

SEMINÁRIO: INOVAÇÕES NA PAVIMENTAÇÃO URBANA - PERSPECTIVAS

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

PAVIMENTOS DE CONCRETO CONTINUAMENTE ARMADOS: UMA SOLUÇÃO DE ALTA DURABILIDADE PARA CORREDORES DE ÔNIBUS

Dr. Lucio Salles de Salles
Msc. Andréia Posser Carginin
Prof. Dr. José Tadeu Balbo

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
SAO PAULO, 25 DE ABRIL DE 2015

PREFEITURA DE SÃO PAULO
SERVIÇOS E OBRAS

USP

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

INTRODUÇÃO

- Corredores e faixas exclusivas de ônibus
- De 2012 para 2016
 - De 90 para mais de 500 km
- Aumento da velocidade (68%)
- Melhoras no transporte público
- Crise econômica
 - Diminuição de fundos para construção de novos corredores e reabilitação dos antigos

Fonte: Weather Santana (2012)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

USP

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

PROBLEMA

- Estado-da-arte de corredores e faixas de ônibus no Brasil
- Faixa exclusiva delimitada em pavimento existente
- Pavimento asfáltico (flexível) sofre com afundamentos
- Pavimento de concreto simples (PCS) sofrem com falhas construtivas nas juntas de contração
- Reabilitação de corredores e faixas de ônibus são muito prejudiciais ao tráfego

Fonte: G1 (2014)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

USP

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

PROBLEMA

- Estado-da-arte de corredores e faixas de ônibus no Brasil
- Faixa exclusiva delimitada em pavimento existente
- Pavimento asfáltico (flexível) sofre com afundamentos
 - Deformação permanente devido ao tráfego **canalizado** e **altas temperaturas**
- Pavimento de concreto simples (PCS) sofrem com falhas construtivas nas juntas de contração
- Reabilitação de corredores e faixas de ônibus são muito prejudiciais ao tráfego

Fonte: O Globo (2016)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

USP

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

PROBLEMA

- Estado-da-arte de corredores e faixas de ônibus no Brasil
- Faixa exclusiva delimitada em pavimento existente
- Pavimento asfáltico (flexível) sofre com afundamentos
 - Deformação permanente devido ao tráfego **canalizado** e **altas temperaturas**
- Pavimento de concreto simples (PCS) sofrem com falhas construtivas nas juntas de contração
 - Tempo e profundidade** de corte da junta; condições de **cura**
- Reabilitação de corredores e faixas de ônibus são muito prejudiciais ao tráfego

Fonte: Zero Hora (2015)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

USP

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

PROBLEMA

- Estado-da-arte de corredores e faixas de ônibus no Brasil
- Faixa exclusiva delimitada em pavimento existente
- Pavimento asfáltico (flexível) sofre com afundamentos
 - Deformação permanente devido ao tráfego **canalizado** e **altas temperaturas**
- Pavimento de concreto simples (PCS) sofrem com falhas construtivas nas juntas de contração
 - Tempo e profundidade** de corte da junta; condições de **cura**
- Reabilitação de corredores e faixas de ônibus são muito prejudiciais ao tráfego

Fonte: Zero Hora (2015)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

USP

SOLUÇÃO PROPOSTA

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

- Pavimentos **duráveis**, com baixa necessidade de **manutenção** e com maior facilidade **construtiva**
- Pavimento de Concreto Continuamente Armado (PCCA)
- Pavimento de Concreto sem juntas
- Não há controle e nem indução da fissuração
- Fissuração de retração ocorre de maneira livre



Fonte: IDTP (2012)

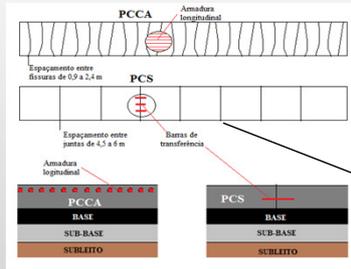


Fonte: Roseler (2005)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES **USF**

SOLUÇÃO PROPOSTA

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS



LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES **USF**

HISTÓRICO

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

- 1921: primeiro PCCA construído nos EUA, próximo a Washington D.C, com 60 m de extensão
- 1938: primeira pista experimental (Stilesville, Indiana)
 - 1947: Illinois e New Jersey
 - 1949: Califórnia
 - 1951: Texas
- 1958 – **127 km** de PCCA nos EUA
- 1971 – **16.000 km** de PCCA em uso ou sob contrato em 33 estados americanos
- 1990 – **mais de 48.000 km**

Crescimento exponencial



Ano	km de PCCA (total)
1959	182
1960	234
1961	445
1962	906
1963	1490
1964	2592
1965	3882
1966	4531
1967	6637

Fonte: Ross (2010)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES **USF**

HISTÓRICO

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

- Avaliações norte-americanas
 - Estrutura durável
 - Exemplos de durabilidade por mais de 50 anos.
- Dossey e Hudson (1994) – pavimentos executados entre 1974 e 1987: **primeira intervenção pesada após 20 anos de serviço**
- Tayabji *et al.* (1995): IRI de **0,84 m/km** e **2,48 m/km** (pavimentos com idade entre **0,3 e 22 anos**) – excelente qualidade de rolamento
- Gharaibeh *et al.* (1999): PCCA construídos entre 1977 e 1994 – todos os pavimentos avaliados suportam um **tráfego superior ao de projeto, e todos duraram mais do que a vida de projeto.**
- Won (2011): pavimentos com **33 anos de exposição ao tráfego – LTE superior a 90%**



LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES **USF**

HISTÓRICO

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

- Europa
- Canadá

Migração da tecnologia para outros países

▪ Bélgica

- primeiro PCCA – 1950
- 1970 - extenso programa de construção de rodovias em PCCA
- Extensão malha rodoviária belga: 1650 km
- 650 km de rodovias em PCCA

▪ Holanda

- 113.000 km de rodovias
- 2.300 (2%) autoestradas que suportam cerca de 38% do volume de tráfego total
- 5% da autoestradas são em pavimentos de concreto
- Metade em PCS e metade em PCCA

▪ Canadá

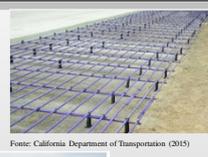
- 1958 – Calgary (Alberta) – diversas seções de PCCA – rodovia de 2,9 km
- Pavimentos sujeitos a intensa variação térmica: 36°C verão e -30°C inverno
- Anos 2000 – Quebec – seção com 2 km de extensão

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES **USF**

CARACTERÍSTICAS

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

- Fissuras aleatórias
- Controle fissuração → taxa de armadura longitudinal
- **Armadura sem função estrutural** → acima da linha neutra da placa
- Fissuras fortemente apertadas → LTE
 - Intertravamento dos agregados



Fonte: California Department of Transportation (2015)



Fonte: Houben *et al.* (2015)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES **USF**

CARACTERÍSTICAS

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Influência temperatura**
 - Concreto: **baixa condutividade e difusibilidade térmica**
 - Taxa de **evolução de calor na hidratação** é maior do que a taxa de dissipação para a atmosfera
 - Tensões internas no concreto

Possíveis problemas de concretagem em clima frio

Fonte: Schindler e McCullough (2002)

Fonte: Schindler e McCullough (2002)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

CARACTERÍSTICAS

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Padrão de fissuração**
 - Primeiras fissuras de **3 a 7 dias** após construção
 - Estabilização em **2 ou 3 meses**
- AASHTO (2008)**
 - Espaçamento entre **0,90 m e 1,80 m**
 - Fissuras aglomeradas → tensão elevada no topo
 - Grandes espaçamentos → LTE prejudicada
 - Principal indicador de desempenho até 1990

Verão

Inverno

Fonte: McCullough e Dossy (1999)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

CARACTERÍSTICAS

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Padrão de fissuração**
 - Influência da taxa de armadura longitudinal
 - Maiores taxas de armadura → menor espaçamento médio e menor abertura de fissuras**

Perzentuais recomendados

- 0,7% a 1%

Feito do diâmetro

Fonte: McCullough e Dossy (1999)

Fonte: Gharaebeh et al. (1999)

Profundidade da armadura

- Cobertura mínima de 76 mm

Maior zona de perda de aderência aço-concreto

Melhor desempenho

Menor espaçamento e maiores aberturas

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ASPECTOS DE PROJETO

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Modificações projetos na Bélgica**
 - De 1970 a 1977 → **0,85%**, base CA (60 mm) e sub-base em CCR, prof. = 60 mm → **e = 0,4 a 0,6 m**
 - De 1977 a 1990 → **0,67%**, sem CA, prof. = 90 mm → **e = 1,4 a 2,4 m**
 - A partir de 1990 → **0,75%** reintrodução CA
 - A abertura passou a ser o principal fator de controle
- LTE e infiltração de água**
 - w < 1 mm – infiltração - inicialmente
 - w < 0,63 mm (0°C) – USA
 - w < 0,5 mm (0°C) – Europa

Fonte: Kühr e Roesler (2005)

Menor variação de abertura para maiores percentuais de armadura longitudinal

Primeiro PCCA experimental em Illinois (1947)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ASPECTOS DE PROJETO

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Punchout**
 - Mecanismo de ocorrência
 - Fissuras muito próximas (**espaçamento < 0,6 m**)
 - Perda de LTE → intertravamento dos agregados – abertura excessiva
 - Perda de suporte → erosão base
 - Tensões de tração elevadas (topo)
 - Fissura longitudinal de fadiga** – entre 1 m e 1,2 m da borda do pavimento → concentração de tensões máximas

Principal indicador de desempenho

Fonte: Sobczak et al. (2004)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ASPECTOS DE PROJETO

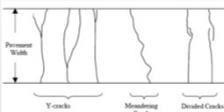
Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Base do pavimento**
- Potencial de **erosão**
- Preferência por bases **estabilizadas**
- Base de concreto asfáltico

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ASPECTOS CONSTRUTIVOS

- Cura
- Padrão de fissuração
- Evitar **fissuras problema**: Y, serpenteadas, divididas e com espaçamento pequeno
- Construção a noite
- Construção nos meses mais frios



Fonte: Kollar e Rosler, 2004

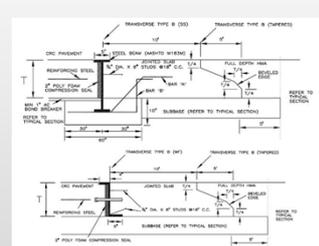


Fonte: Johnson e Saurán, 2008

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ASPECTOS CONSTRUTIVOS

- Juntas no PCCA
- Juntas Construtivas
- Juntas de Transição
- Juntas Longitudinais



Fonte: CRCP Design Guide (2017)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PISTAS EXPERIMENTAIS

- Seções de curta extensão
- 50 m – simulação de paradas e terminais de ônibus
- **Áreas críticas**: aceleração, desaceleração e veículo parado



	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Seção 4
Placa de Concreto (mm)	240	240	240	240
Base Asfáltica (mm)	60	60	60	60
Sub-Base Macadame Seco (mm)	300	300	300	300
Armadura Longitudinal (%)	0.57	0.44	0.77	0.67

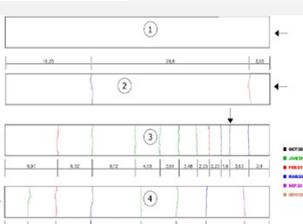
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PISTAS EXPERIMENTAIS



LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PISTAS EXPERIMENTAIS



- Abertura ao tráfego em Setembro de 2010
- Primeira fissura em Outubro de 2011
- Mais fissuras nas placas??
 - Efeito da falta de ancoragem (transição)
 - Pequena extensão
 - Base asfáltica

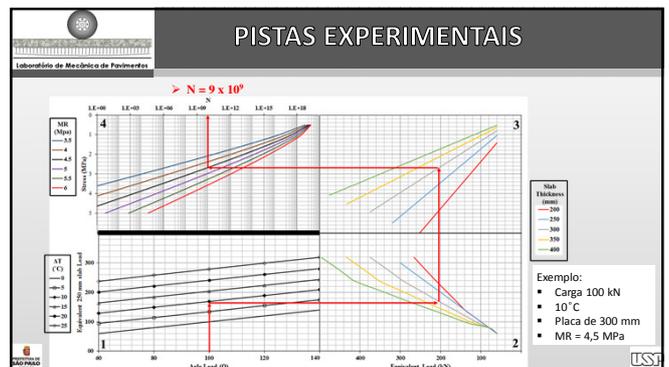
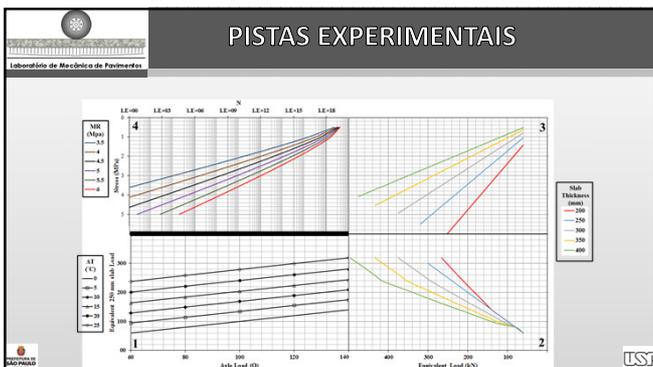
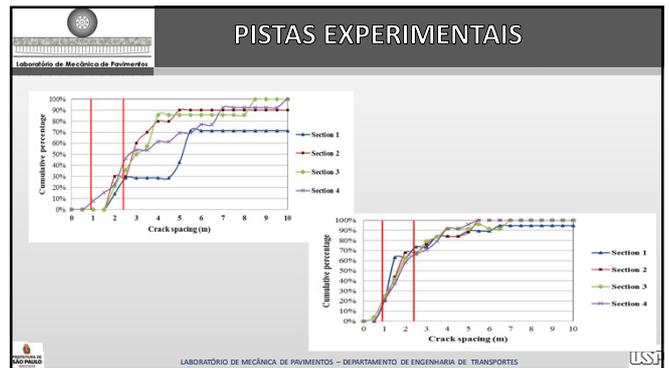
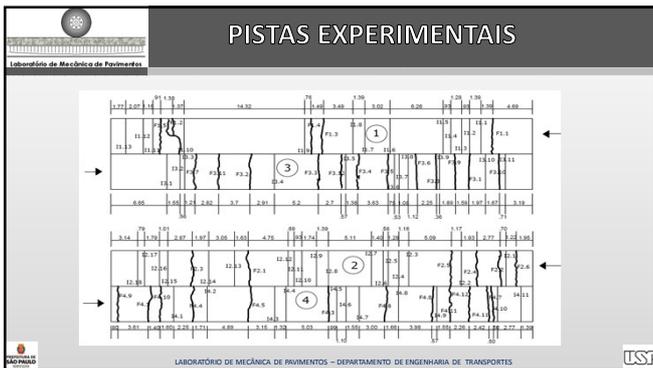
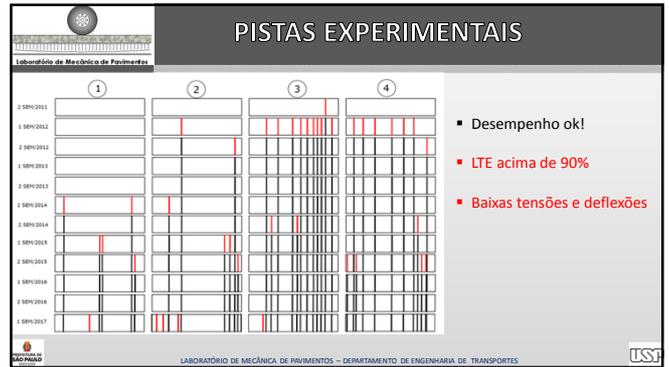
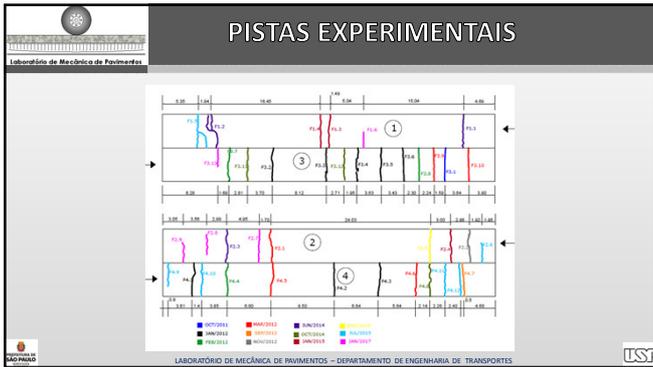
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PISTAS EXPERIMENTAIS



- Abertura ao tráfego em Setembro de 2010
- Primeira fissura em Outubro de 2011
- Mais fissuras nas placas??
 - Efeito da falta de ancoragem (transição)
 - Pequena extensão
 - Base asfáltica

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PAVIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES



PISTAS EXPERIMENTAIS

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Recomendações de projeto para o PCCA de curta extensão
- Para projetos com tempo de serviço **acima de 20 anos**
- Mínima espessura de placa de **250 mm**
- Bases **asfálticas**
- Taxa de armadura entre **0,7 e 0,8%**
- Profundidade da armadura entre **100 e 76 mm** do topo da placa
- Juntas de **transição** nas extremidades das placas

USF

PISTAS EXPERIMENTAIS

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Seção de longa extensão**
- 200 m de extensão
- Aço comum e galvanizado
 - Taxa de armadura longitudinal – 0,7%
- Resistência à tração na flexão
 - 4,5 MPa aos 28 dias
- Quatro tipos de concreto



Material	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Consumo de Cimento (kg/m³)	418	390	402	375
Área Média (kg/m³)	377	385	478	485
Área de Brita (kg/m³)	259	265	316	322
Agregado Reciclado (kg/m³)	225	225	450	450
Brita 0 (kg/m³)	820	820	676	676
Água (kg/m³)	182	182	175	175
Relação a/f (kg/m³)	2,824	2,845	2,723	2,862
Relação a/f (kg/m³)	0,44	0,47	0,44	0,47

USF

PISTAS EXPERIMENTAIS

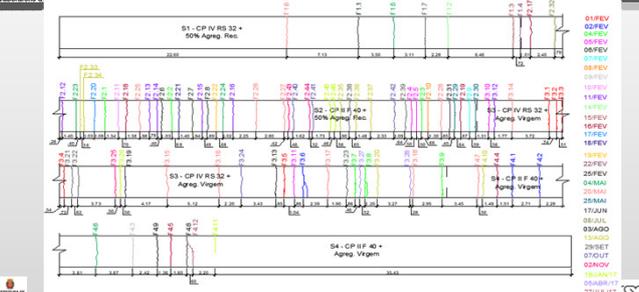
Laboratório de Mecânica de Pavimentos



USF

PISTAS EXPERIMENTAIS

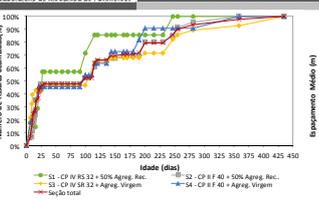
Laboratório de Mecânica de Pavimentos

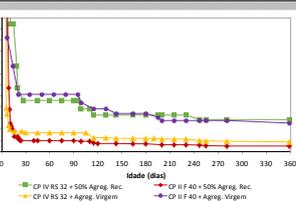


USF

PISTAS EXPERIMENTAIS

Laboratório de Mecânica de Pavimentos





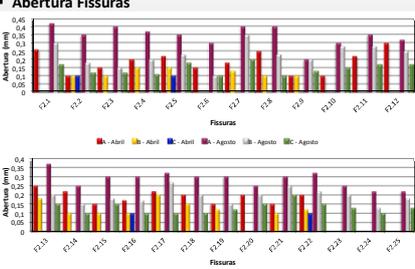
- Maior número fissuras → S2 e S3 → espaçamento médio 1,0 e 1,75 m
- Efeito tipo de cimento e agregado
- CP II F 40 → 6 a 10% filler calcário
- CP IV RS 32 → 15 a 50% de material pozolânico

USF

PISTAS EXPERIMENTAIS

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

- Abertura Fissuras**



- Dois levantamentos
 - Abril (2016) → 0,1 mm a 0,30 mm
 - Agosto (2016) → 0,1 mm a 0,45 mm
- Diferenças aço comum e galvanizado
- Comportamento químico interface aço concreto



USF

