



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL


## Étude de l'influence des additions minérales sur la RSI

**António SANTOS SILVA**

Départ. des Matériaux du LNEC, Portugal

Journée de clôture de l'opération de recherche  
Prévention, modélisation et réparation des ouvrages  
atteints de réaction sulfatique interne

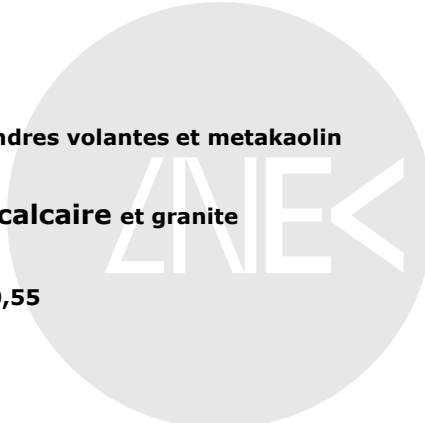
© LNEC 2006



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

**Étude expérimentale – 1<sup>ère</sup> campagne 2003**

- ✓ Étudier l'influence sur la RSI :
  - ✓ des additions minérales : cendres volantes et metakaolin
  - ✓ de la nature des granulats - calcaire et granite
  - ✓ du rapport **E/C - 0,45** et **0,55**



Étude expérimentale – 1<sup>ère</sup> campagne 2003



Sélection des matériaux

- ✓ Le ciment
  - ✓ CEM I 42,5 R ( 8,3% de  $C_3A$ , 2,69% de  $SO_3$  et 1,25% de  $Na_2O_{eq}$ )
- ✓ Le sable (calcaire)
- ✓ Les gravillons - 3 classes granulaires : 4,75-9,5 mm, 9,5-12 mm et 12-19 mm
  - ✓ calcaire
  - ✓ granite
- ✓ Les additions minérales
  - ✓ cendres volantes : nature silico-alumineuse
  - ✓ métakaolin : kaolin d'origine portugaise calciné à 700° C

Étude expérimentale – 1<sup>ère</sup> campagne 2003



Formulation

méthode RILEM AAR-3 pour la Réaction Alkali-Silice

Composition des bétons (% volume)

14% ciment (440 kg/m<sup>3</sup>)

20% eau

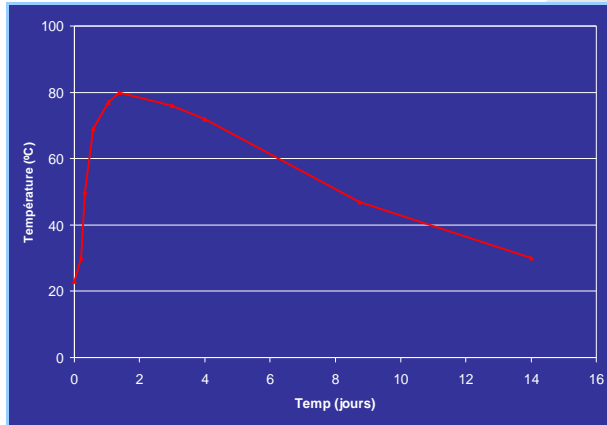
46% gravillon

20% sable

Étude expérimentale – 1<sup>ère</sup> campagne 2003



Fabrication et traitement thermique des bétons



Traitement thermique simulant l'échauffement ayant existé au sein d'une pièce massive en béton (longueur = 14 m, largeur = 3,5 m et hauteur = 1,5 m) à base de CEM I coulée en place avec une température extérieure moyenne de 23°C. Le cycle été calculé par le programme de calcul CESAR-LCPC, module Texo.

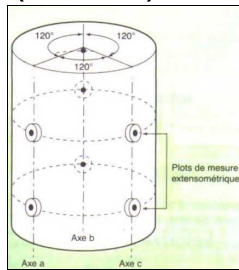
- ✓ Conservation 24h dans une chambre saturée en humidité et à 20°C suivie d'une immersion définitive dans l'eau

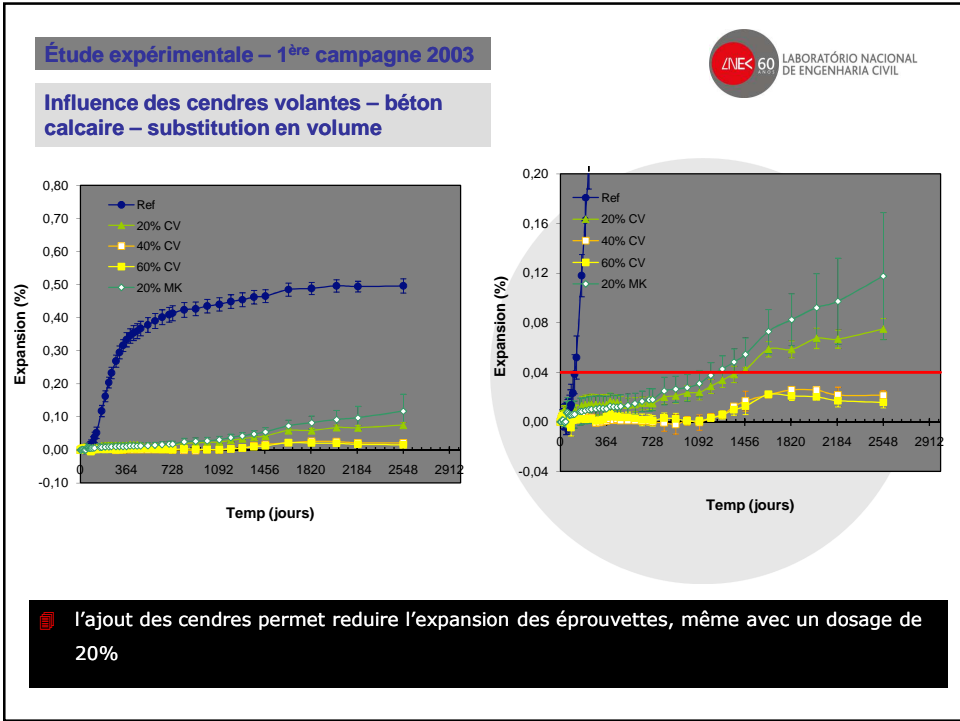
Étude expérimentale – 1<sup>ère</sup> campagne 2003



Essai de performance (LPC n° 66)

- ✓ Éprouvettes cylindriques (11 x 22 cm)





**Étude expérimentale – 2<sup>ème</sup> campagne 2006**

**Matériaux**

- Ciment CEM I 42,5R (6,4% de C<sub>3</sub>A, 3,11% de SO<sub>3</sub> et Na<sub>2</sub>O<sub>eq.</sub> 1,25%)
- Granulats PALVADEAU (siliceux)
- Compositions (substitution en masse (%))

Référence	Cendres volantes	Métakaolin	Filler calcaire	Laitier	Fumées de silice	Boues des mines de W	Cendres Biomasse
BÉTON SANS ADDITIONS	10 %	5 %	10 %	10 %	5 %	30%	30%
	15 %	10 %	15 %	15 %	10 %		
	20 %	15 %	20 %	20 %			
	30 %	20%	30 %	40 %			

## Caractérisation chimique

<b>Analyse Chimique (%)</b>							
	<b>CV</b>	<b>MK</b>	<b>ES</b>	<b>SF</b>	<b>FC</b>	<b>LW</b>	<b>CB</b>
SiO <sub>2</sub>	53,22	54,66	38,09	96,9	0,09	60,78	31,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,20	37,98	9,38	0,52	0,04	18,26	8,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,85	1,22	0,89	0,14	0,06	9,46	3,0
CaO	5,36	0,01	36,24	0,58	55,66	0,61	24,0
MgO	1,63	0,46	7,40	0,00	0,10	2,16	4,8
SO <sub>3</sub>	1,00	0,01	0,27	0,13	0,02	-	-
K <sub>2</sub> O	1,42	3,09	0,52	0,42	0,04	3,93	2,7
Na <sub>2</sub> O	0,44	0,00	0,25	0,04	0,02	0,46	6,6
Na <sub>2</sub> Oeq.	1,37	2,03	0,59	0,32	0,05	3,04	8,38
PR	5,16	0,94	2,66	5,56	43,23	3,12	13,5

### Étude expérimentale – 2<sup>ème</sup> campagne 2006

#### Fabrication des bétons

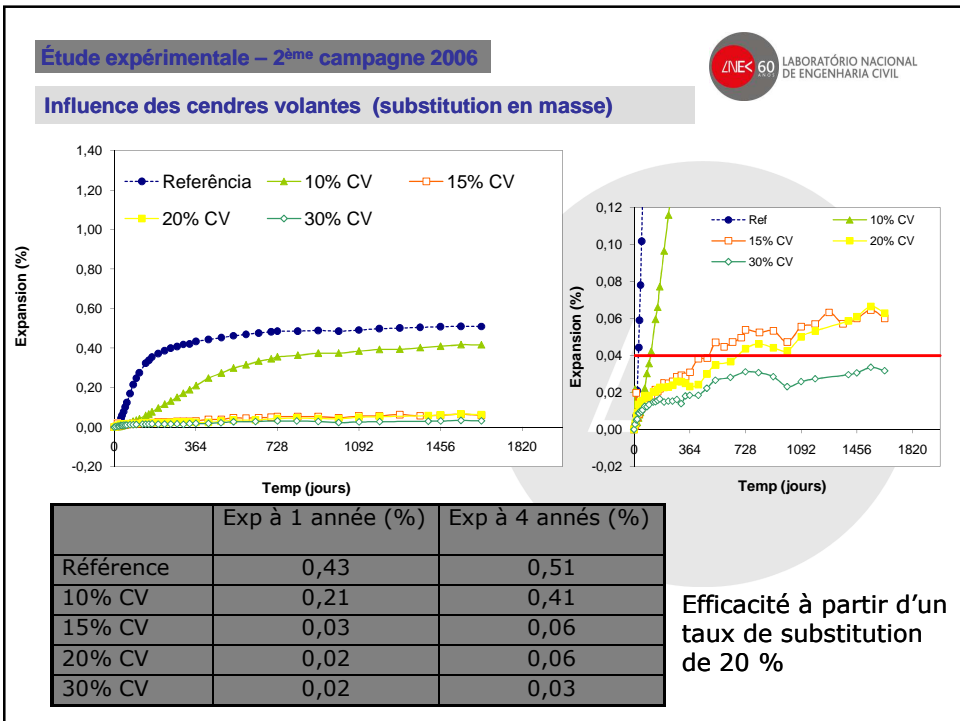
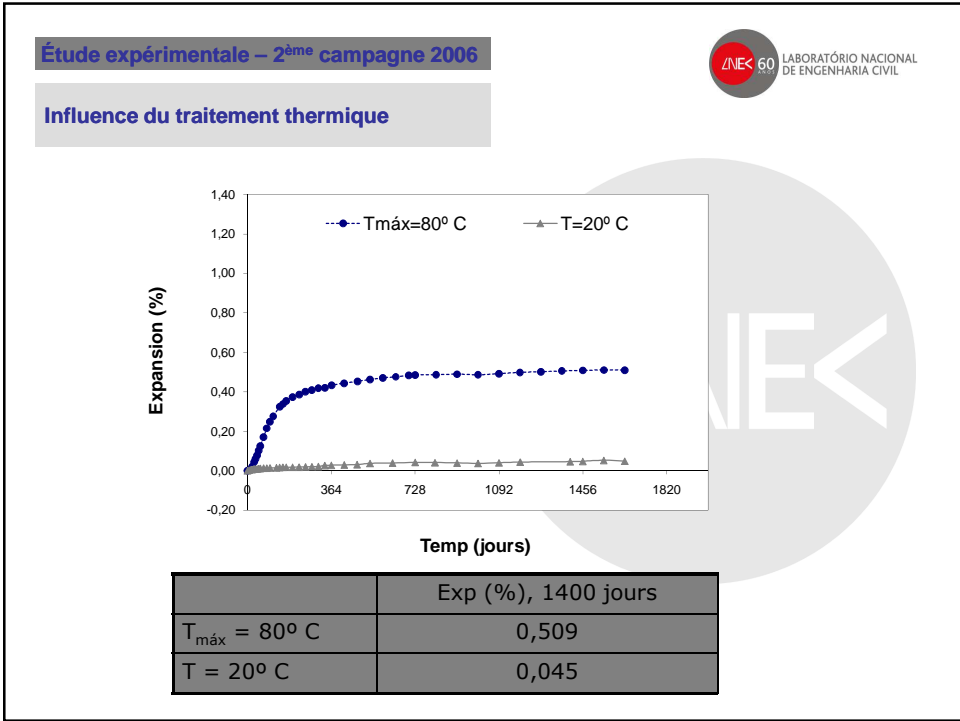
#### Traitement thermique

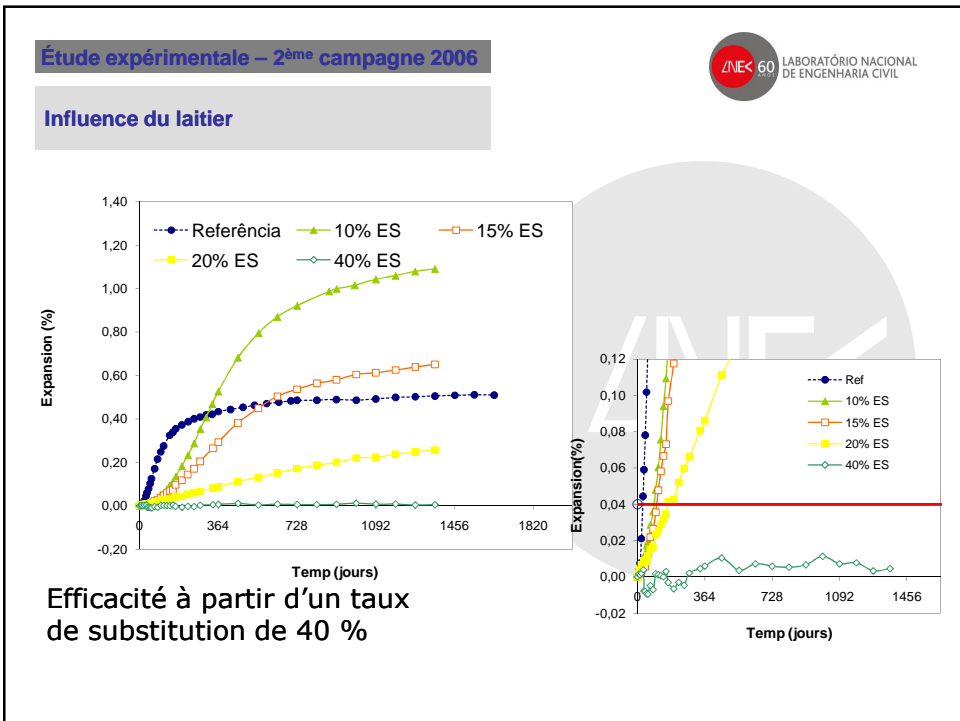
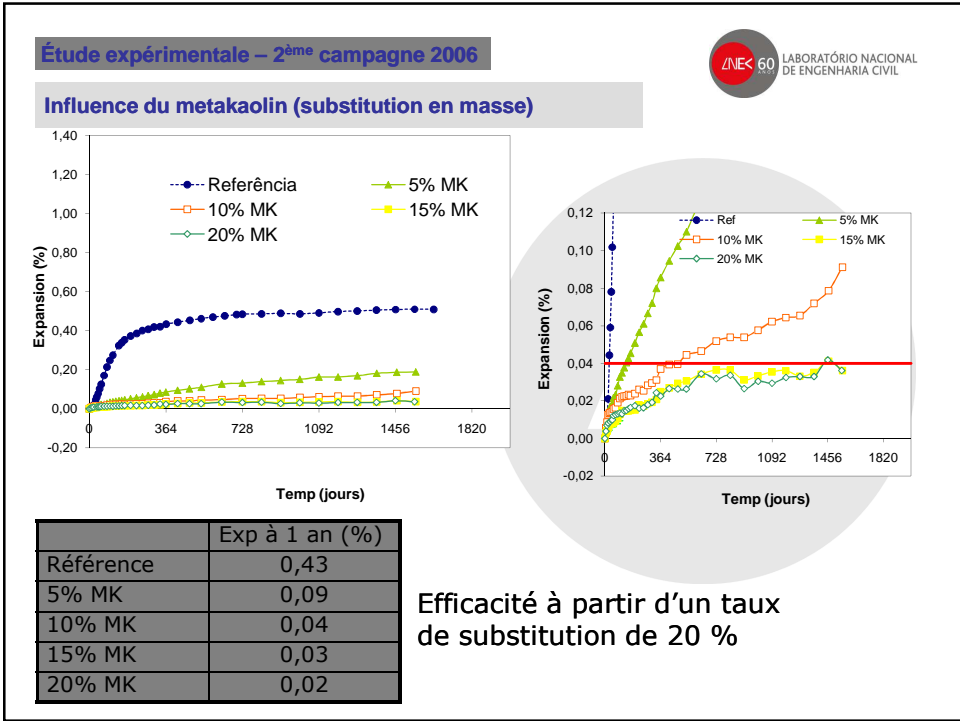
#### Cycles de séchage et humidification (méthode LPC n° 66)

#### Conservation des éprouvettes en eau à 20° C et avec un rapport eau/béton < 1,5

#### Méthodes de suivi

- Expansion
- Résistance en compression
- Module d'élasticité
- Microscopie optique
- Microscopie électronique à balayage
- DRX
- ATG/ATD
- Alcalins (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)

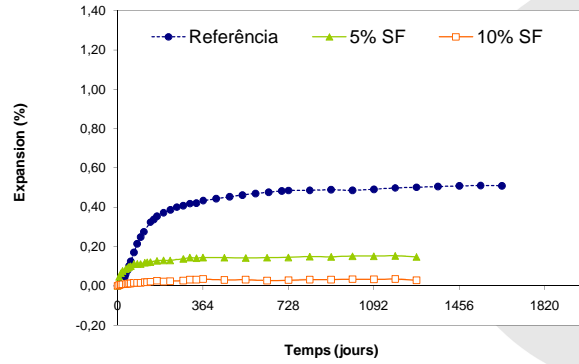




Étude expérimentale – 2<sup>ème</sup> campagne 2006



Influence du fume de silice (substitution en masse)

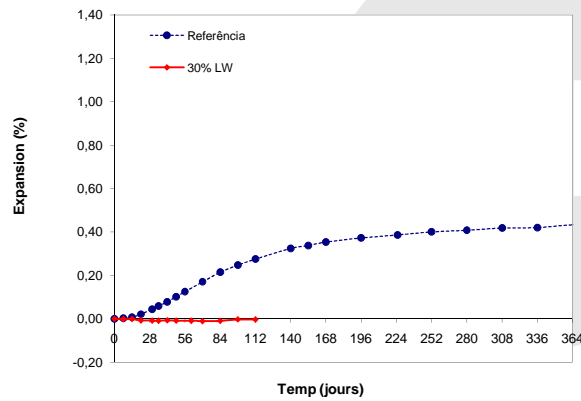


Efficacité à partir d'un taux de substitution de 10 %

Étude expérimentale – 2<sup>ème</sup> campagne 2006



Influence des boues des mines de W (substitution en masse)

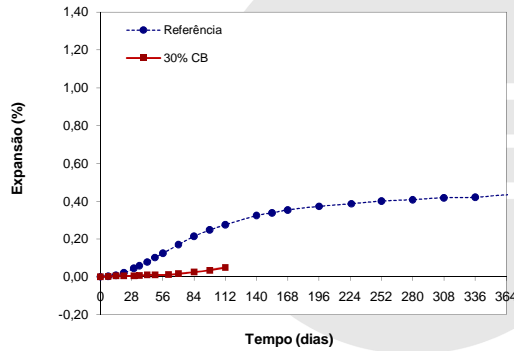




Étude expérimentale – 2<sup>ème</sup> campagne 2006



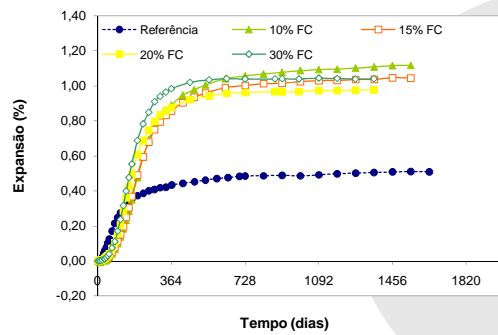
Influence des cendres de biomasse (substitution en masse)



Étude expérimentale – 2<sup>ème</sup> campagne 2006



Influence du filler calcaire (substitution en masse)



- Aucun effet inhibiteur
- Expansion plus importante à long terme (x 2)

## CONCLUSIONS



- **L'efficacité des additions minérales dépend :**
  - de la nature des additions
  - du taux de substitution au ciment
  - de la composition du ciment ( $SO_3$ ,  $C_3A$ )
- **Efficacité des additions à caractère hydraulique latent ou pouzzolanique**
  - pour un ciment : 3,1 % de  $SO_3$  et 6,4 % de  $C_3A$ 
    - cendres volantes : > 20 % (long terme >?)
    - métakaolin : > 10 % (long terme >?)
    - laitier : > 40 %
    - fumées de silice : > 10 %

## CONCLUSIONS



- **L'utilisation de ces additions est doublement bénéfique**
  - diminution de la chaleur d'hydratation
- **Inefficacité des additions quasiment inertes**
  - **fillers calcaires :**
    - augmentation de l'amplitude du gonflement à long terme (effet physique ?)

### Remerciements:

∞ LNEC

∞ FCT: Projecto EXREACT (PTDC/CTM/65243/2006)

∞ Programa Operacional Espaço Atlântico 2007-2013 – FEDER: Projecto DURATINET