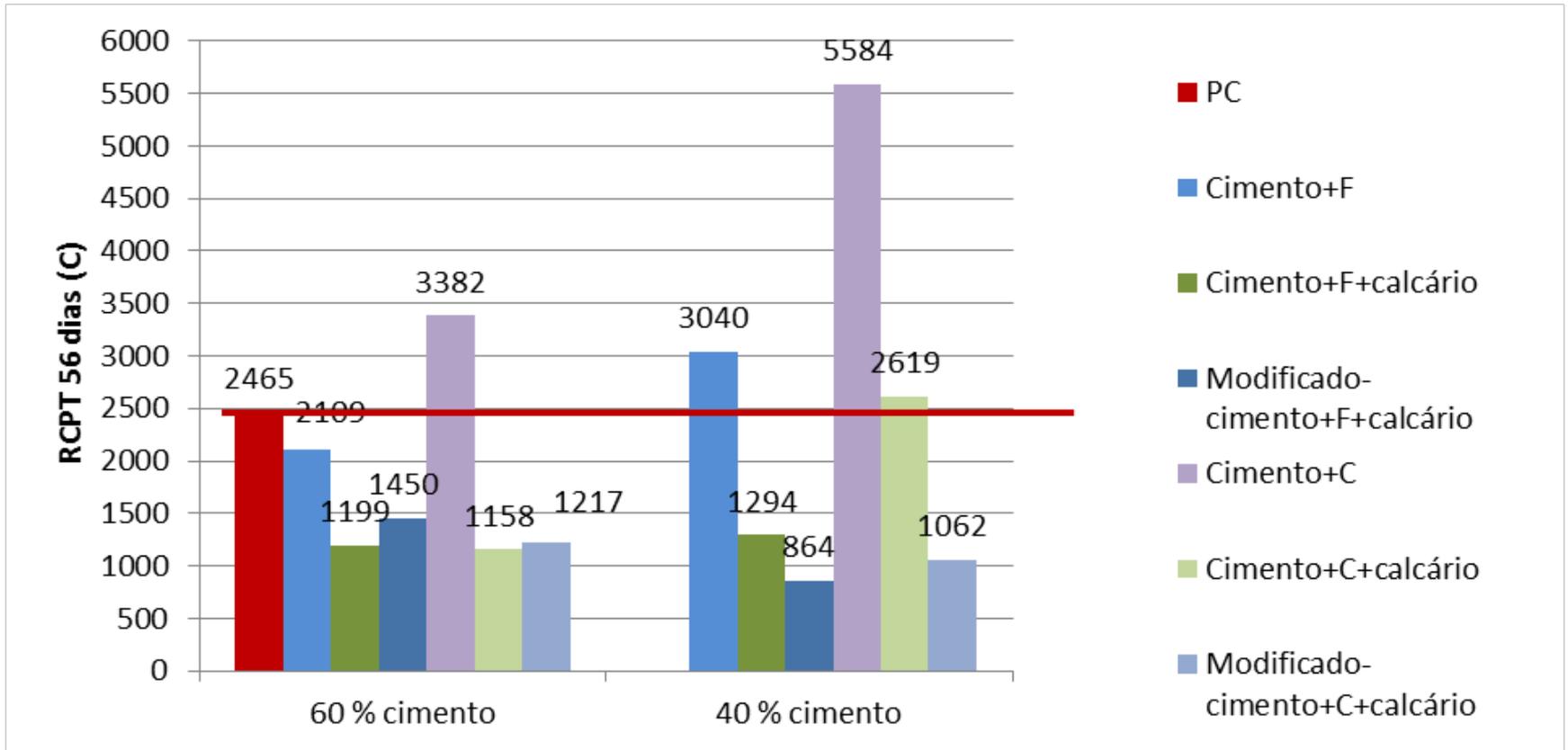
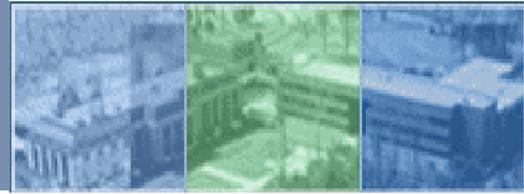


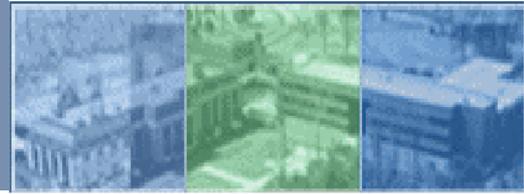
Contribuição à melhoria de desempenho: Pega e resistência

- Calcário fino fornece superfícies adicionais para precipitação e crescimento dos produtos das reações de hidratação e pozolânicas.
- Calcário fino é um pouco reativo, especialmente com as fases de aluminossilicato da cinza classe C.
- As fases carboaluminossilicato podem ser mais rígidas que as fases convencionais de sulfoaluminato com etringita e Afm (Moon, et al., CCR, 2012)



TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER

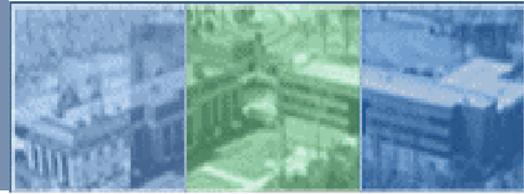




Contribuição à melhoria de desempenho: RCPT

- Aumento das reações de hidratação e pozolânicas, reduzindo a porosidade capilar.
 - Carboaluminatos são mais volumosos.
- A solução nos poros é menos condutiva.
- Refinamento dos poros.

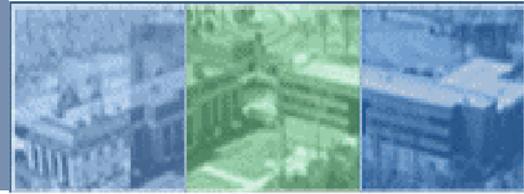




Resistência à compressão e custo

Resistência	1-PC	2-40F	3-30F10L	3A	4-40C	5-30C10L	5A	6-60F	7-45F15L	7A	8-60C	9-45C15L	9A
1 dia (Mpa)	19.8	7.4	8.5	18.6	7.4	9.0	16.3	-	4.1	25.5	2.2	4.5	26.8
3 dias (MPa)	28.8	12.9	15.4	27.6	16.0	18.7	30.3	5.5	6.9	32.3	6.7	10.6	39.3
7 dias (MPa)	35.5	16.3	18.7	32.9	19.0	24.8	38.4	7.3	9.4	35.3	9.2	17.2	47.6
28 dias (MPa)	46.5	25.7	31.6	42.5	27.8	37.7	48.2	11.9	16.9	45.2	12.9	25.1	61.0
Custo estimado (\$/m³)	70.13	55.81	56.99	66.36	56.21	57.09	59.21	49.76	51.41	63.35	50.35	51.84	63.31
Custo/MPa aos 28 d [\$(m³·MPa)]	\$1.51	\$2.17	\$1.80	\$1.56	\$2.02	\$1.52	\$1.23	\$4.17	\$3.04	\$1.40	\$3.91	\$2.07	\$1.04





Sumário: Calcário Fino

- Fornece superfícies adicionais para precipitação e crescimento de produtos de hidratação
- É reativo, especialmente com os aluminossilicatos
- Forma fases carboaluminato que são mais rígidos, aumentando a resistência
- Melhora o transporte do concreto
- Promove refinamento dos poros

Ajuda a superar os efeitos colaterais do uso de altos teores de cinza volante:

- Diminuição do tempo de pega
- Aumento da resistência à compressão





**60% cinza volante
(F – a/cm=0.50 ou
C – a/cm=0.46)**

**Sintetizados em
laboratório**



59% cinza (F ou C) + 1% nano partículas



Nano-sílica (1Si)

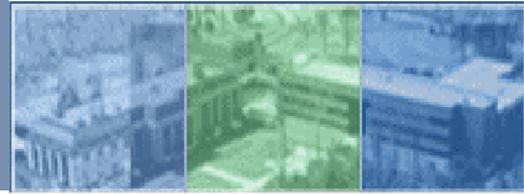
Nano-boehmita (1Al)

Nano-aluminosilicatos:

Silício/alumínio = 0.64 (Si/Al0.64)

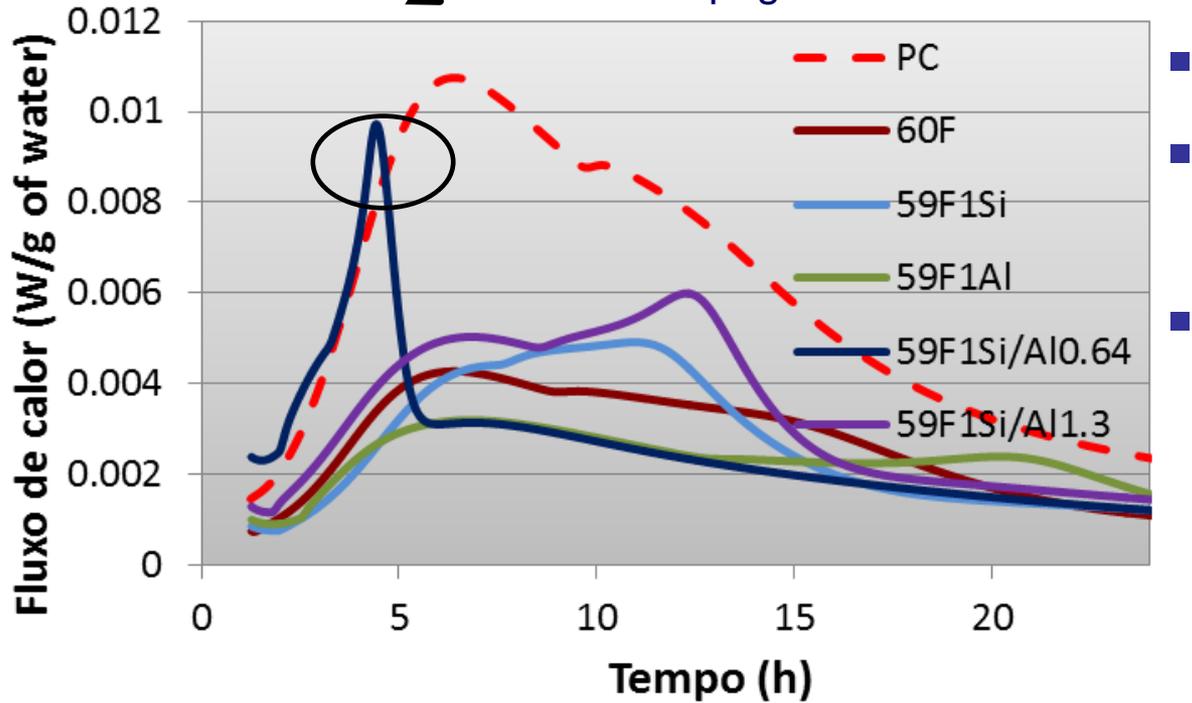
Silício/alumínio = 1.3 (Si/Al1.3)





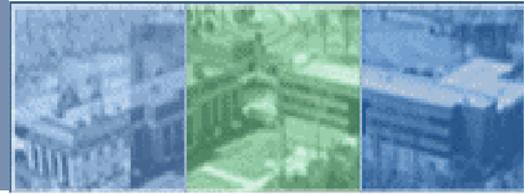
Calorimetria Isotérmica

Sobrepôs o PC, como a pega

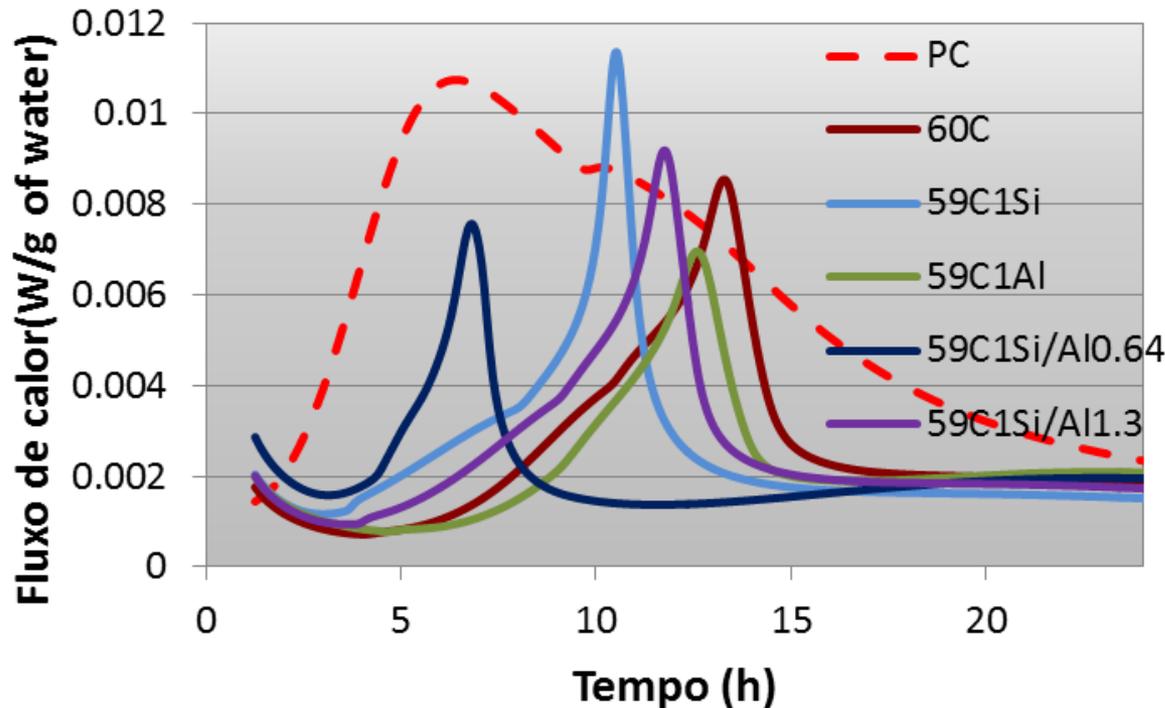


- Deslocamento dos picos
- Amplificação do pico aluminato
- Pouca liberação de calor depois do pico





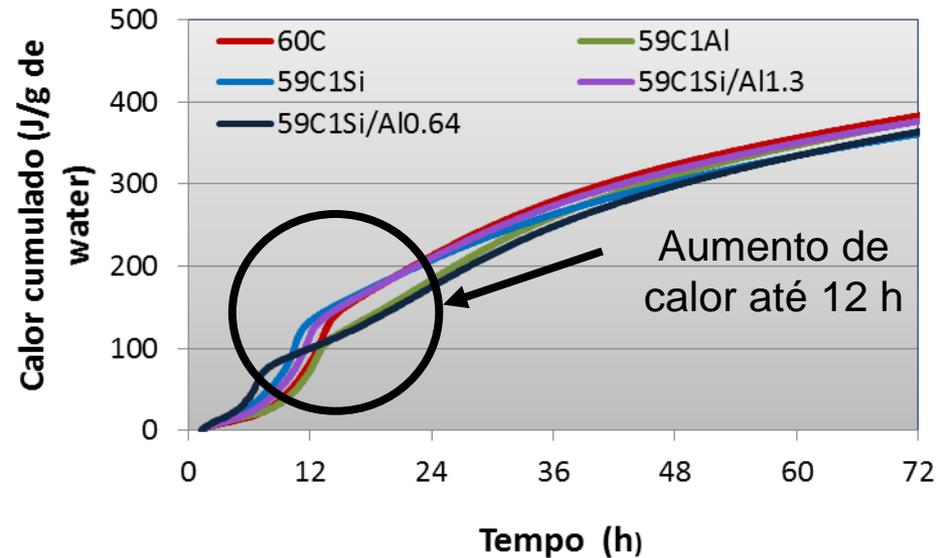
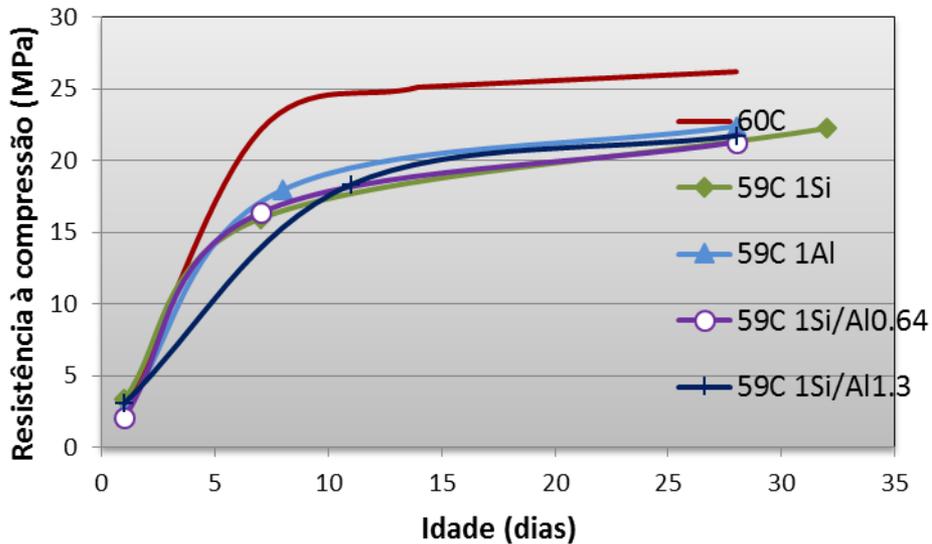
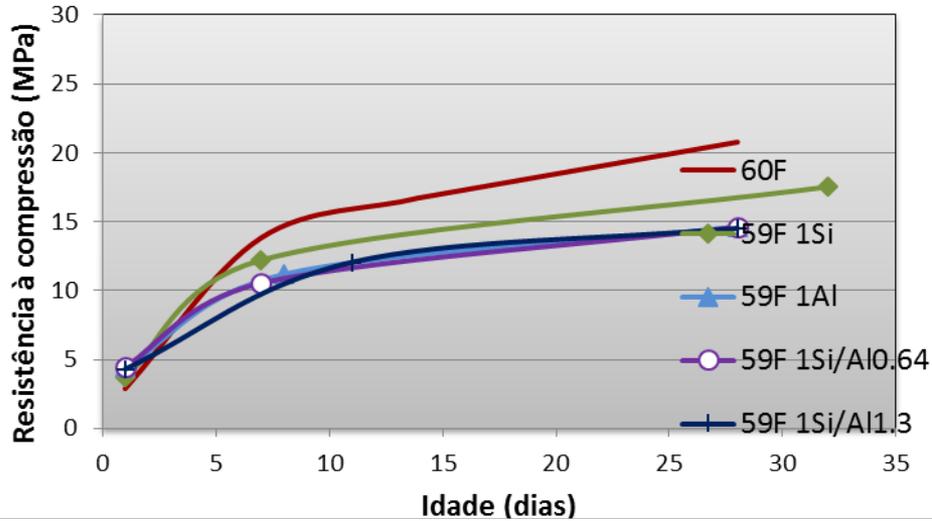
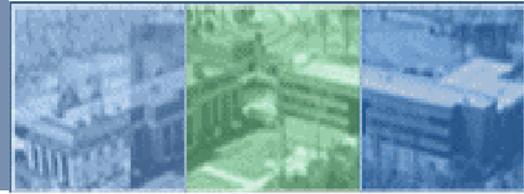
Calorimetria Isotérmica

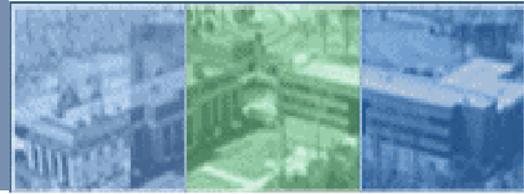


- Período dormente aprox. 6h para 60C
- Picos menores (exceção 59C1Si)
- Baixo calor após pico
- Redução do período dormente com nano (aceleração reações)
- Nano-sílica pico maior que o PC
- Si/Al1.3 pico maior que 60C

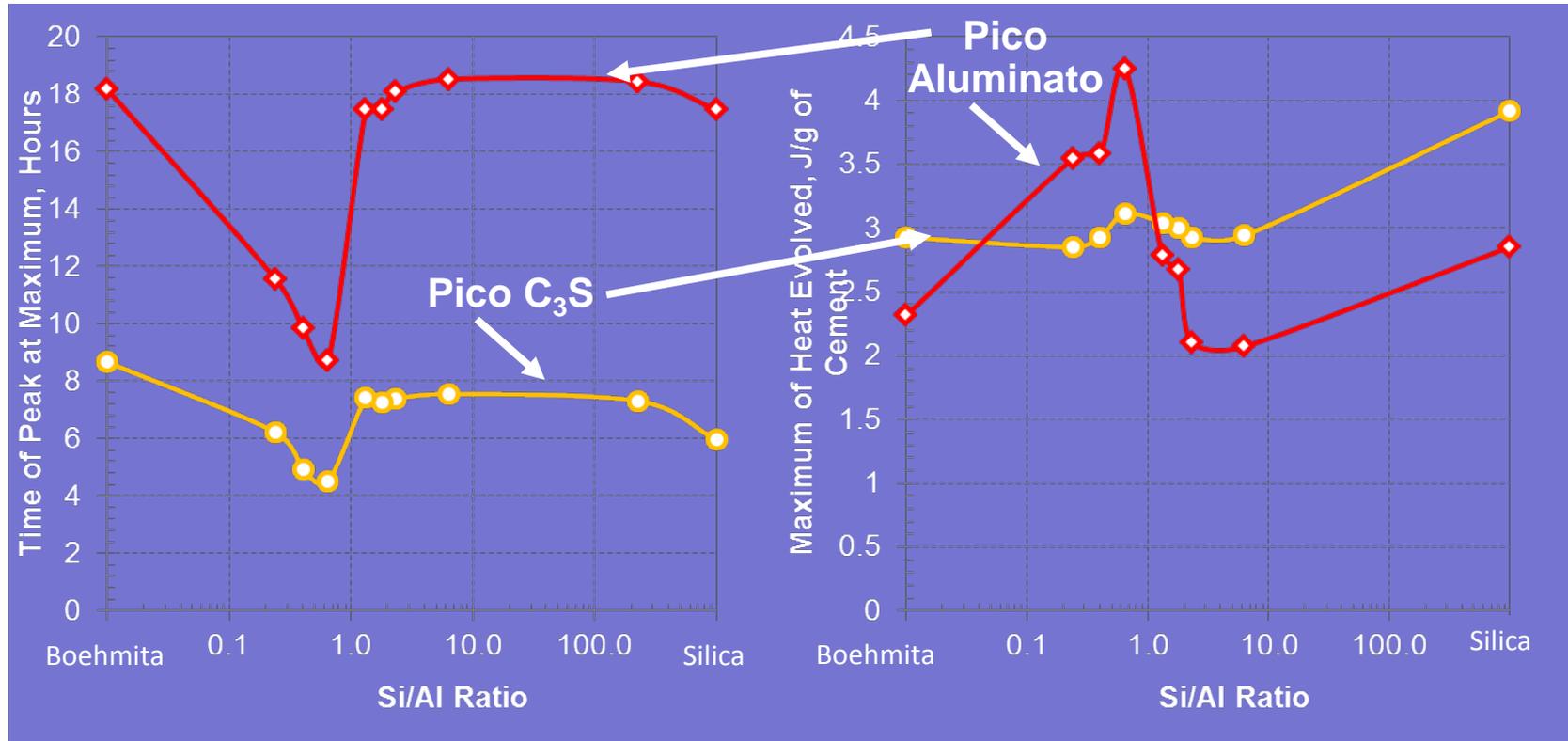


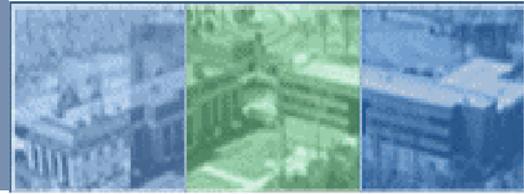
TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER





Efeito da Si/Al sobre hidratação do cimento portland





Sumário

Pega:

- Nano-boehmita causou ainda mais retardamento
- Nano-sílica acelerou apenas classe C
- Si/Al1.3 não melhorou pega
- Si/Al0.64 acelerou as duas cinzas

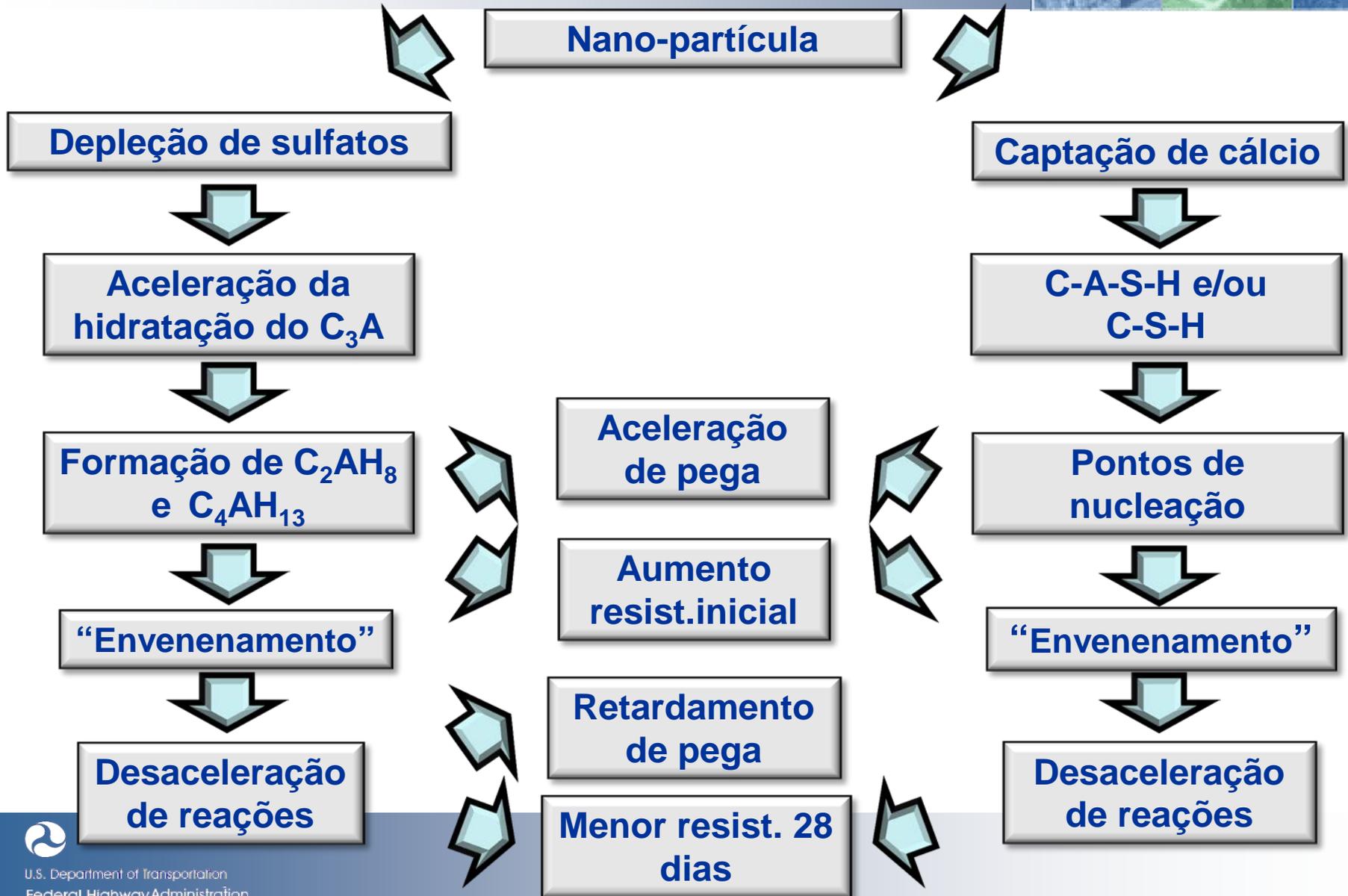
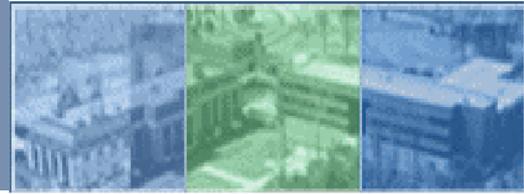


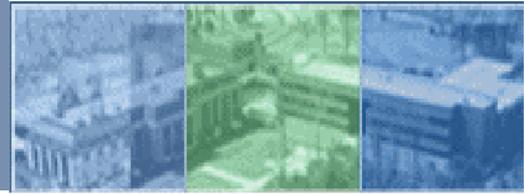
Efeito depende
da Si/Al

Resistência à compressão:

- Diminuição aos 28 dias com todas as partículas
- Classe F: melhoria da resistência a 1 dia
- Classe C:
 - ❖ Apenas SiO₂ e Si/Al1.3 melhoraram a resistência de 1 dia
 - ❖ Si/Al0.64 diminuiu a resistência de 1 dia







Reologia

- Reologia mede a resistência à deformação
- Reologia está relacionada com trabalhabilidade
- Reologia está relacionada com o desenvolvimento da microestrutura
- O modelo de Bingham é o mais usado:

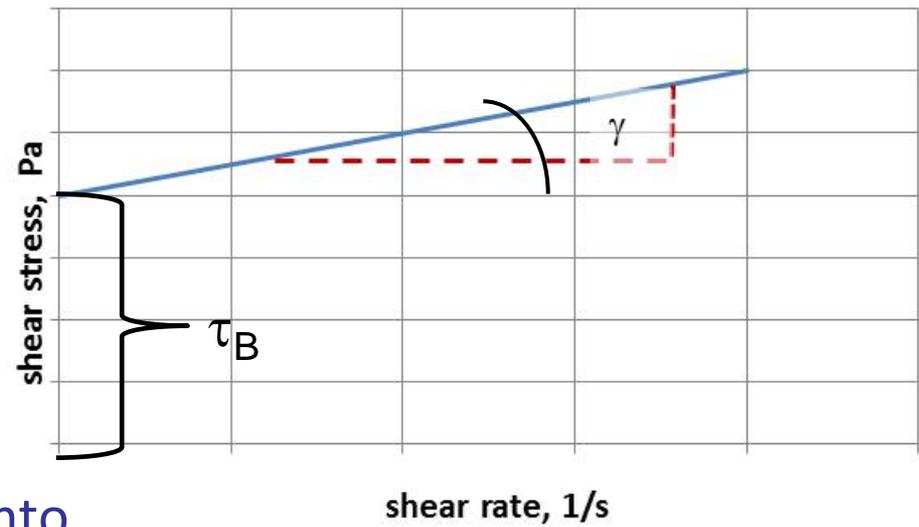
$$\tau = \tau_B + \dot{\gamma} \eta_{pl}$$

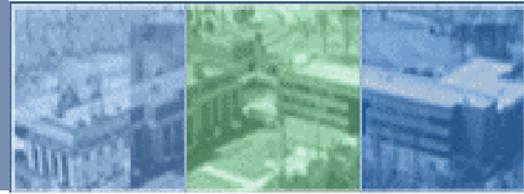
τ = tensão de cisalhamento

τ_B = tensão de cisalhamento inicial

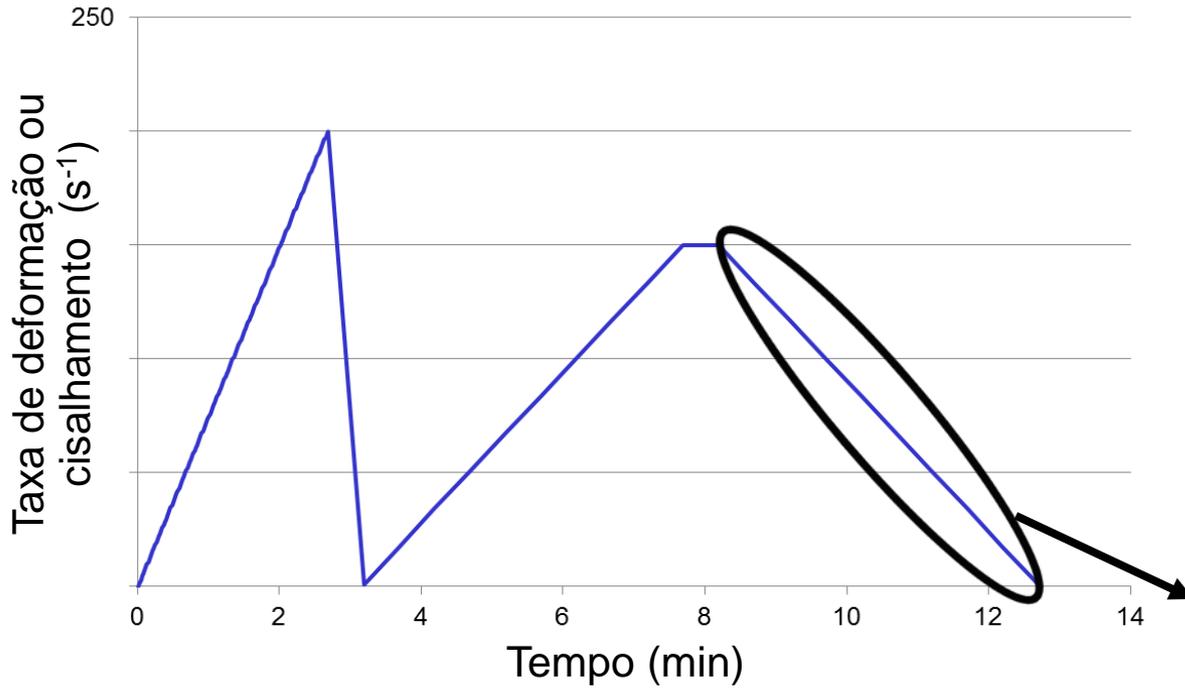
η_{pl} = viscosidade plástica

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação ou cisalhamento

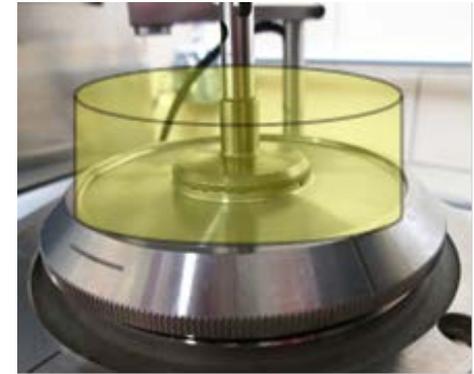


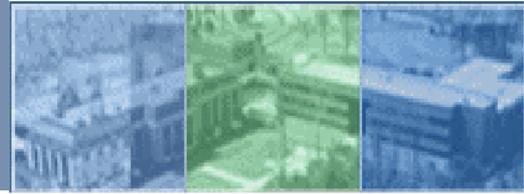


Reologia de pastas

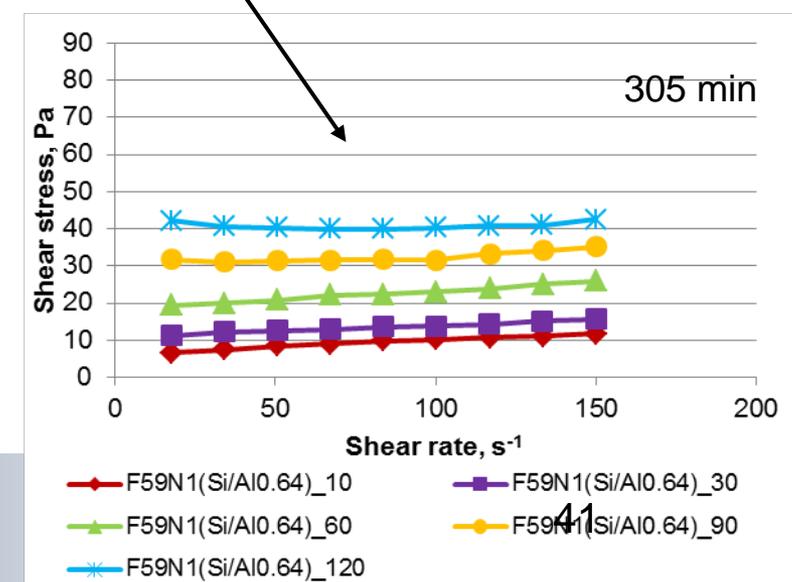
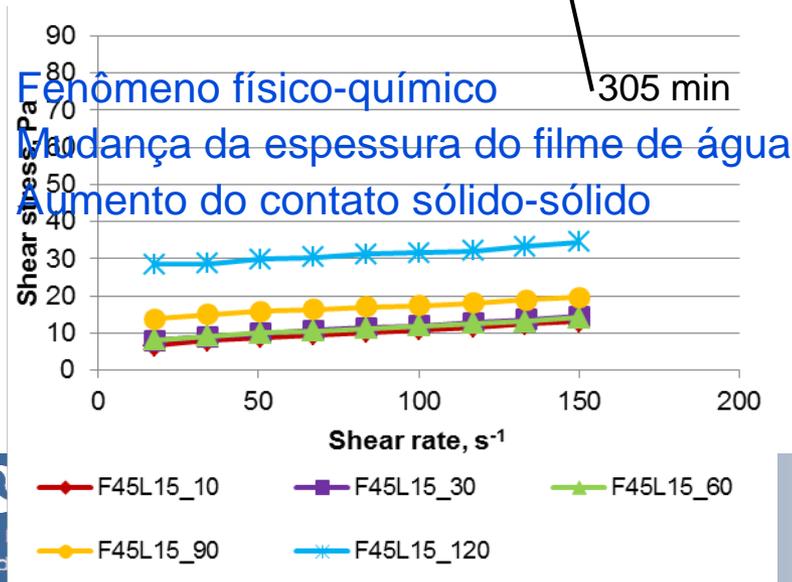
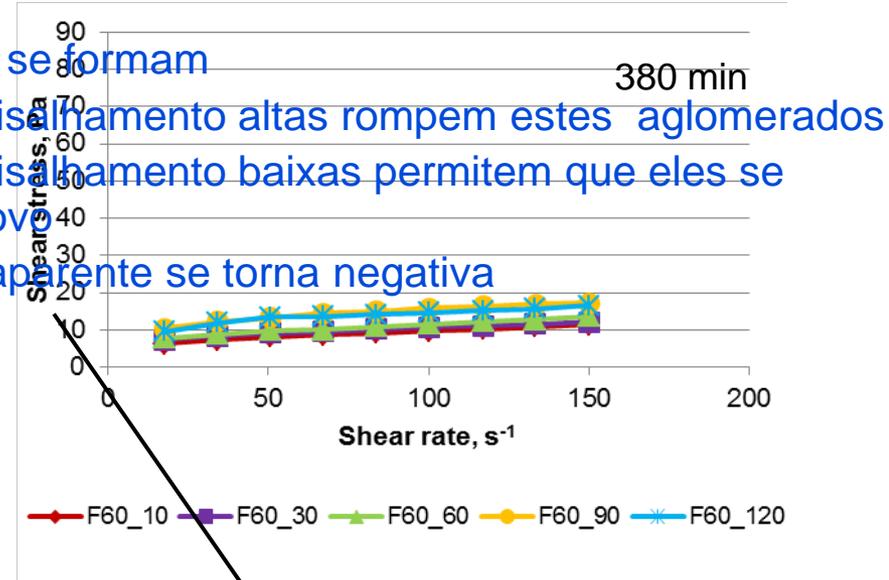
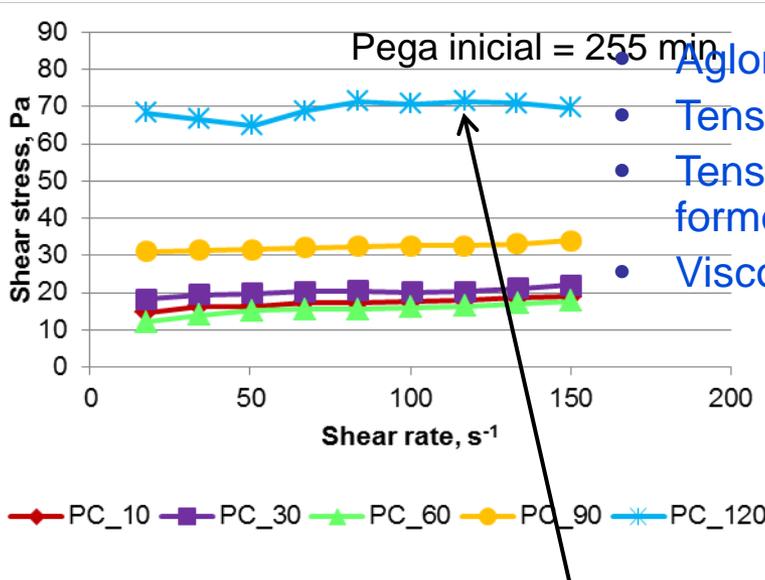


Protocolo de ensaio



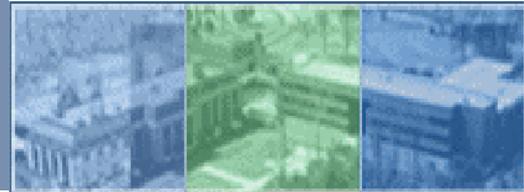


Misturas com cinza F



Aglomerados se formam

- Tensões de cisalhamento altas rompem estes aglomerados
- Tensões de cisalhamento baixas permitem que eles se formem de novo
- Viscosidade aparente se torna negativa



Comerciais

**60% cinza volante
(F – $a/cm=0.50$ ou
C – $a/cm=0.46$)**



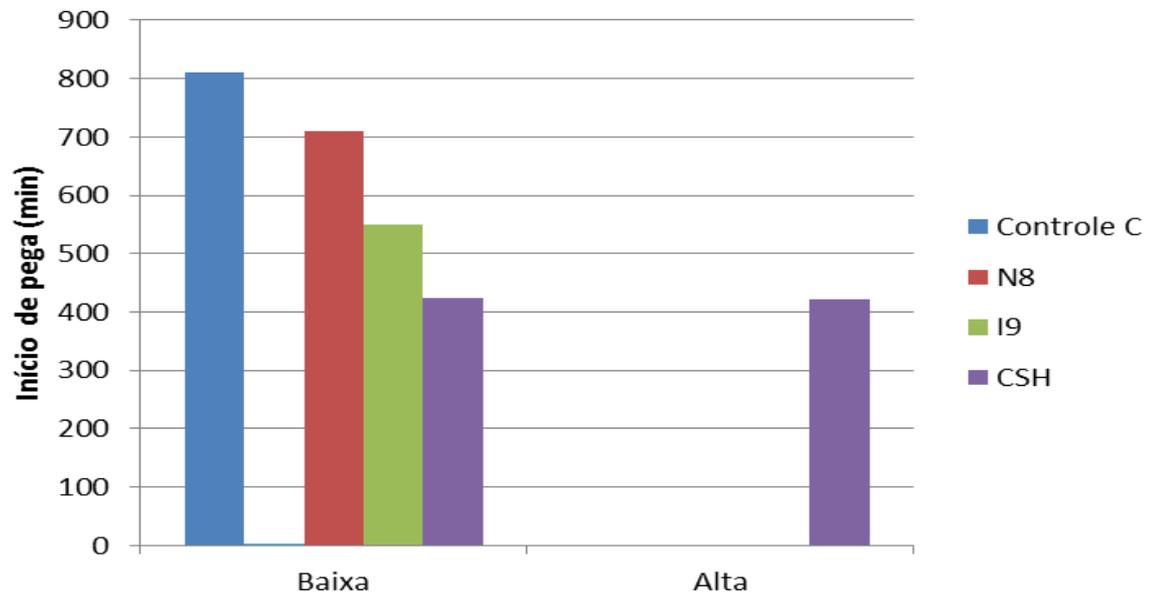
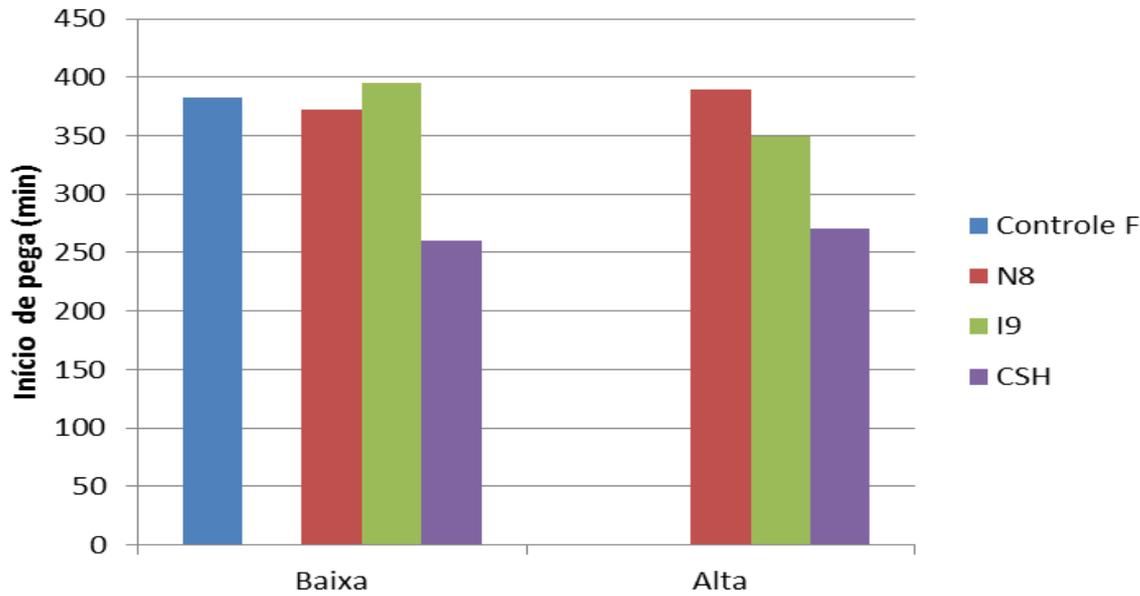
Cinza (F ou C) + nano partículas = 60%



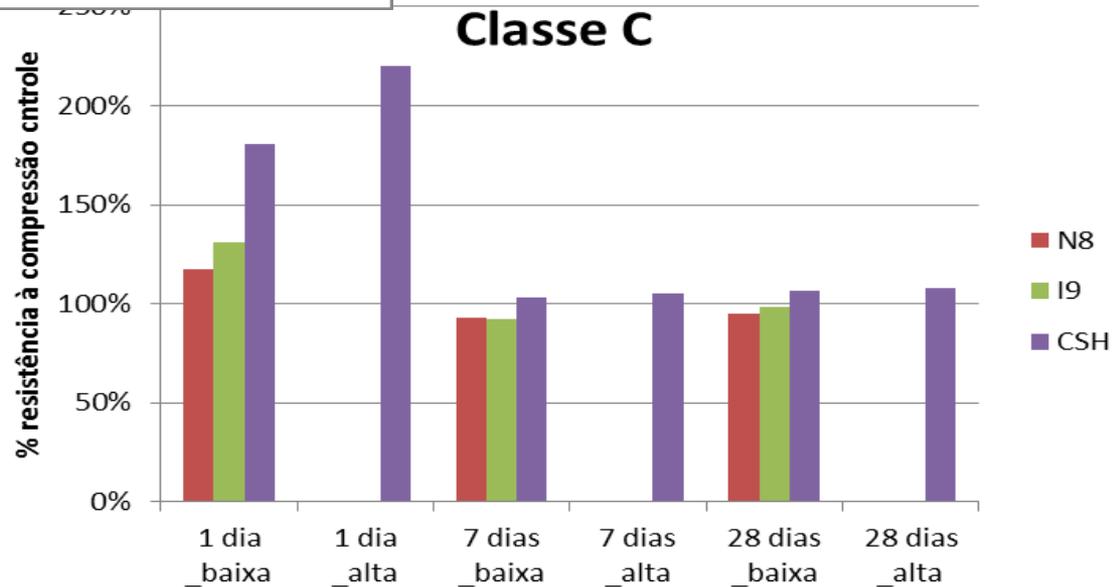
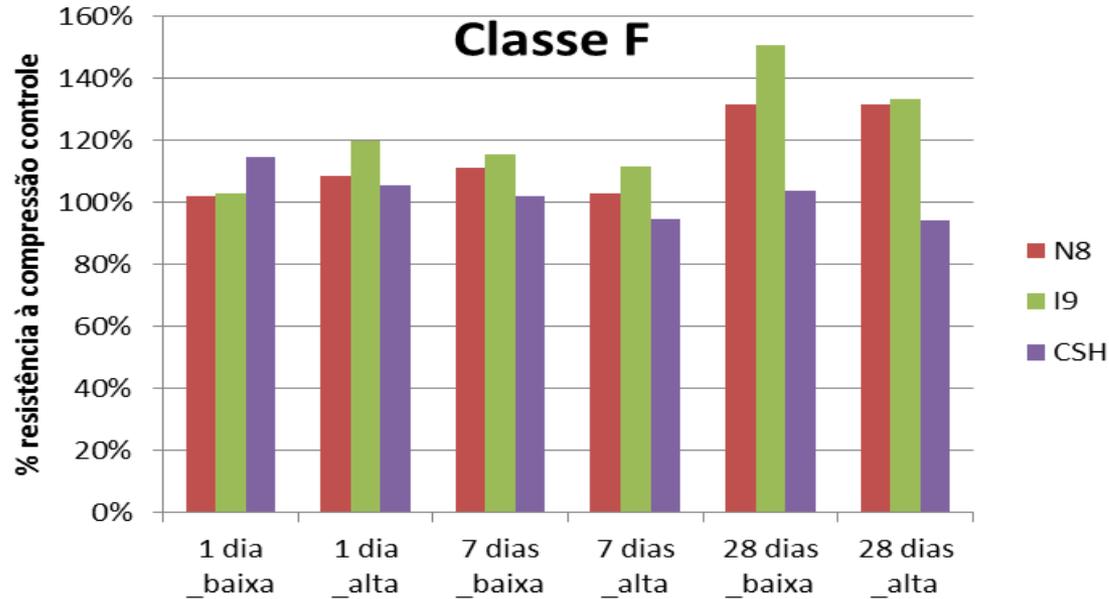
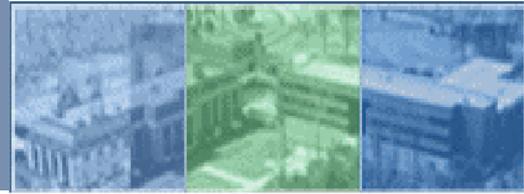
C-S-H: 1.5% e 3%
Nano-sílica N8: 1% e 3%
Nano-sílica I9: 1% e 3%
(partículas menores)

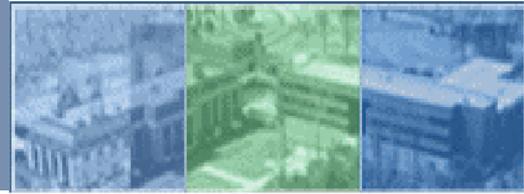


TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER



TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER





Sumário

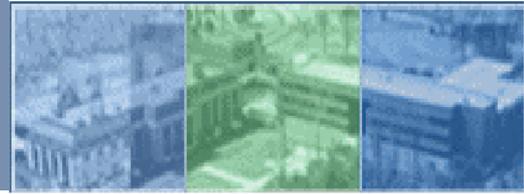
Pega:

- Aumento de dosagem não melhora a pega
- Nano-sílica não ajuda a pega de classe F
- C-S-H é o mais eficiente por proporcionar pontos de nucleação com mais compatibilidade química

Resistência à compressão:

- C-S-H só contribui para compressão a 1 dia na classe C
- Nano-sílica contribui aos 28 dias independentemente da dosagem



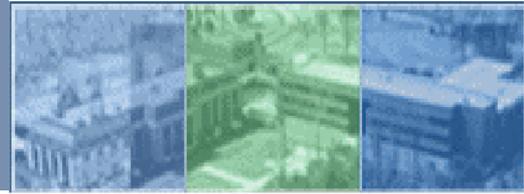


Concreto de Ultra-Alto Desempenho

- Programa iniciado em 2002
- Caracterização mecânica, estrutural e de durabilidade
- Atualmente inclui vários fornecedores

Materiais	kg/m³
Cimento portland	712
Sílica ativa	231
Quartzo	211
Areia fina	1020
Fibras de aço	156
Superplastificante	30
Água	129
a/mc	0.17





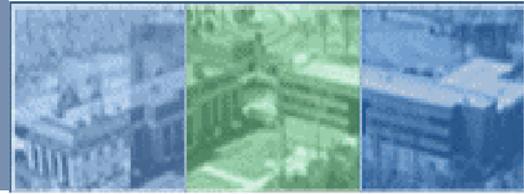
Concreto de Ultra-Alto Desempenho

Resistência à compressão	125 -240 MPa
Módulo de elasticidade	42-55 GPa
Coeficiente de fluência	0.3-0.8
Capacidade de tração sustentada	6-10 MPa
RCPT	20-350 C
Resistência ao gelo-degelo	RDM>95%

Aplicações:

- **Tabuleiros, vigas, colunas, estacas e juntas e conexões**
- **Atualmente há um foco em pontes pré-fabricadas (construção acelerada de pontes)**
 - **Porém as conexões podem ser um problema**



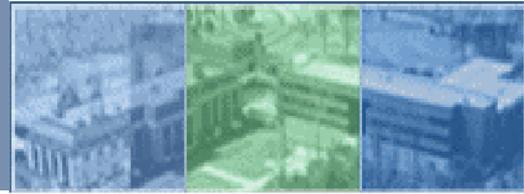


Propriedades de Transporte em Presença de Sais

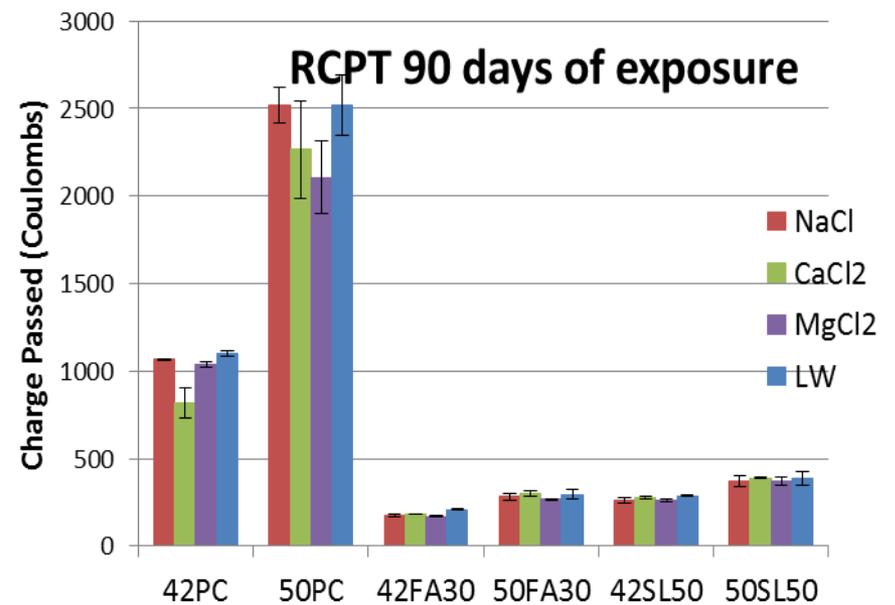
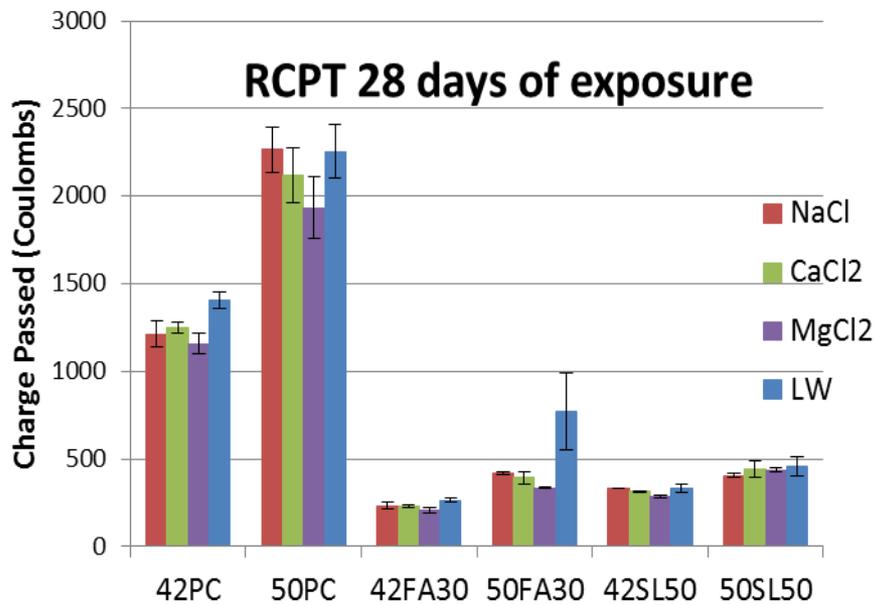
Objetivo:

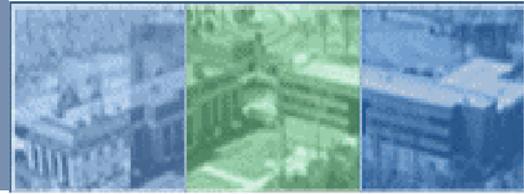
- Avaliar o efeito combinado de difusão e absorção sobre as propriedades de transporte de concretos expostos a sais de degelo (NaCl , CaCl_2 or MgCl_2) e água com cal;
- Avaliar se a absorção e a condutividade podem ser utilizados para estimar a difusão de cloretos destes concretos e ser usados nos modelos de vida útil residual.





Propriedades de Transporte em Presença de Sais



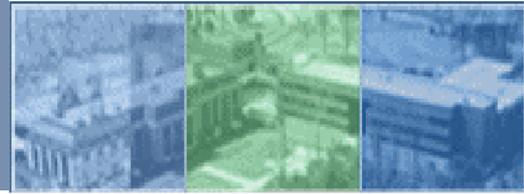


Propriedades de Transporte em Presença de Sais

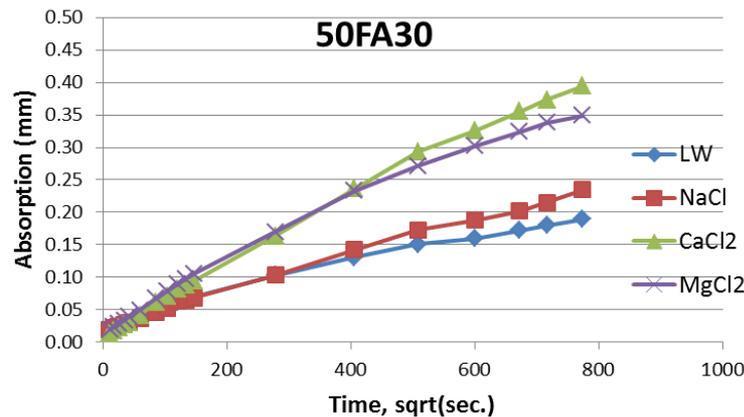
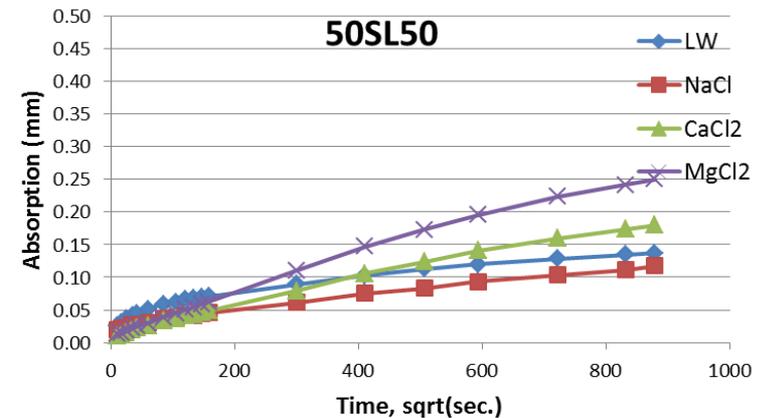
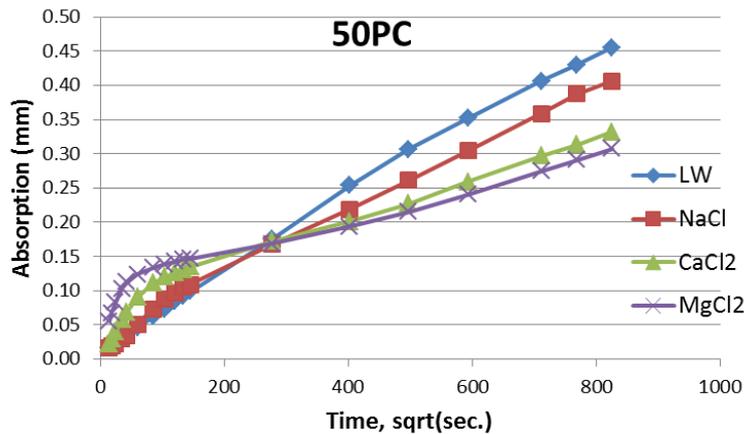
- Lixiviação de álcalis e hidróxido de cálcio
- Grau de saturação de cps
- Difusão de cloretos em função do grau de saturação
- Fixação de cloretos e obstrução de poros

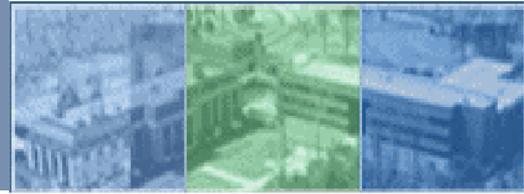
Mistura	Condutividade elétrica em S/cm
42PC	14.9
50PC	11.9
42FA30	17.9
50FA30	14.5
42SL50	7.7
50SI50	6.1

	Tensão superf. (10^{-6} N/mm) (a)	Viscosidade (cP) (b)	(a/b) ^{0.5}	Condutiv. (S/cm)
NaCl	77	1.2	8.0	18.8
CaCl ₂	80	1.5	7.3	16.7
MgCl ₂	73	1.8	6.4	12.9
Água	72	1.0	8.5	7.9

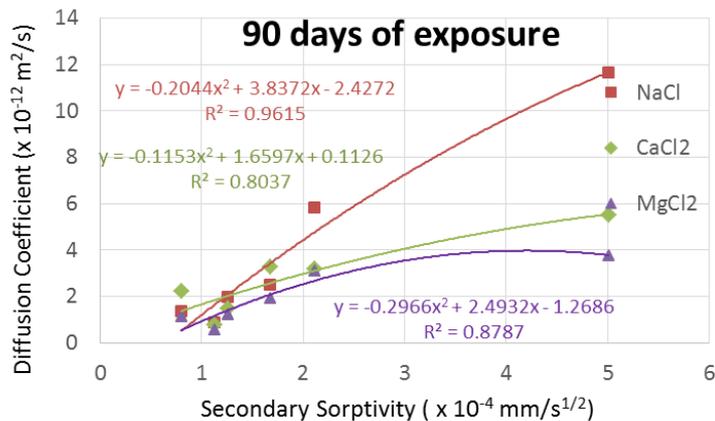
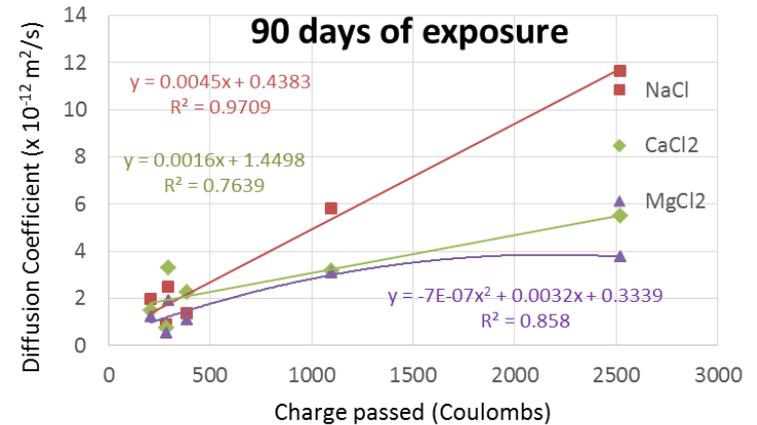
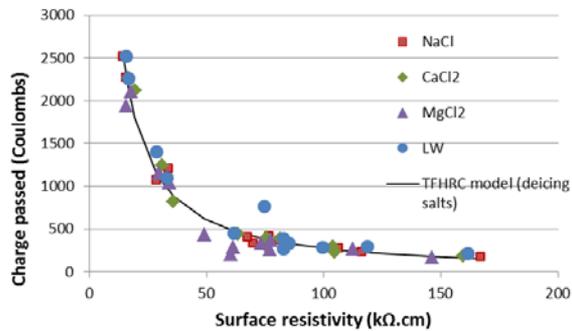


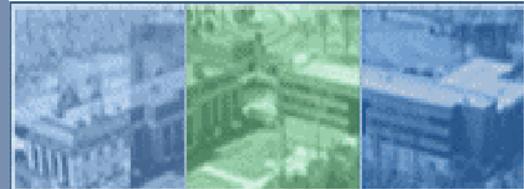
Propriedades de Transporte em Presença de Sais





Propriedades de Transporte em Presença de Sais



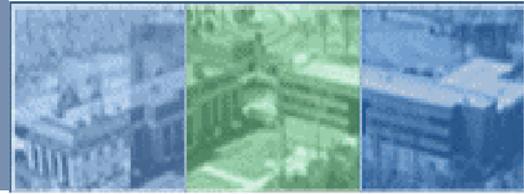


Propriedades de Transporte em Presença de Sais

Sumário

- A análise das propriedades de transporte é complexa e os resultados dos ensaios não podem ser interpretados sem o conhecimento da história de exposição;
- O efeito combinado de absorção e difusão teve um efeito diferente sobre as diversas propriedades de transporte;
- A taxa de absorção e difusão depende não só da mistura mas também dos cátions dos sais;
- A relação entre ensaios depende da história de exposição e portanto nenhum dos ensaios avaliados pode ser usado em substituição ao coeficiente de difusão.

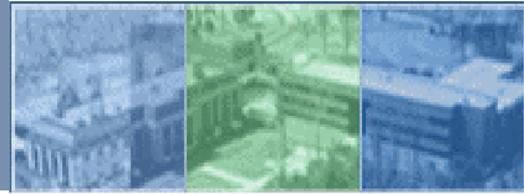




Outros projetos recentes ou em andamento

- Ensaio para reação álcali-agregado em colaboração com University of Alabama;
- Ensaio para reação álcali-agregado em colaboração com Clemson University;
- SuperAirMeter em colaboração com Oklahoma State University;
- Modificação do ensaio de resistência à tração na flexão e determinação da precisão para ASTM;
- Ensaio para determinação do coeficiente de expansão térmica e sua precisão para AASHTO.
- Influência das propriedades físicas e químicas dos agregados nas propriedades mecânicas dos concretos

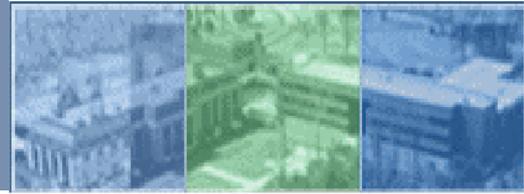




Futuro do Concreto Sustentável

Eventos para motivação de jovens ao estudo do concreto





Futuro do Concreto Sustentável

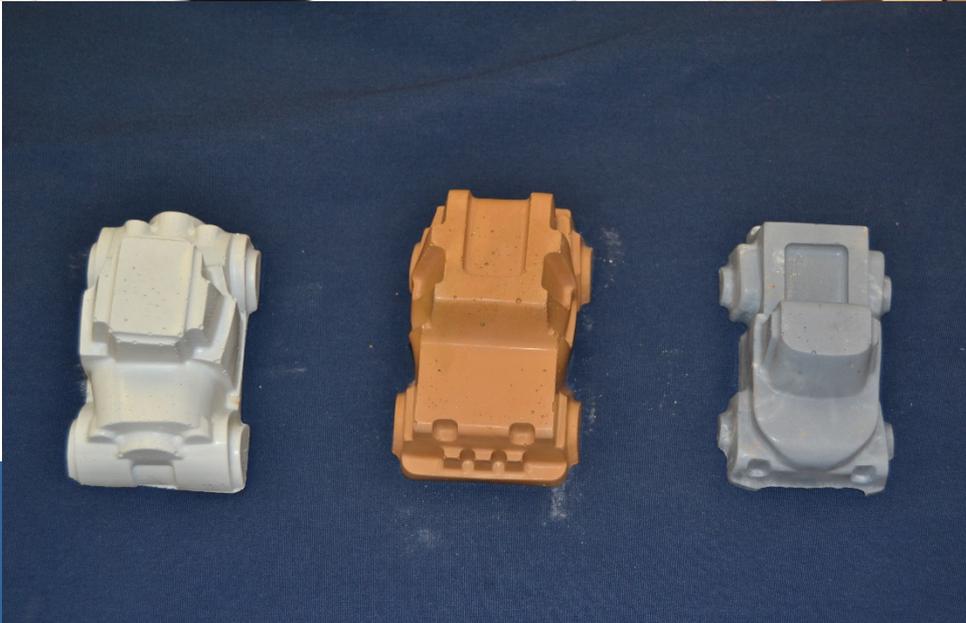
Eventos para motivação de jovens ao estudo do concreto

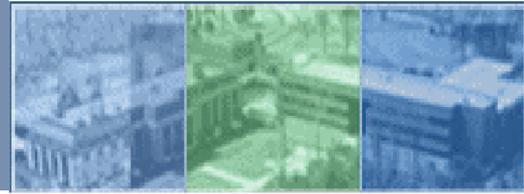


TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER



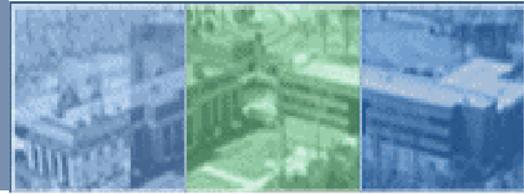
TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER





Infraestrutura sustentável de concreto: Será que já chegamos lá?





Agradecimentos



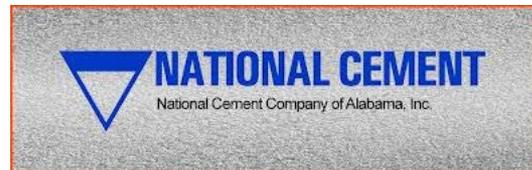
e

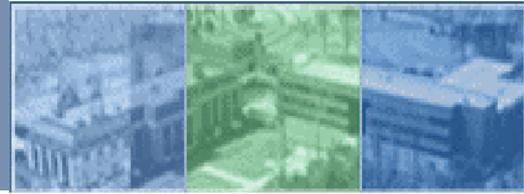


pela oportunidade

Colaboradores dos projetos apresentados: Ahmad Ardani e Ben Graybeal (FHWA), Dale Bentz (NIST), Haejin Kim e Jose Munõz (S&S),

Fornecedores de materiais:

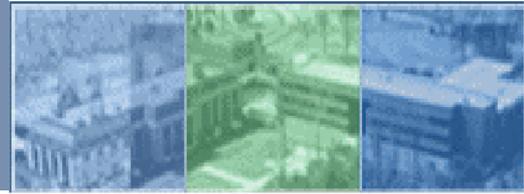




Agradecimentos

Professores e Orientadores





Para mais informações, visite:

- *American Concrete Institute* : www.concrete.org
- *FHWA* : www.fhwa.dot.gov
- *TFHRC* :

Ou contate Jussara Tanesi:

Jussara.tanesi.ctr@dot.gov



Concrete **Smart**Brief





Obrigada

