



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

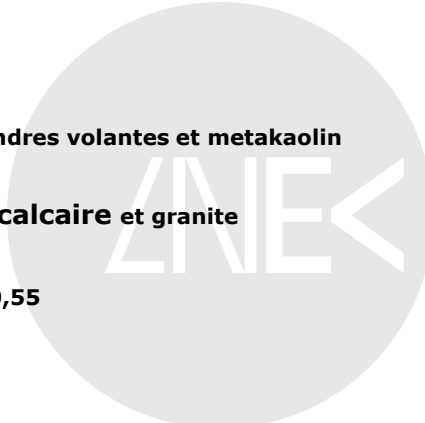
© LNEC 2006



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Étude expérimentale – 1^{ère} 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^{ère} 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^{ère} campagne 2003



Formulation

méthode RILEM AAR-3 pour la Réaction Alkali-Silice

Composition des bétons (% volume)

14% ciment (440 kg/m³)

20% eau

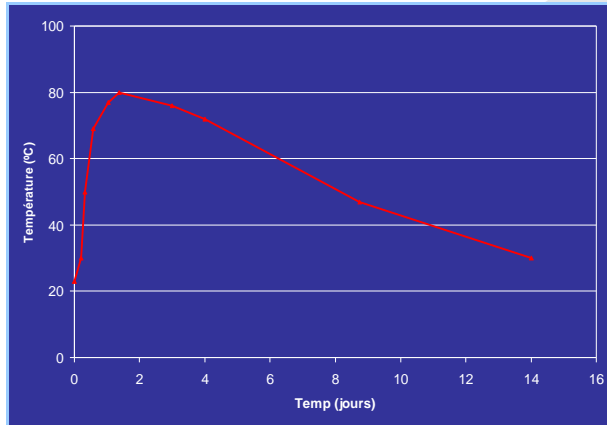
46% gravillon

20% sable

Étude expérimentale – 1^{ère} 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.

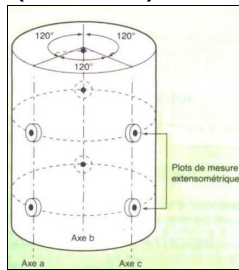
- ✓ Conservation 24h dans une chambre saturée en humidité et à 20°C suivie d'une immersion définitive dans l'eau

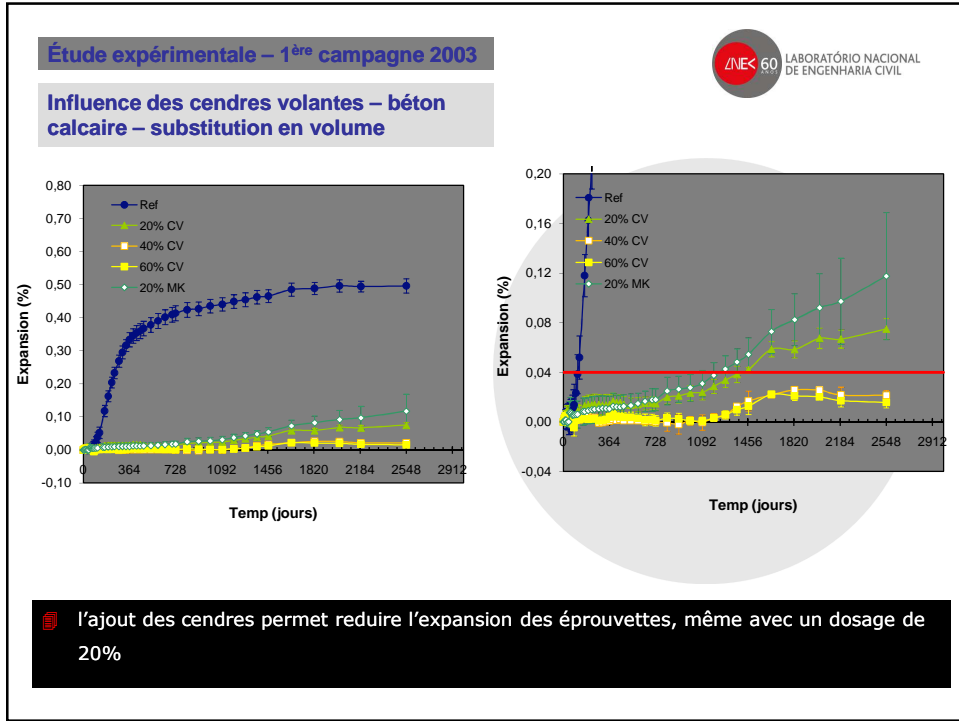
Étude expérimentale – 1^{ère} campagne 2003



Essai de performance (LPC n° 66)

- ✓ Éprouvettes cylindriques (11 x 22 cm)





Étude expérimentale – 2^{ème} campagne 2006

Matériaux

- Ciment CEM I 42,5R (6,4% de C₃A, 3,11% de SO₃ et Na₂O_{eq.} 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

Analyse Chimique (%)							
	CV	MK	ES	SF	FC	LW	CB
SiO ₂	53,22	54,66	38,09	96,9	0,09	60,78	31,0
Al ₂ O ₃	23,20	37,98	9,38	0,52	0,04	18,26	8,5
Fe ₂ O ₃	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 ₃	1,00	0,01	0,27	0,13	0,02	-	-
K ₂ O	1,42	3,09	0,52	0,42	0,04	3,93	2,7
Na ₂ O	0,44	0,00	0,25	0,04	0,02	0,46	6,6
Na ₂ 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^{ème} campagne 2006

Fabrication des bétons

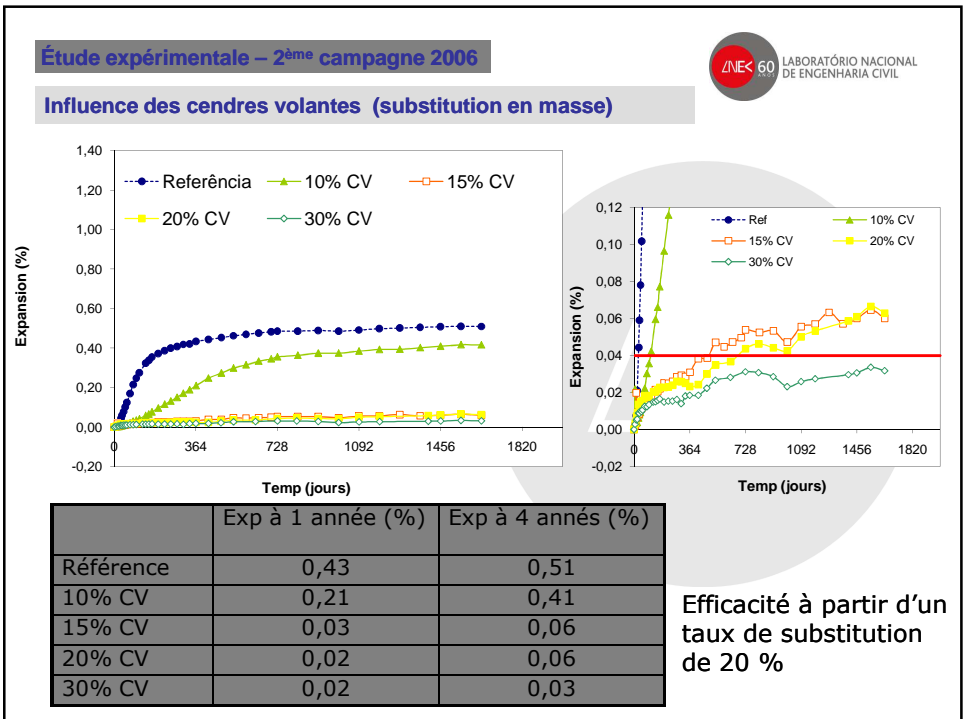
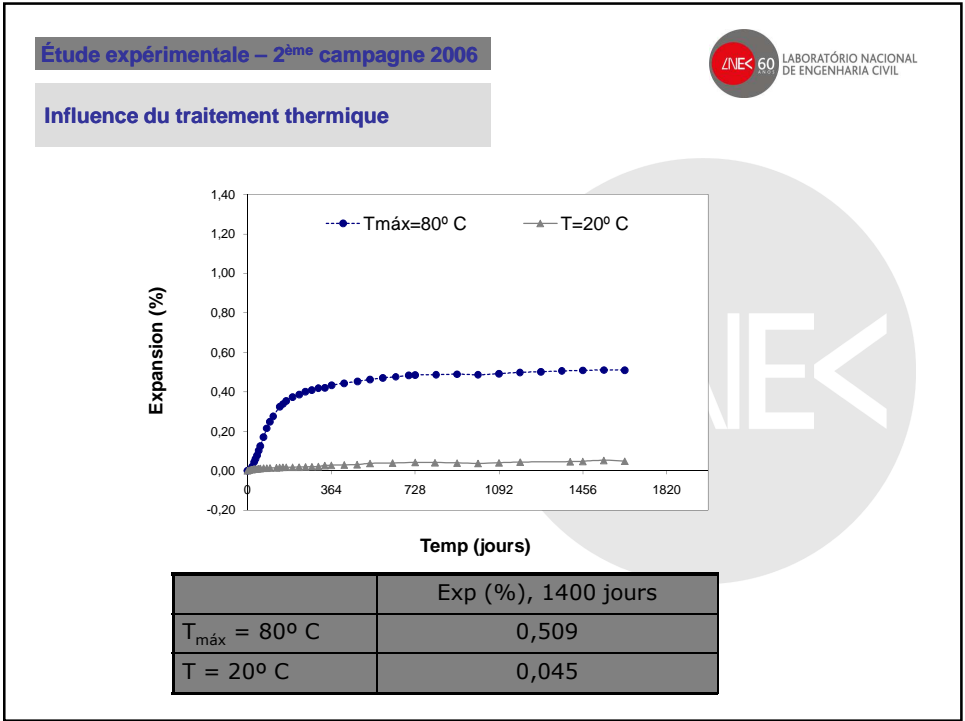
Traitement thermique

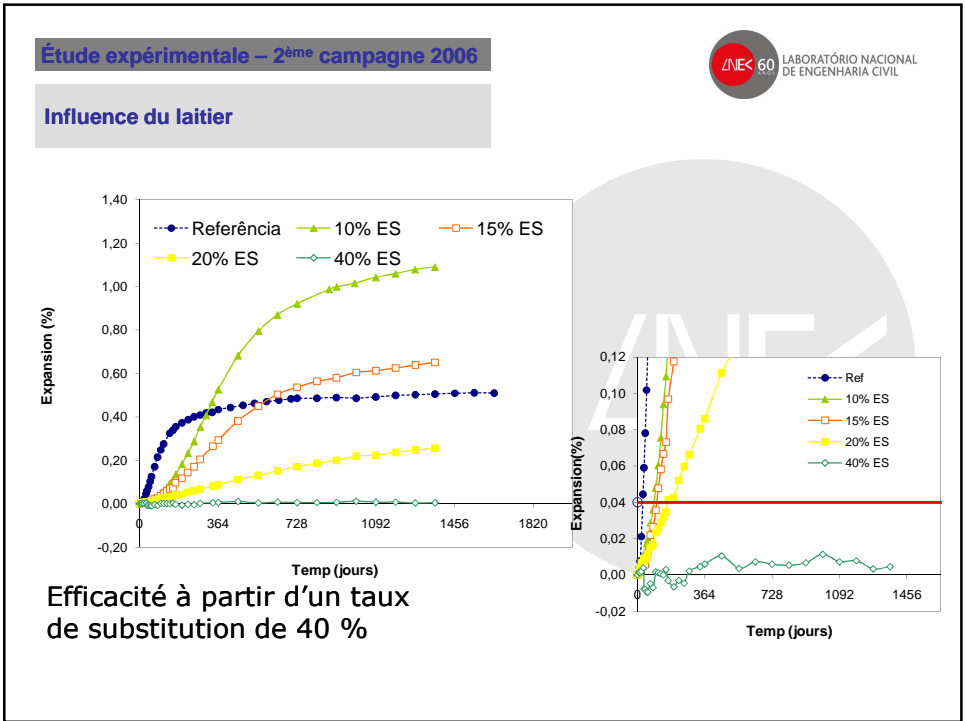
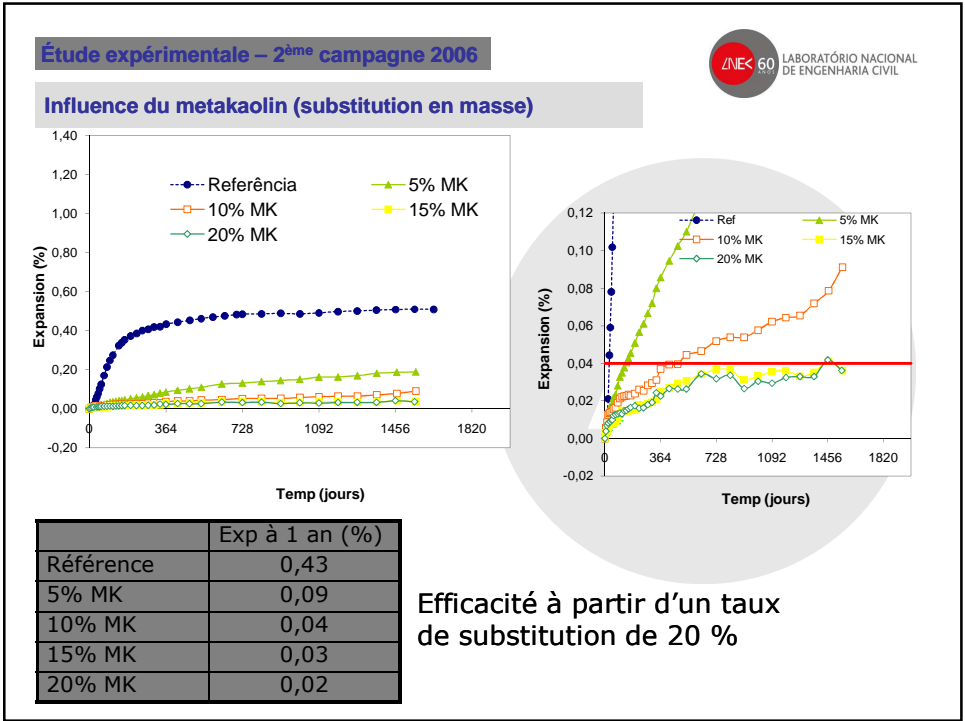
Cycles de séchage et humidification (méthode LPC n° 66)

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⁺, K⁺)

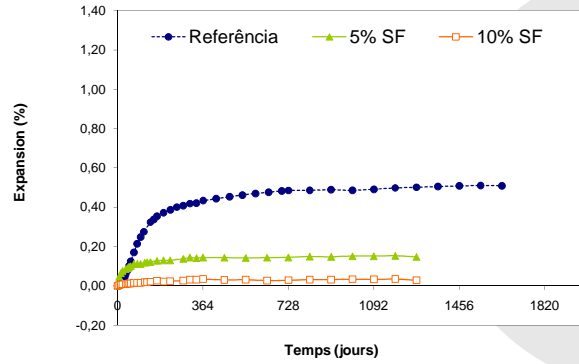




Étude expérimentale – 2^{ème} campagne 2006



Influence du fume de silice (substitution en masse)

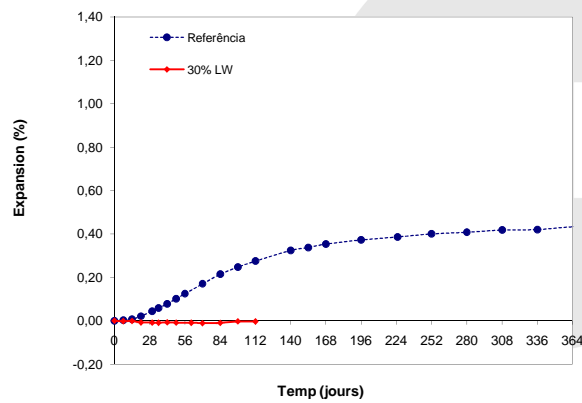


Efficacité à partir d'un taux de substitution de 10 %

Étude expérimentale – 2^{ème} campagne 2006



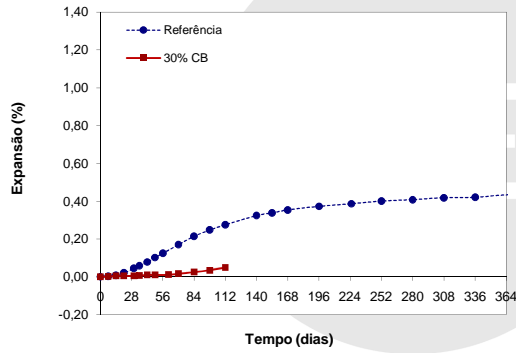
Influence des boues des mines de W (substitution en masse)



Étude expérimentale – 2^{ème} campagne 2006



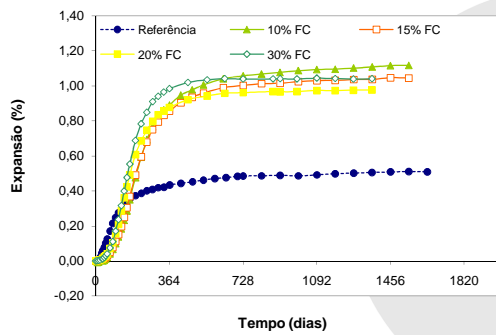
Influence des cendres de biomasse (substitution en masse)



Étude expérimentale – 2^{ème} 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