

**VIII Seminário
“Desenvolvimento
Sustentável e a Reciclagem
na Construção Civil”**



**CT-MAB MEIO
AMBIENTE**

**Concreto estrutural com teores muito
elevados de adições minerais: um estudo
de durabilidade**

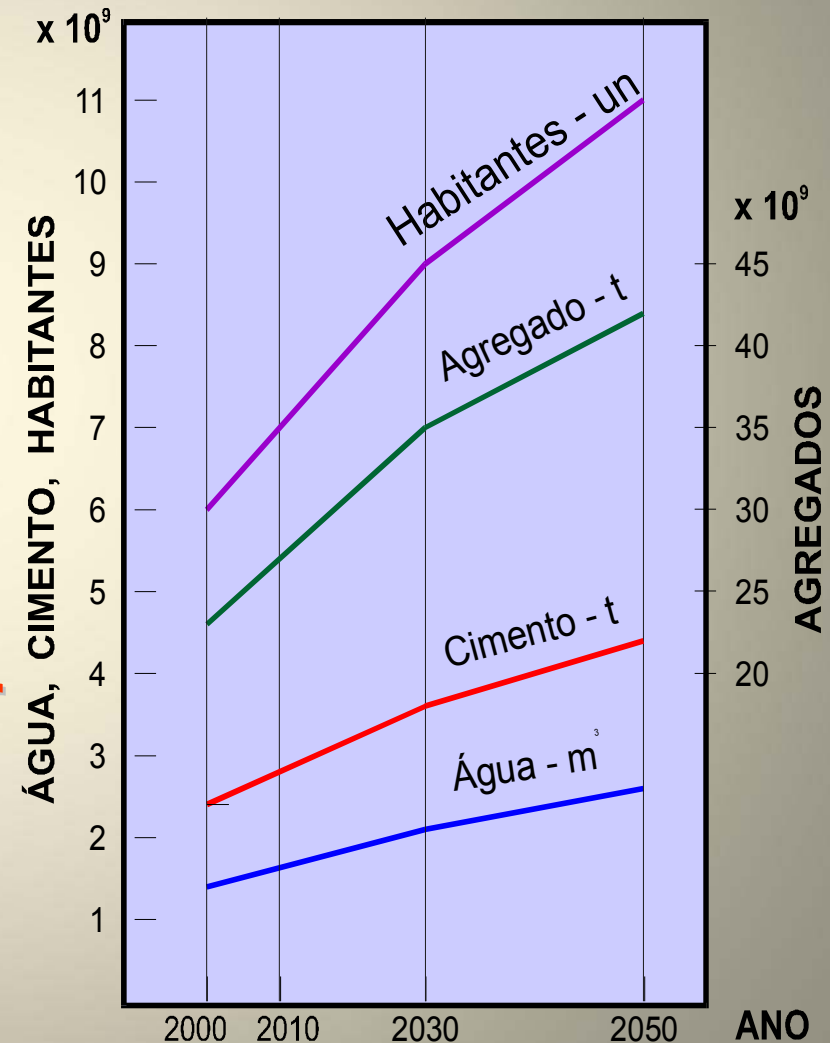
Geraldo C. Isaia

CONSUMO DE MATERIAIS DO CONCRETO

**Consumo per capita:
1 t / hab. / ano**

**Fabricação do cimento:
1 t de CO₂ / t
(1,5 bilhões t / ano)**

**Cimento é responsável por
7 % da emissão de CO₂
na atmosfera**



ADIÇÕES MINERAIS

Impacto ambiental: poluição terrestre, aérea e de aquíferos.

Produção anual atual:

- Cinza volante: 600 milhões de ton.
- Escória: 300 milhões de ton.
- Cinza de casca de arroz: 20 milhões de ton.
- Sílica ativa: 2 milhões de ton.

**Papel dialético das adições minerais:
de resíduo poluidor a produto cimentício para
aumentar o desempenho do concreto**

CAD COM ADIÇÕES MINERAIS

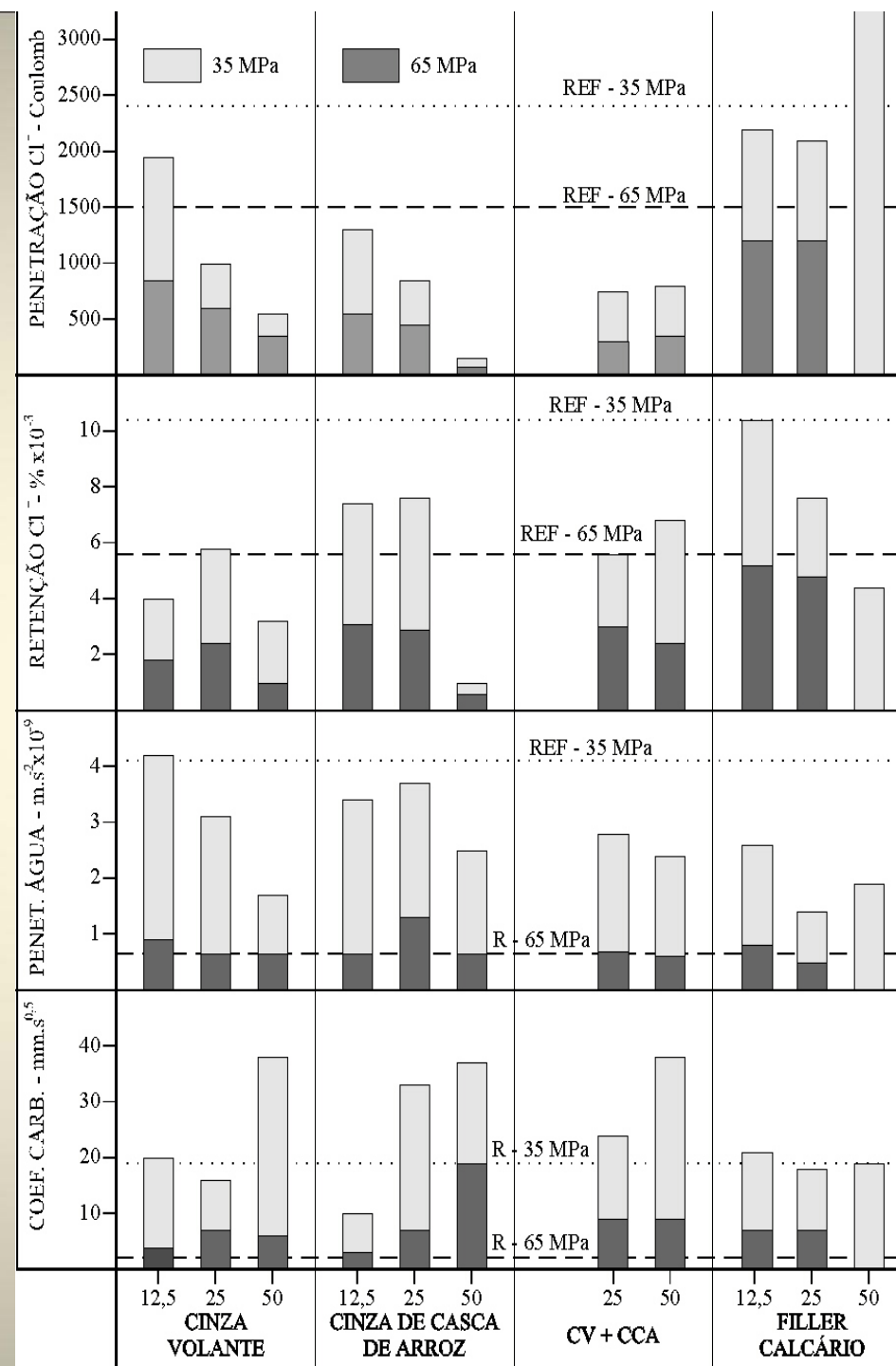
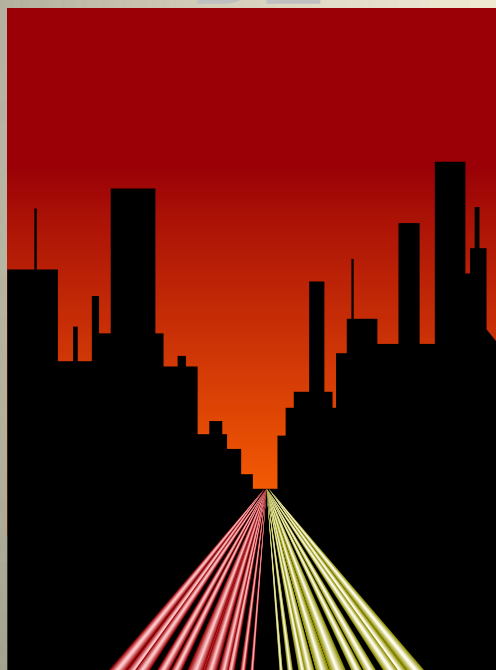


ADIÇÕES MINERAIS EM CAD:

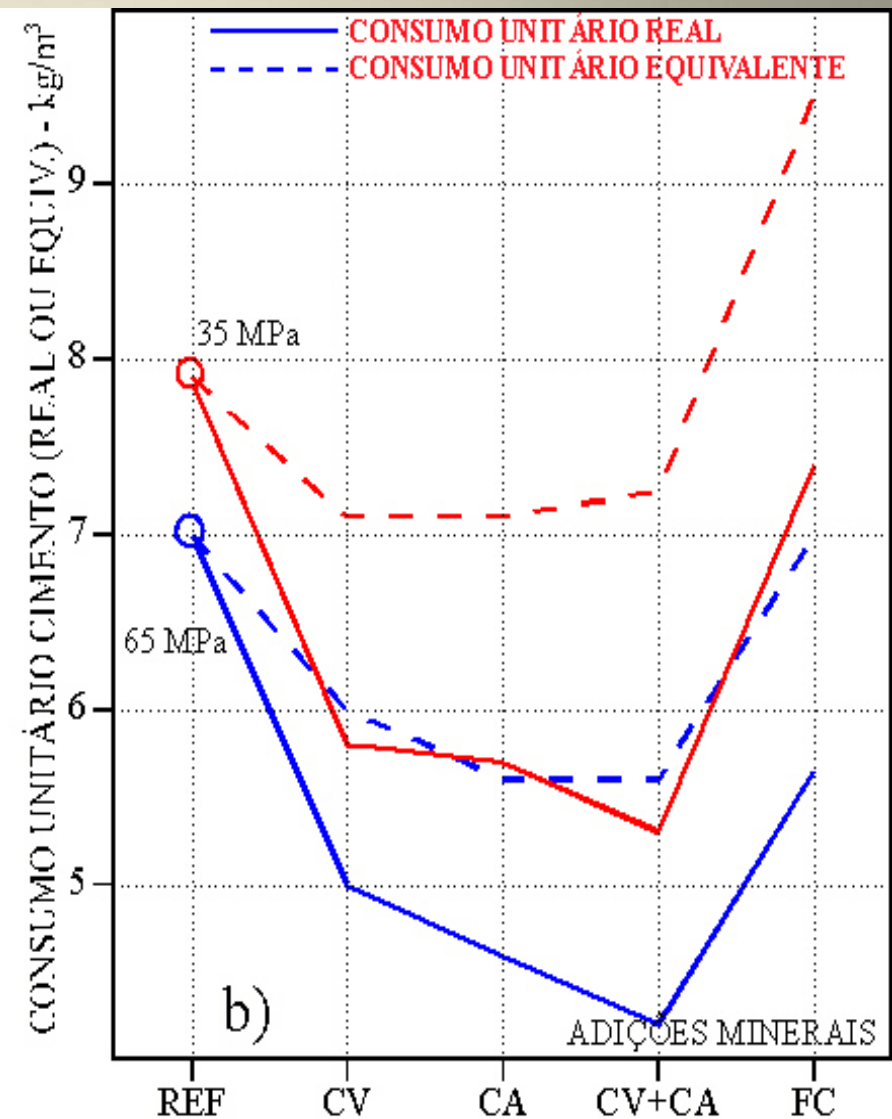
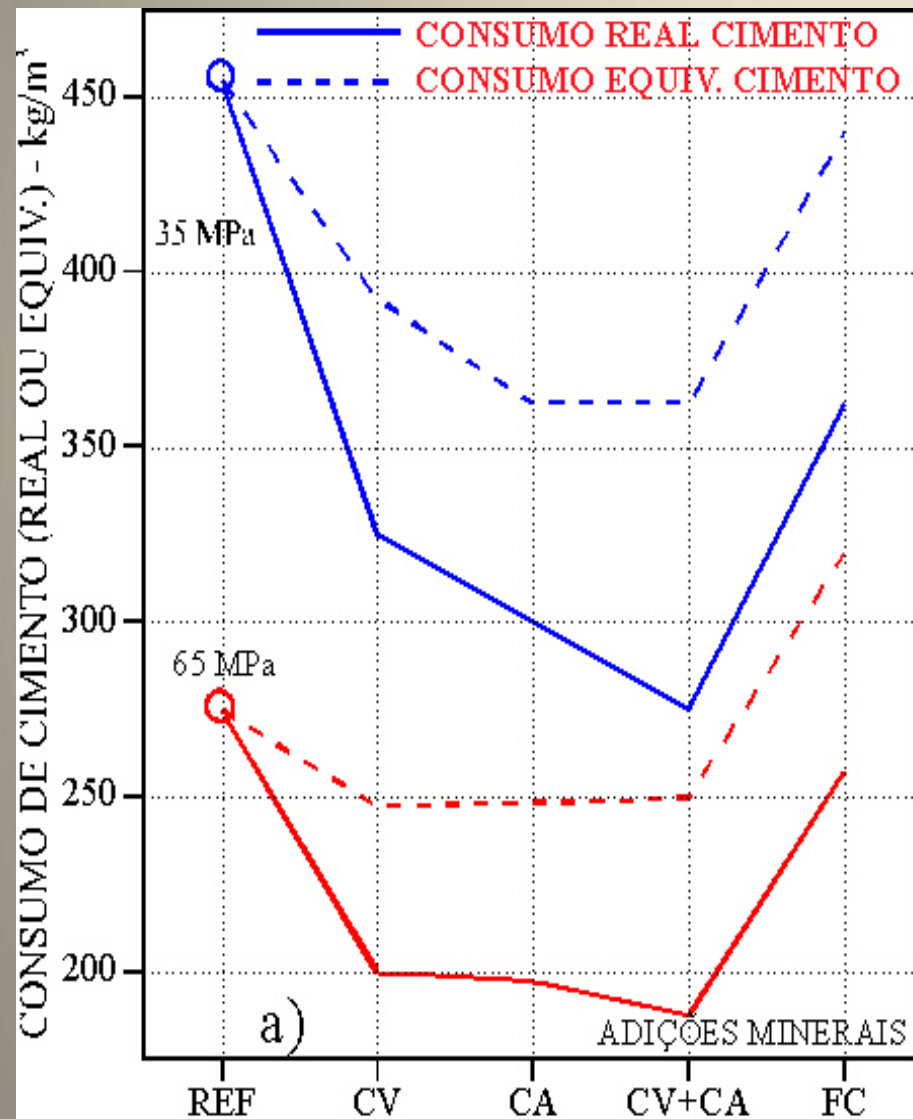
1º ESTUDO DE CASO

- Referência: 100 % de cimento
- Cinza volante: 12,5, 25 e 50 %
- Cinza de casca de arroz, 12,5, 25 e 50%
- Filler calcário : 12,5, 25 e e 50%
- CV + CCA: (12,5 + 12,5) e (25 + 25) %

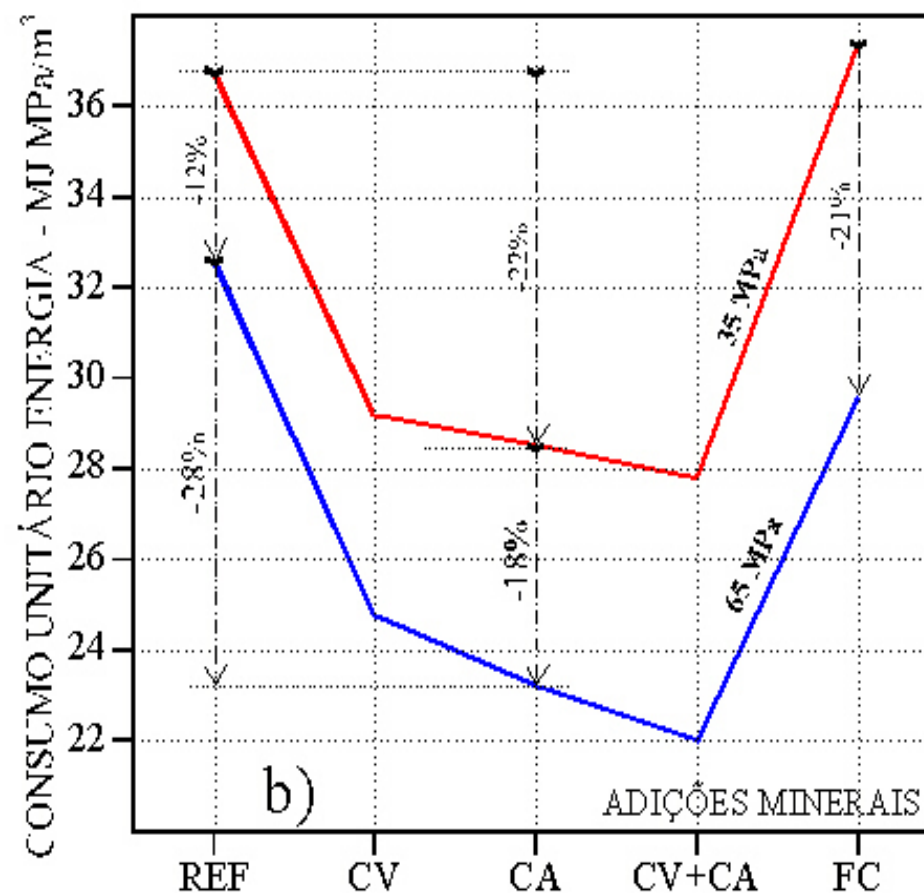
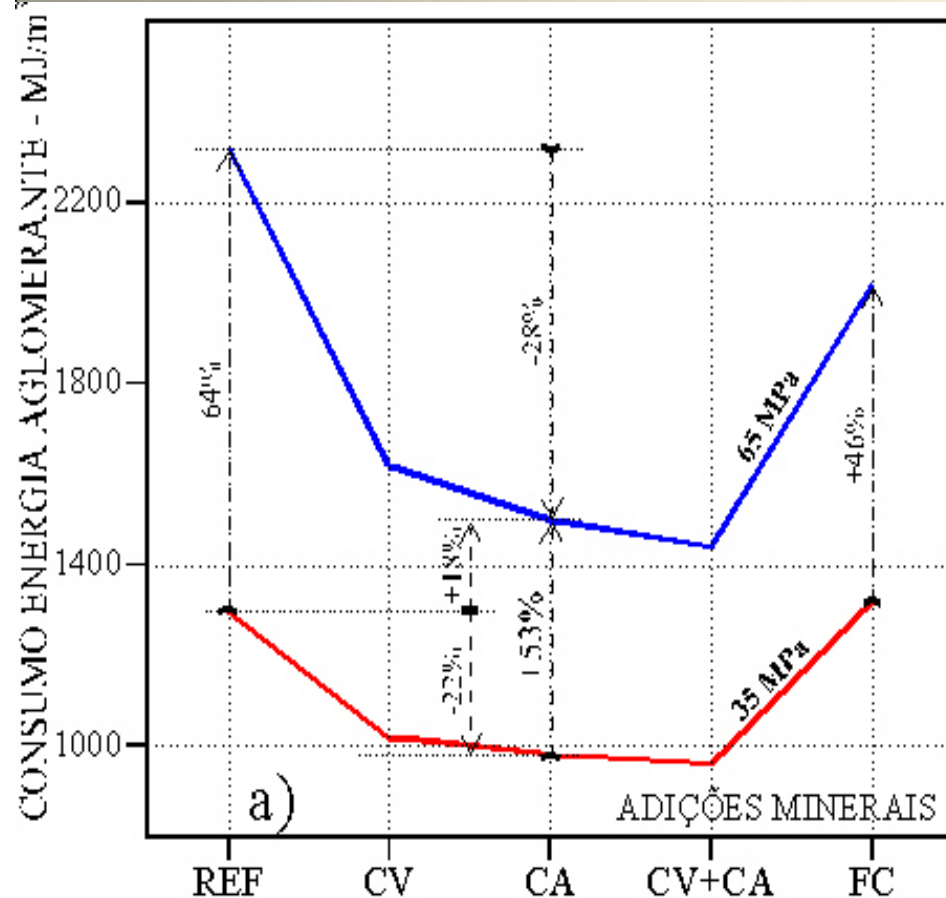
ESTUDO DE DURABILIDA DE



CONSUMO DE CIMENTO REAL E EQUIVALENTE



CONSUMO DE ENERGIA DO AGLOMERANTE



EVOLUÇÃO DO ÍNDICE MÉDIO DAS VARIÁVEIS

PENETRAÇÃO
DE CLORETOS

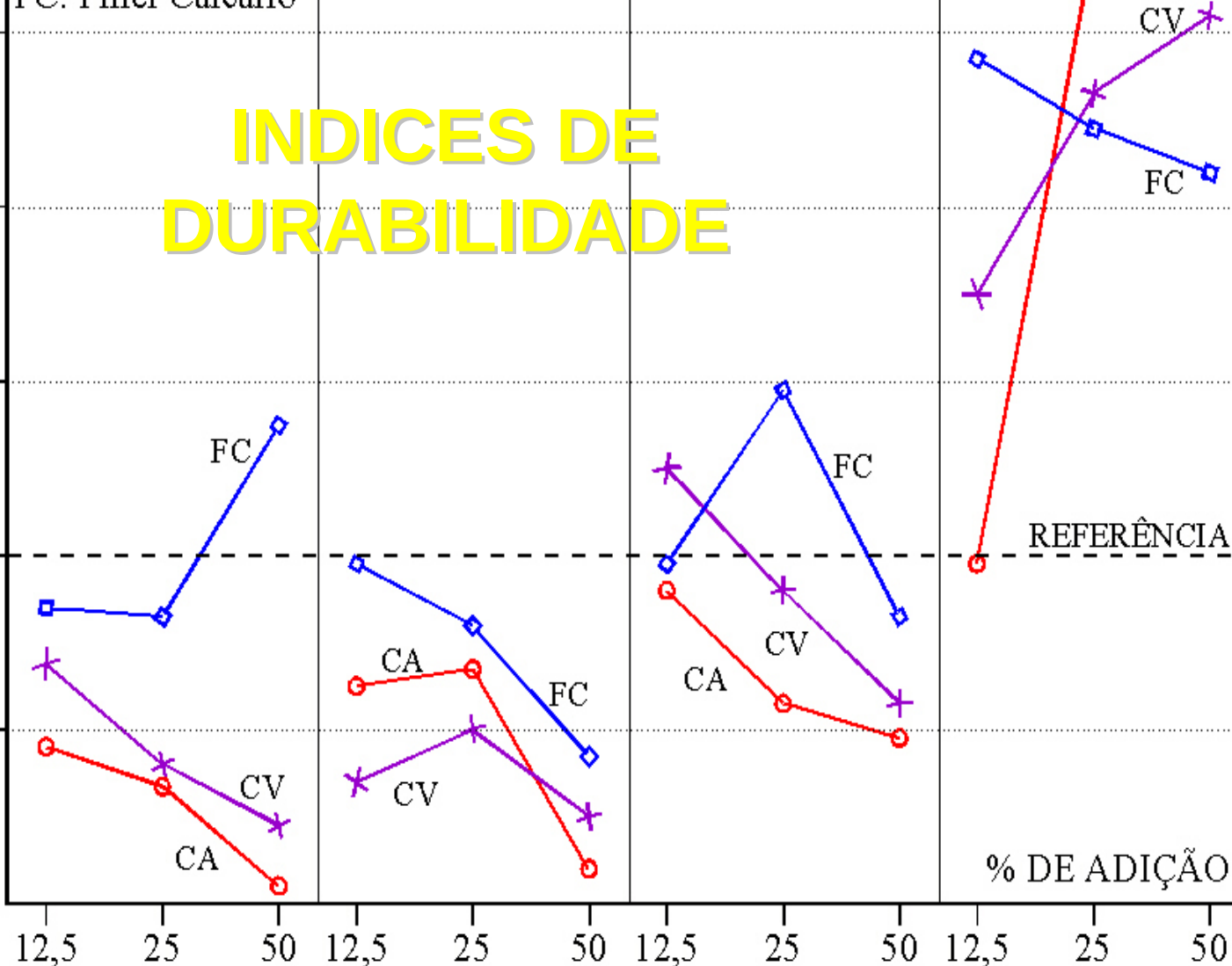
RETENÇÃO
DE CLORETOS

PENETRAÇÃO
DE ÁGUA

COEFICIENTE DE
CARBONATAÇÃO

CV: Cinza Volante
CA: Cinza C. Arroz
FC: Filler Calcário

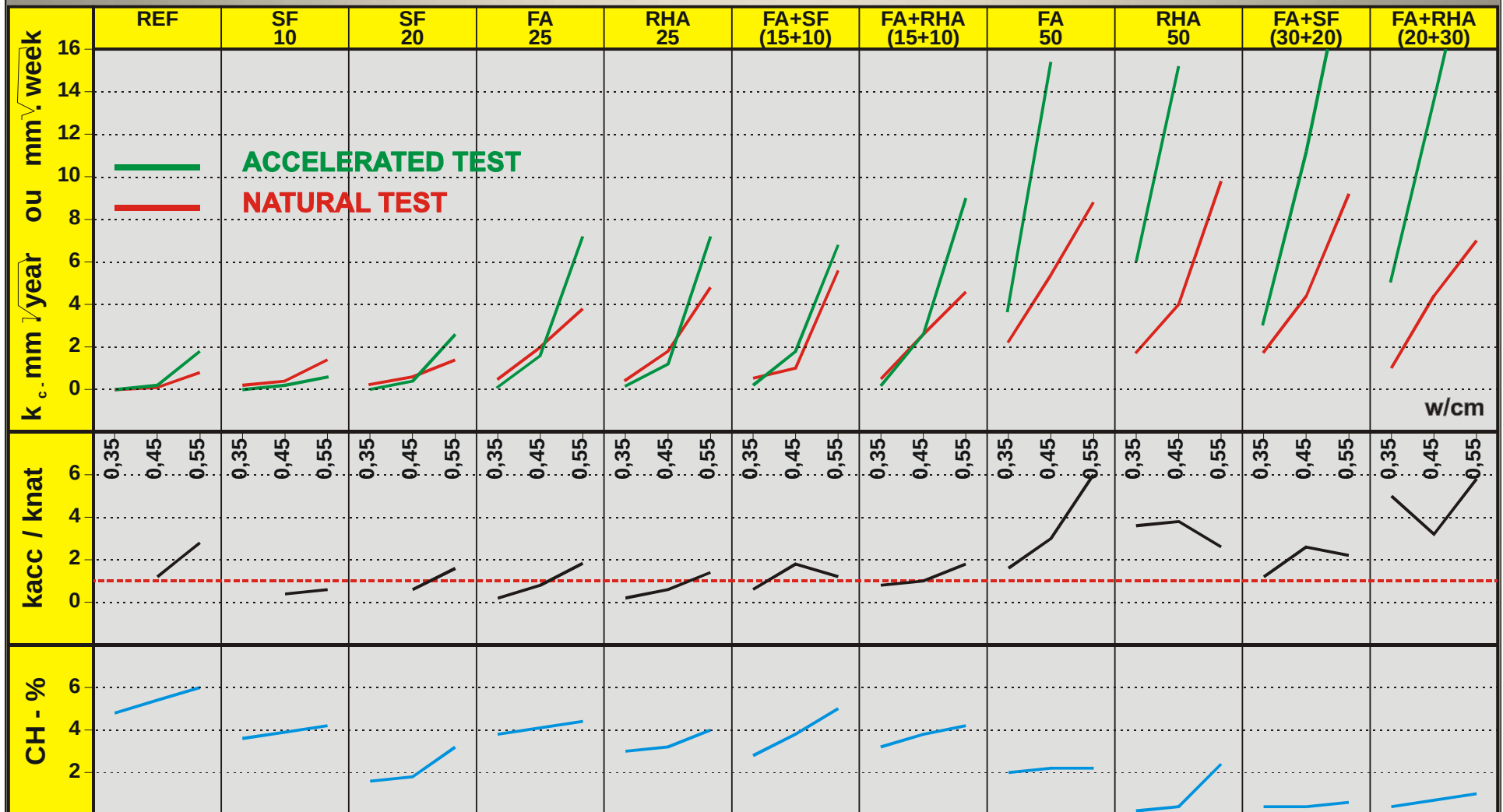
ÍNDICES DE DURABILIDADE



Case Study 2: Concrete mixtures

- Reference mixture with 100% PC
- Pozzolanic mixtures replacing PC in mass:
 - ✓ Fly ash (FA): 25%, 50%;
 - ✓ Silica fume (SF): 10%, 20%;
 - ✓ Rice husk ash (RHA): 25%, 50
 - ✓ FA + SF: (15 + 10)%, (30 + 20)%
 - ✓ FA + RHA: (10 + 15)%, (20 + 30)%

Test results

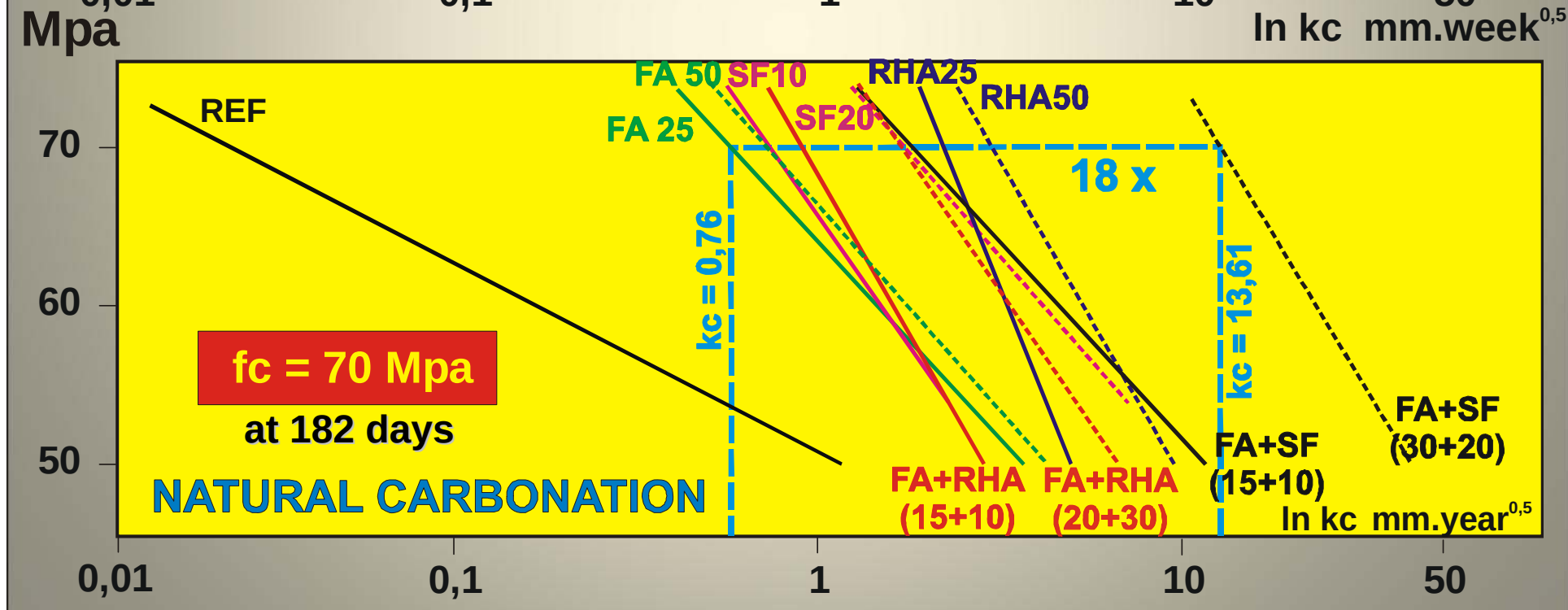
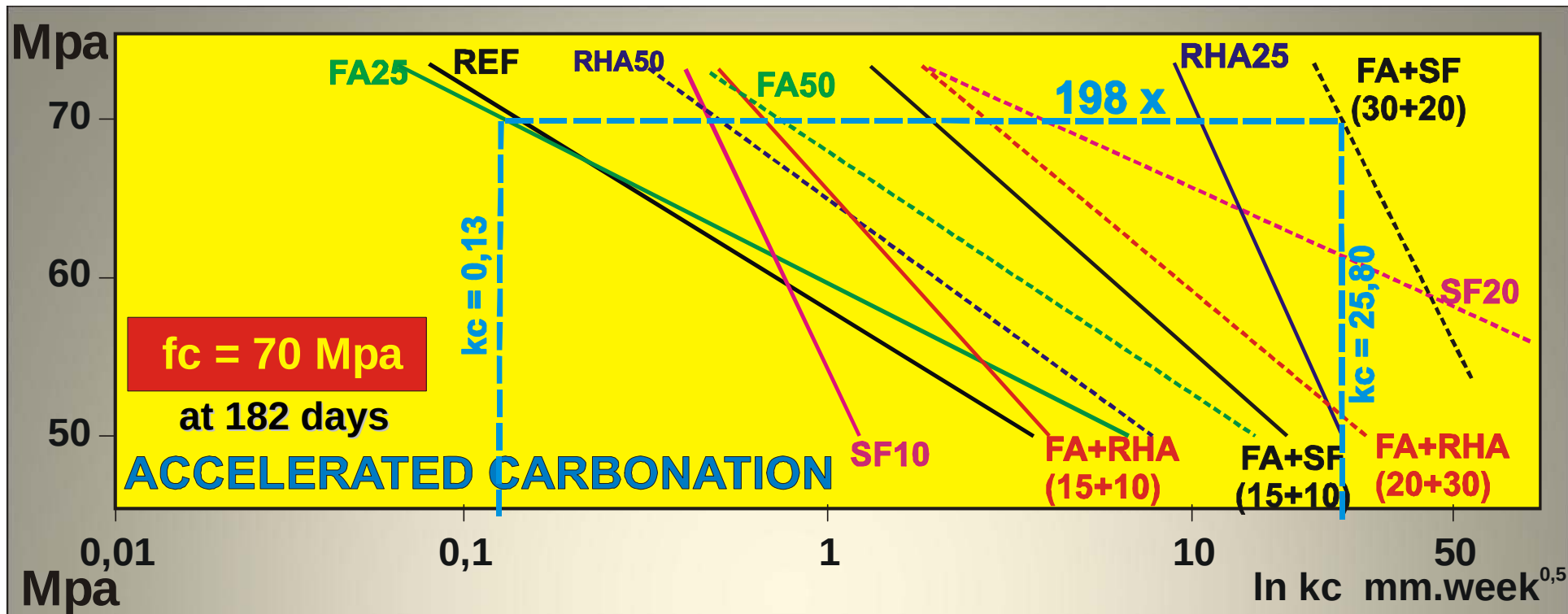


Mean values of accelerated ($\text{mm.week}^{0.5}$) and natural ($\text{mm.year}^{0.5}$) carbonation coefficients

w/cm	Reference		P _o ≤ 25%		P _o = 50%		50% / <25%	
	Acc.	Nat.	Acc.	Nat.	Acc.	Nat.	Acc.	Nat.
0.35	-	-	0.20	0.46	4.74	1.73	23.7x	3.8x
0.45	0.10	0.01	1.12	1.29	15.06	4.80	13.4x	3.7x
0.55	2.63	0.85	6.37	4.04	42.41	9.34	6.7x	2.3x
Var.			31.9x	8.8x	8.9x	5.4x		

Means values of remaining calcium hydroxide

w/cm	REF	P _o zz ≤ 25%	P _o zz = 50%	25% / 50%
0.35	4.9	3.0	0.8	3.8 x
0.45	5.4	3.5	0.9	3.9 x
0.55	5.9	4.2	1.5	2.8 x
Means	5.4	3.6	1.1	



CAD com 90% de adições minerais e cal:

3º estudo de caso

Traços

- Referência (100% CP-V) → **R**
- 70%E + 20%CV + 10%CP-V → **EV**
- 70%E + 20%CV + 10%CP-V + 20% **Cal** → **EVC**

Repor o CH não formado pela substituição do cimento e devido ao consumo nas reações pozolânicas.

Relações a/ag:

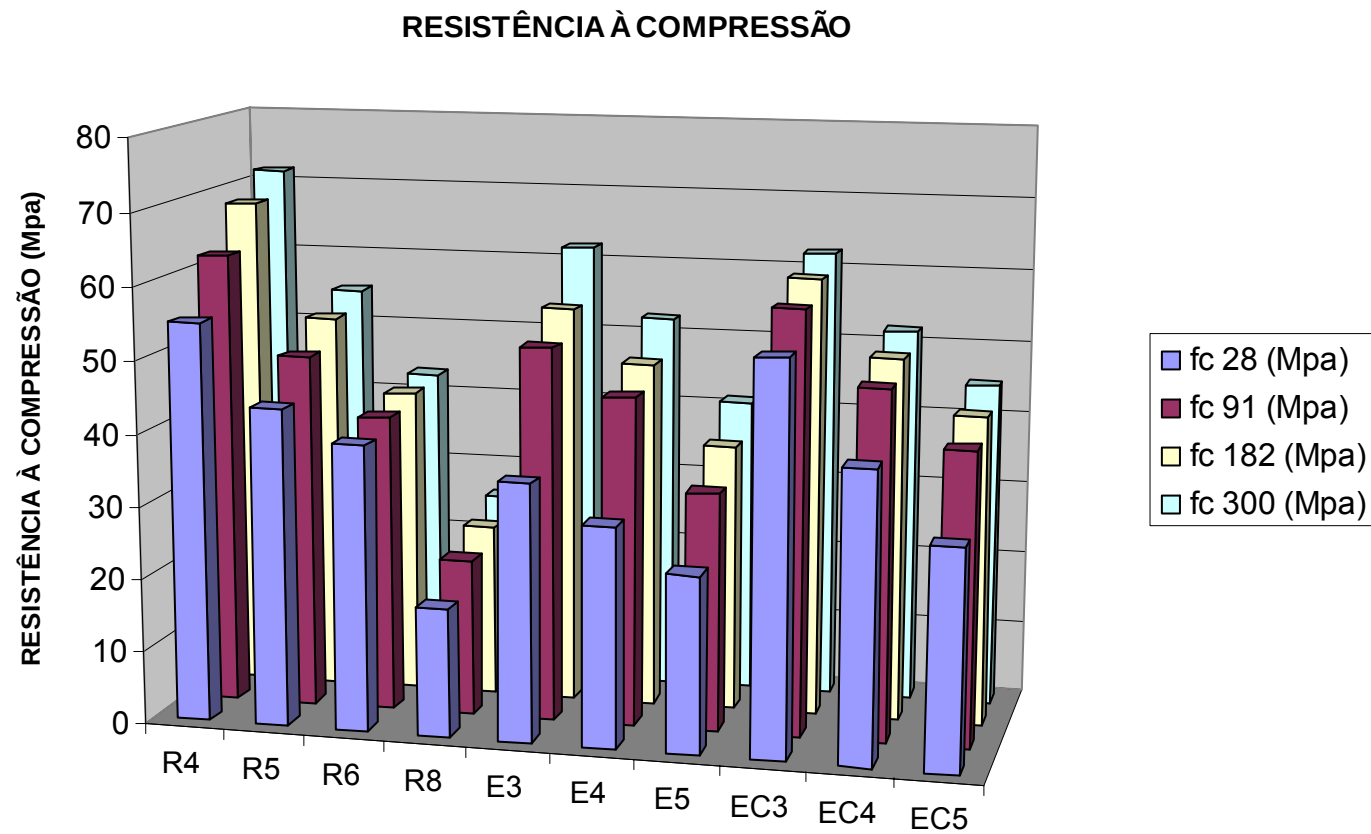
- R: 0.40, 0.60 e 0.80 → **R4, R6 e R8**
- EV: 0.30, 0.40 e 0.50 → **EV3, EV4 e EV5**
- EVC: 0.30, 0.40 e 0.50 → **EVC3, EVC4 e EVC5**

Profundidade das Camadas:

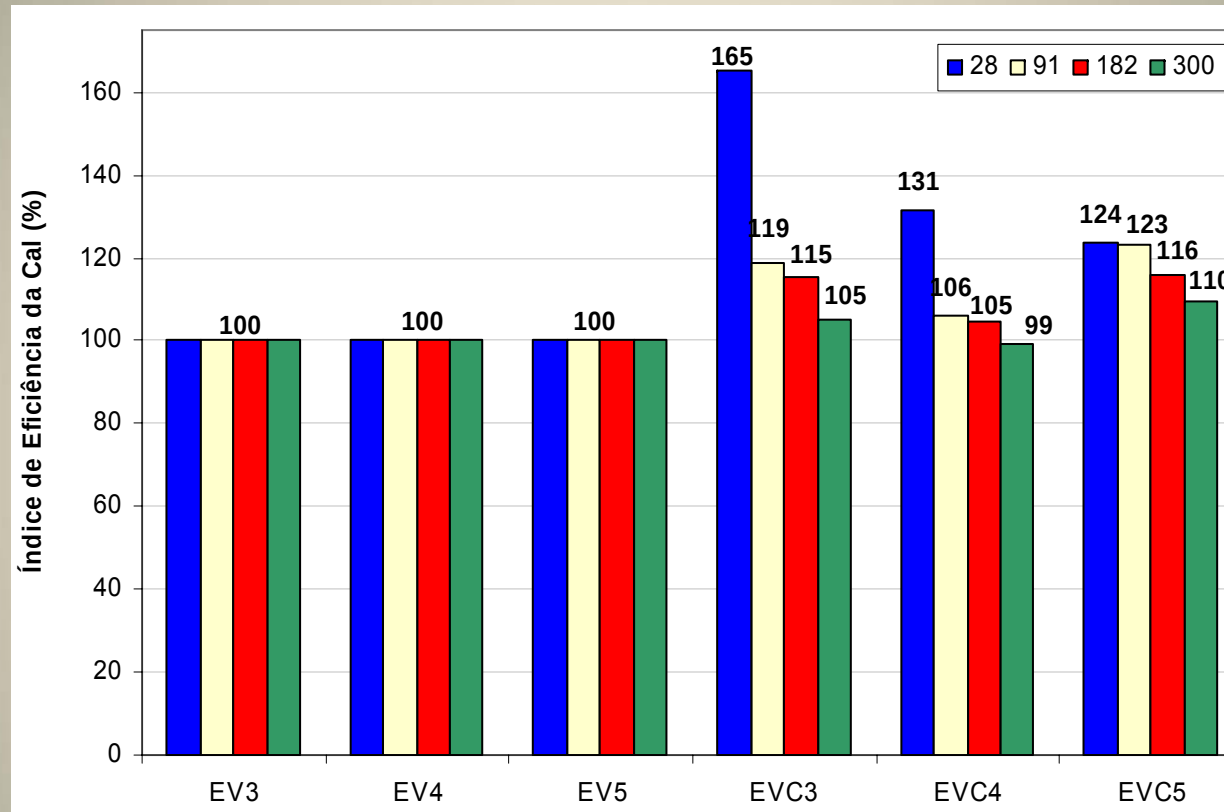
- 0 – 1.0cm → **C1**
- 2.0 – 3.0cm → **C2**
- 4.5 – 5.5cm → **C3**

ANÁLISE DOS RESULTADOS

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



Eficiência da Cal



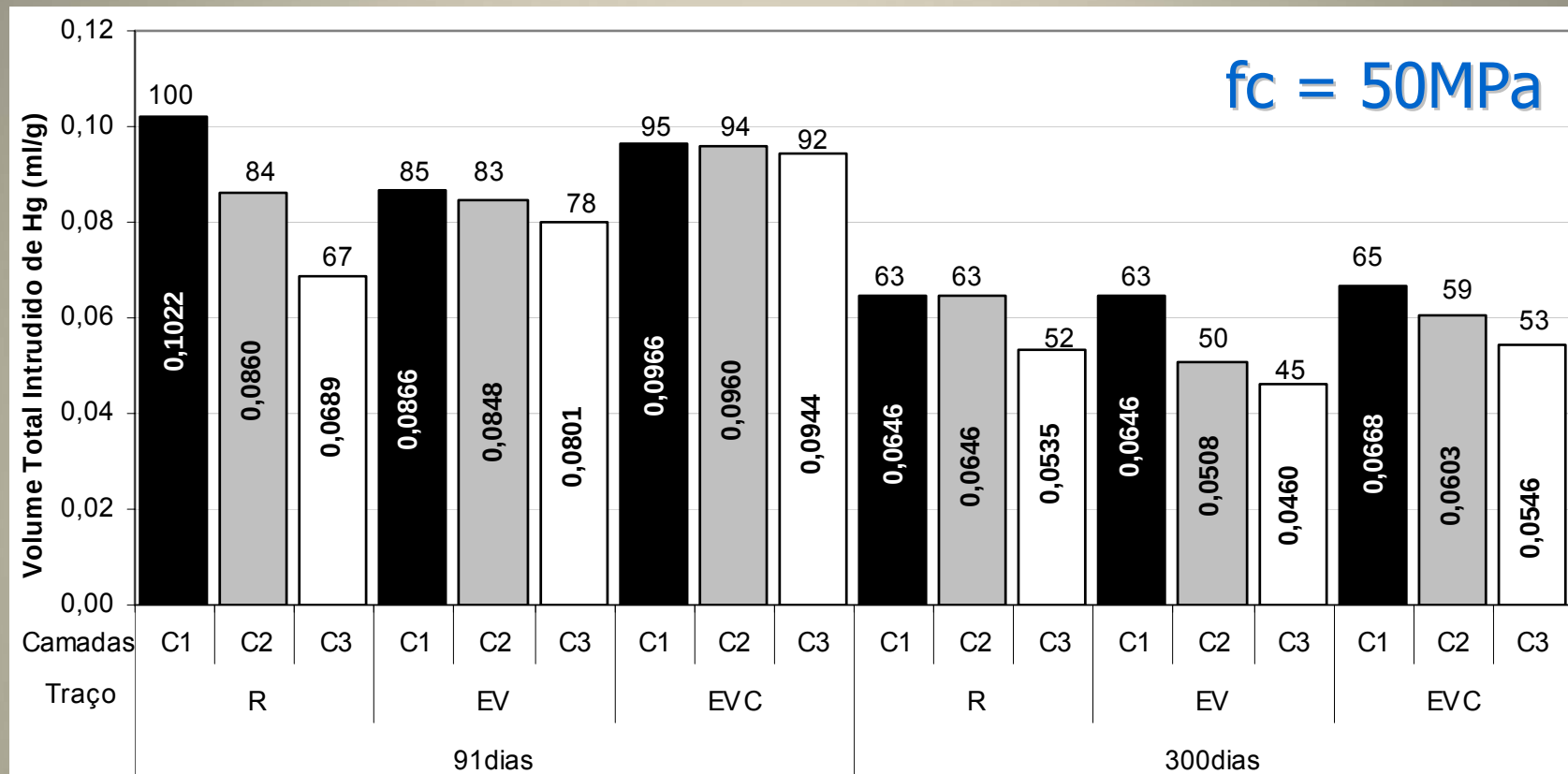
■ 28 dias: 40%

■ 91 dias: 16%

■ 182 dias: 12%

■ 300 dias: 5%

Porosidade Total



91 dias

■ C1: EV → ↓VTI

■ C3: R → ↓VTI

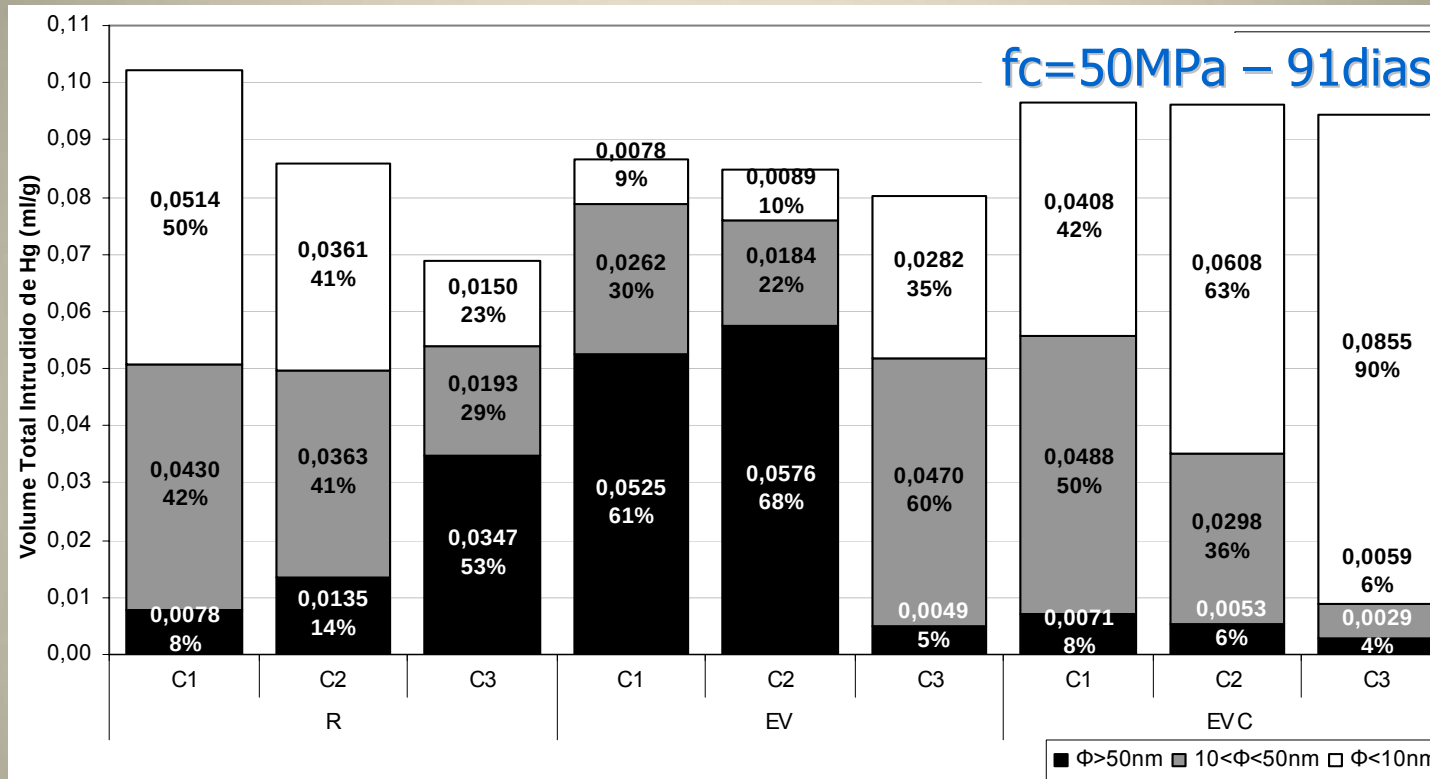
■ Cal → ↑VTI

300 dias

■ C1: R, EV → ↓VTI

■ C3: EV → ↓VTI

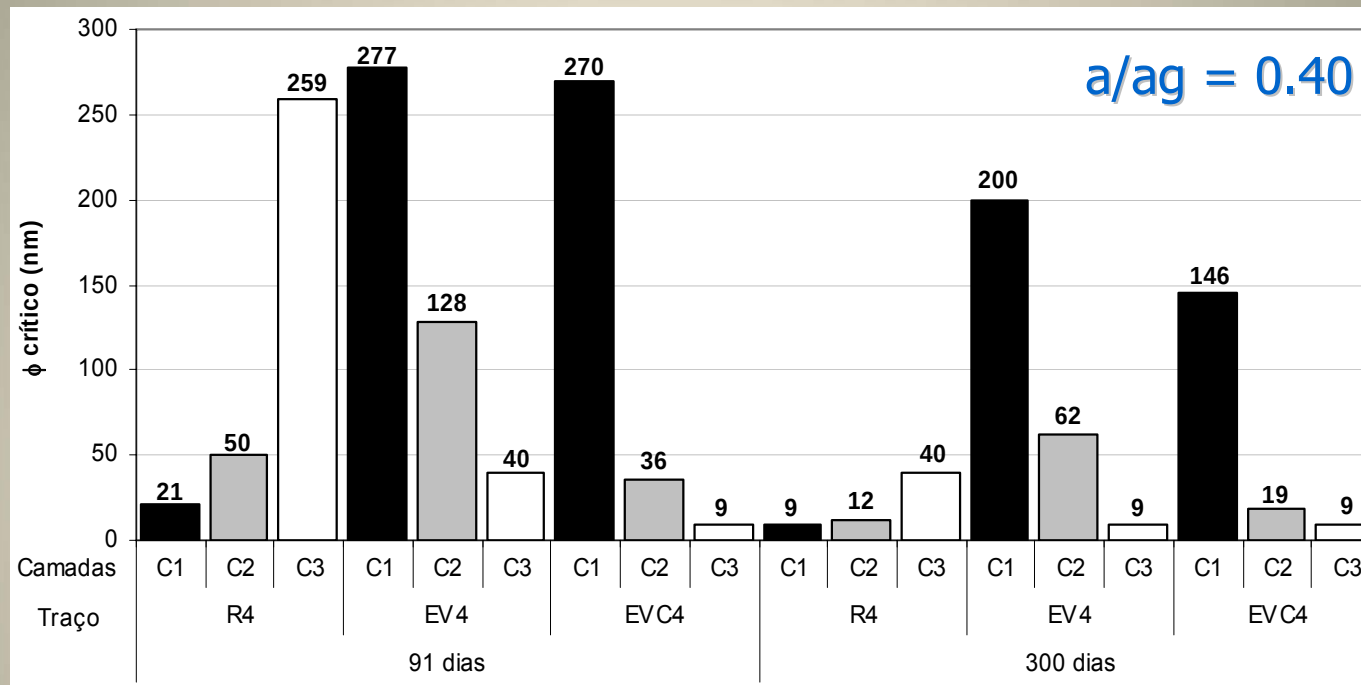
Distribuição dos Poros



■ C1: R, EVC → ↑Micro ↓Macro

■ C3: EVC → ↑Micro ↓Macro

Diâmetro Crítico

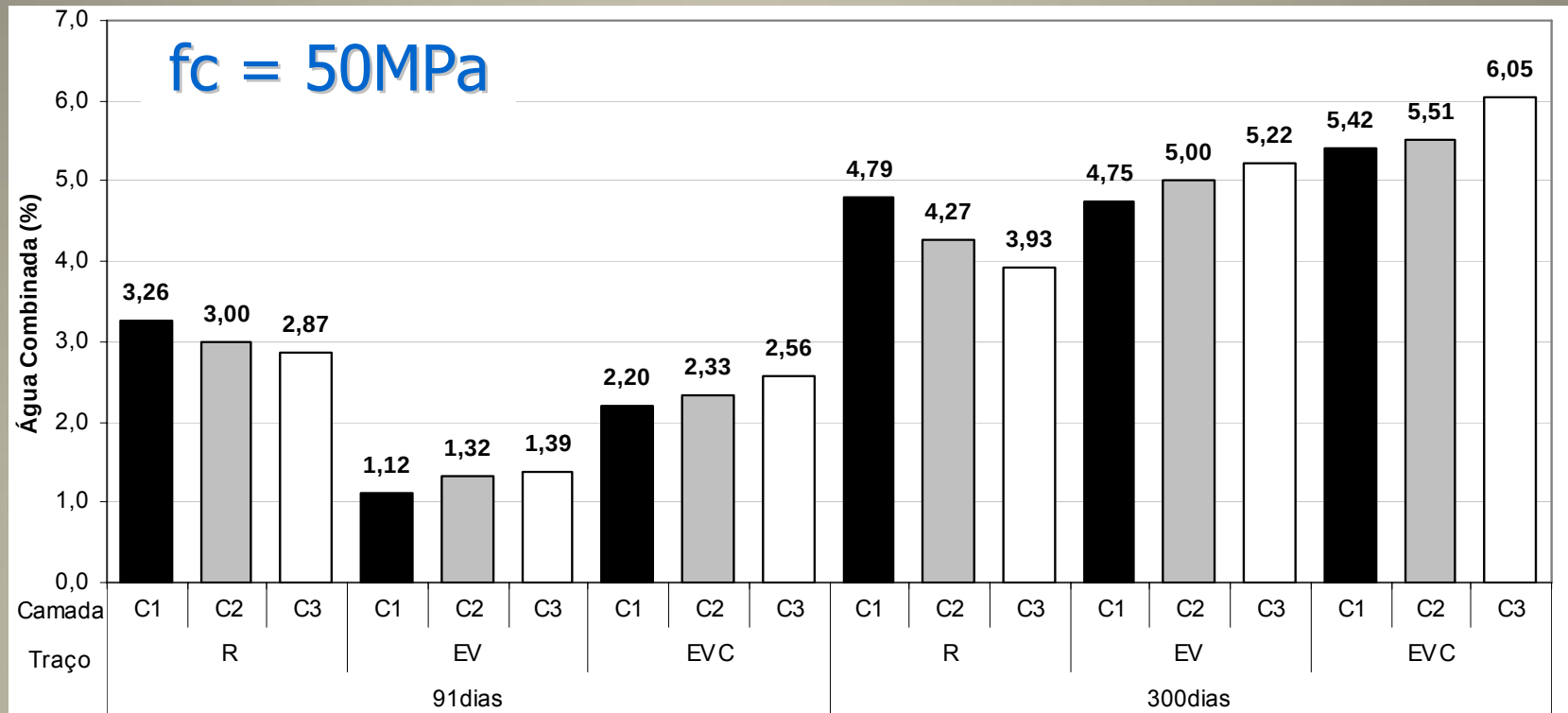


■ C1: R $\rightarrow$ $\downarrow \Phi_{\text{crít}}$

$\uparrow$ Refinamento dos Poros

■ C3: EVC $\rightarrow$ $\downarrow \Phi_{\text{crít}}$

Água Combinada



- 91 dias: R → ↑ AC
- 300 dias: EV, EVC → ↑ AC
- Cal: ↑ AC → 91 e 300 dias



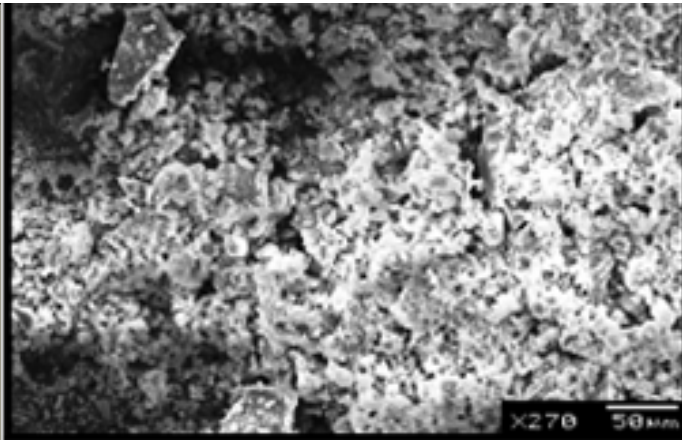
Ativação da Escória



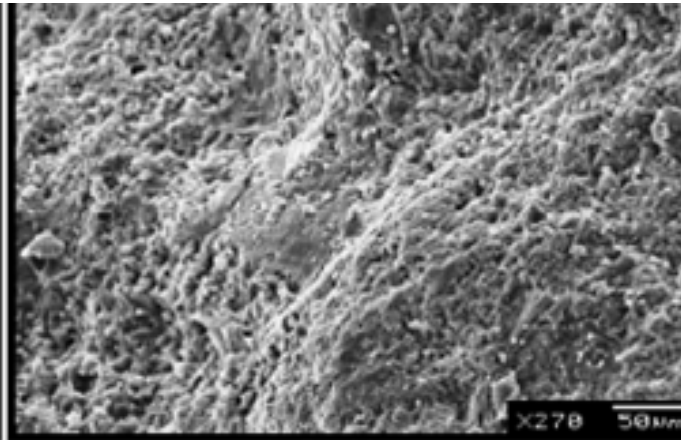
CH → Reações Pozolânicas



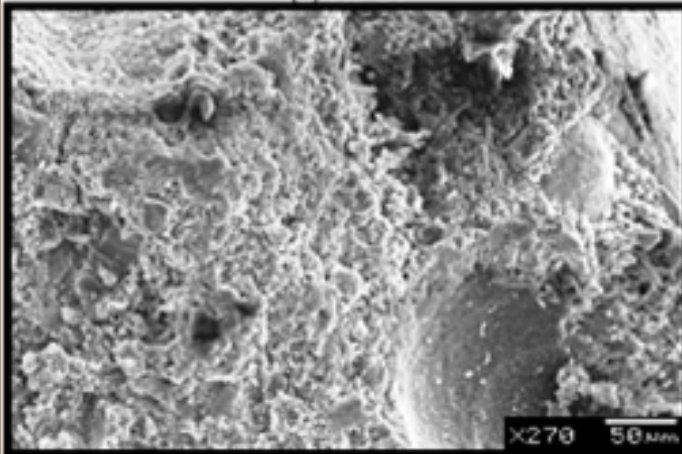
Absorção de água → Reserva de Umidade



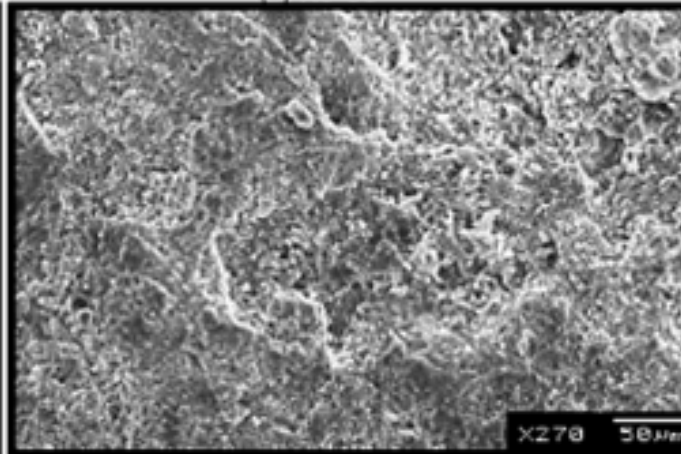
(a) R6-C1



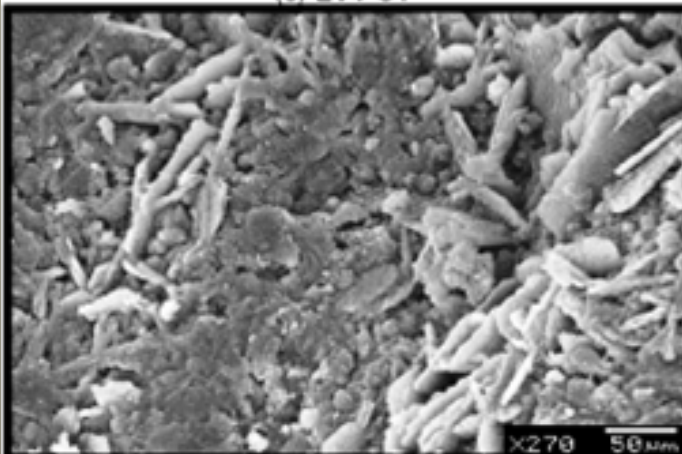
(b) R6-C3



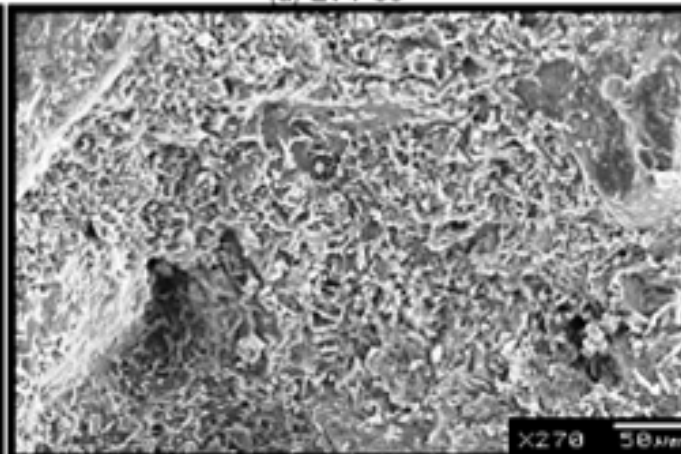
(c) EV4-C1



(d) EV4-C3

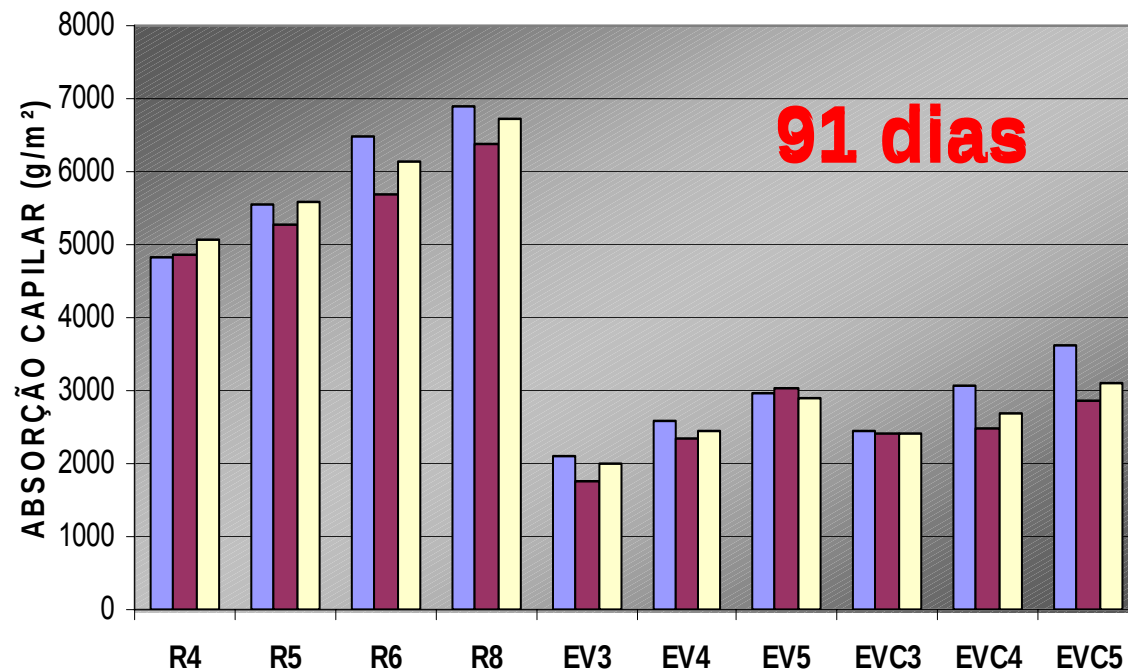


(e) EVC5-C1

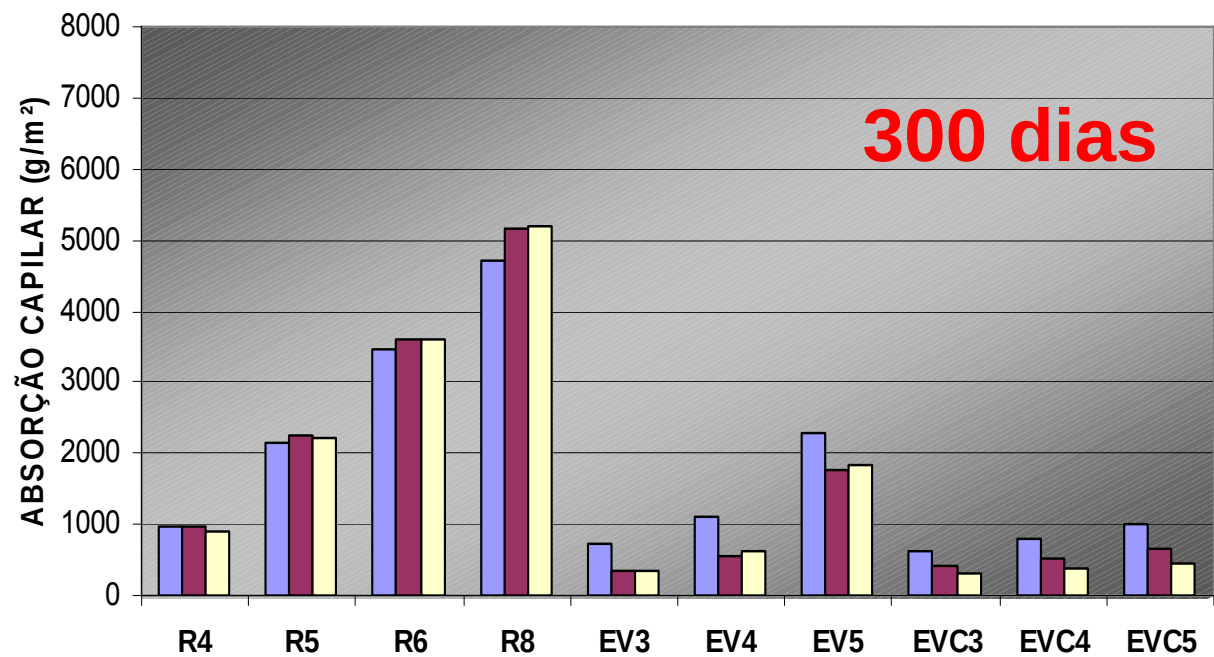


(f) EVC5-C3

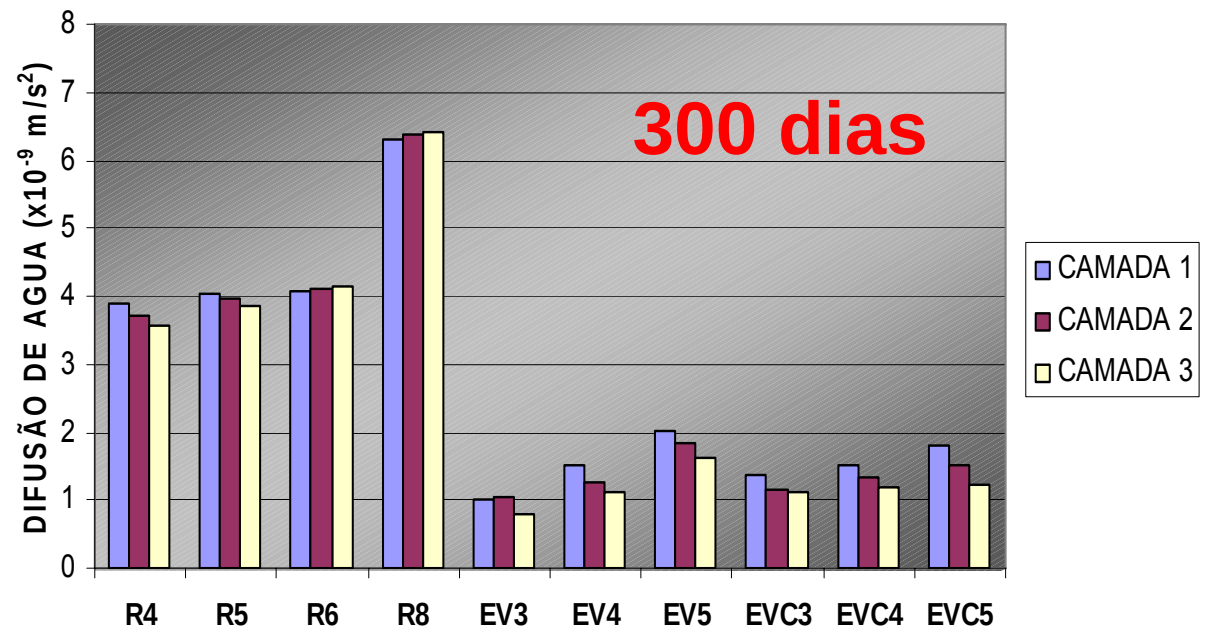
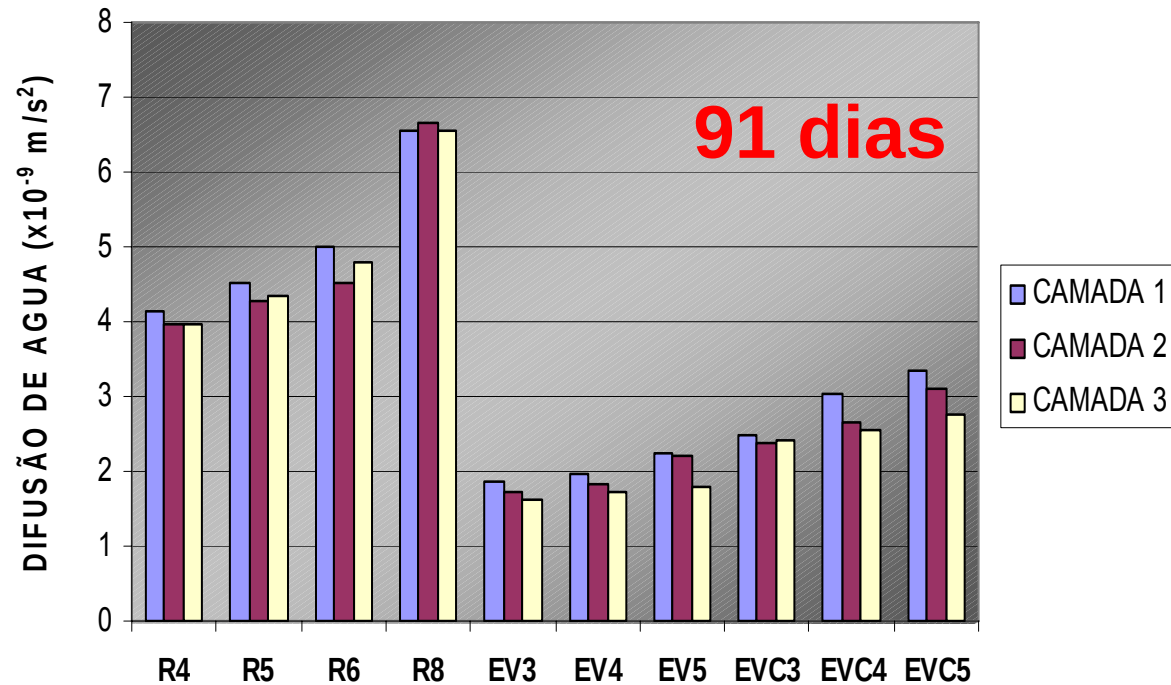
MEV
42 MPa

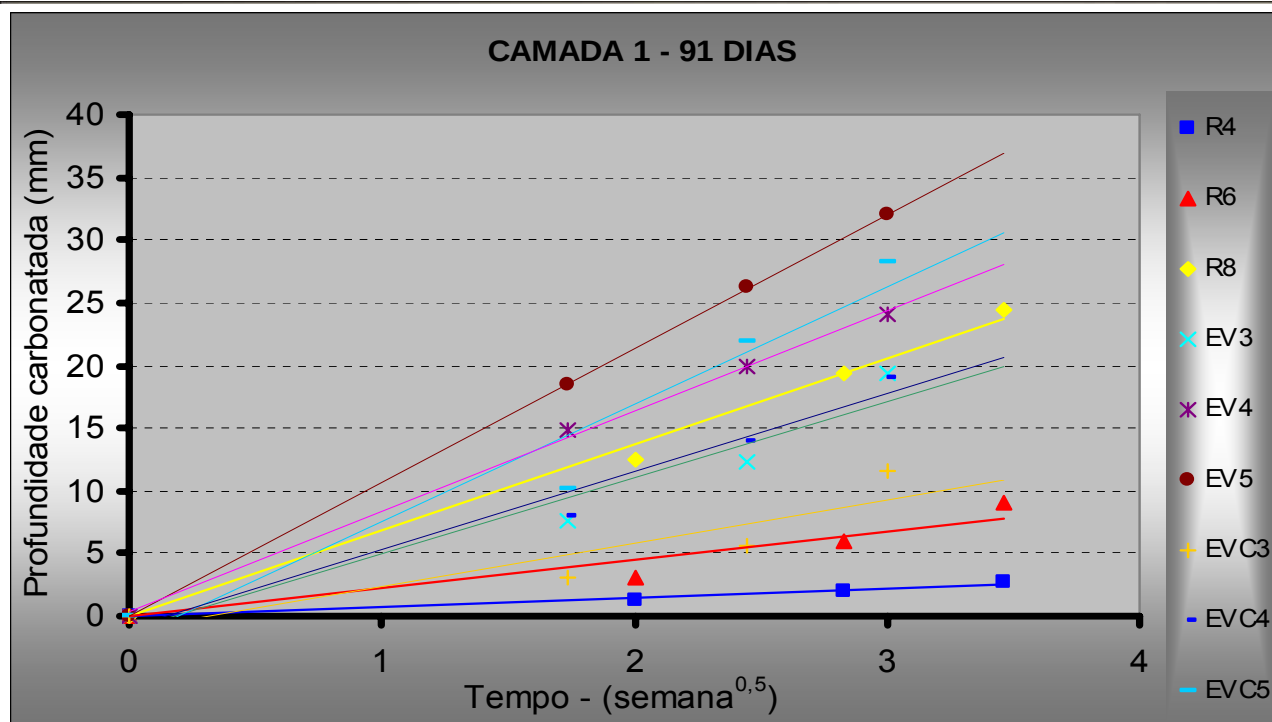


**Absorção
capilar
91 x 300
dias**

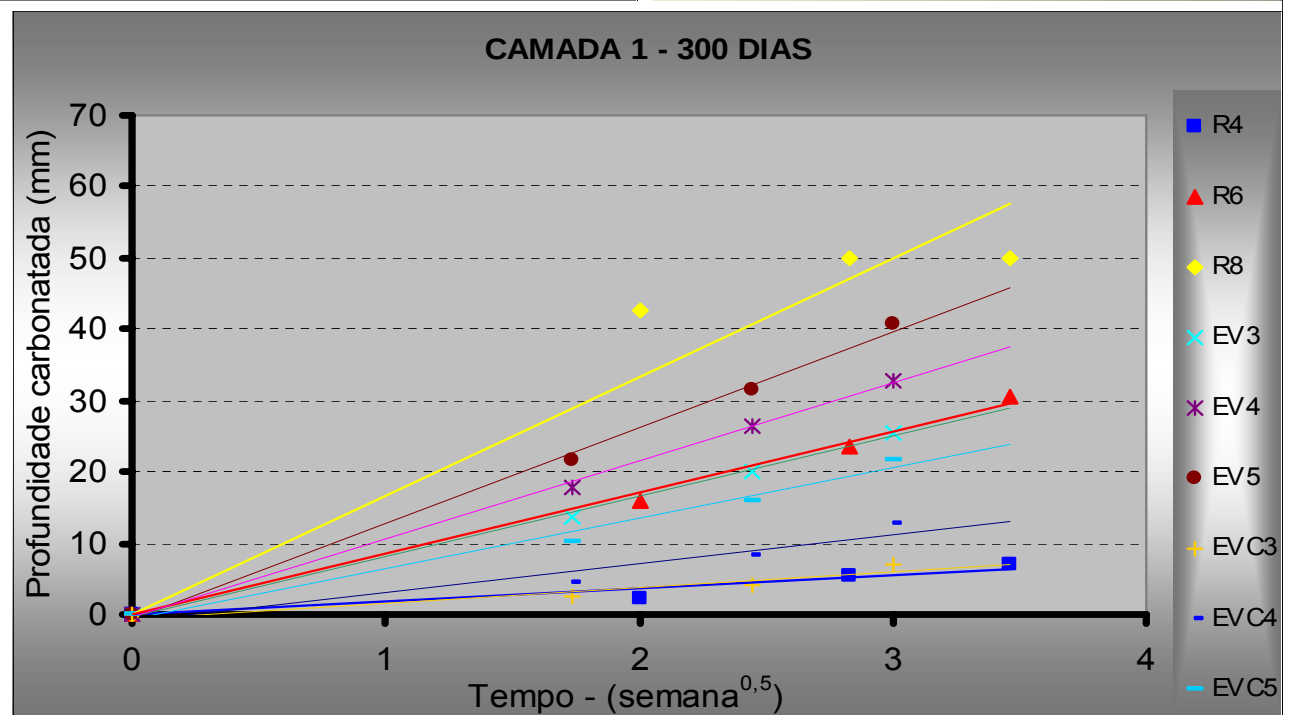


Coeficiente de difusão de água

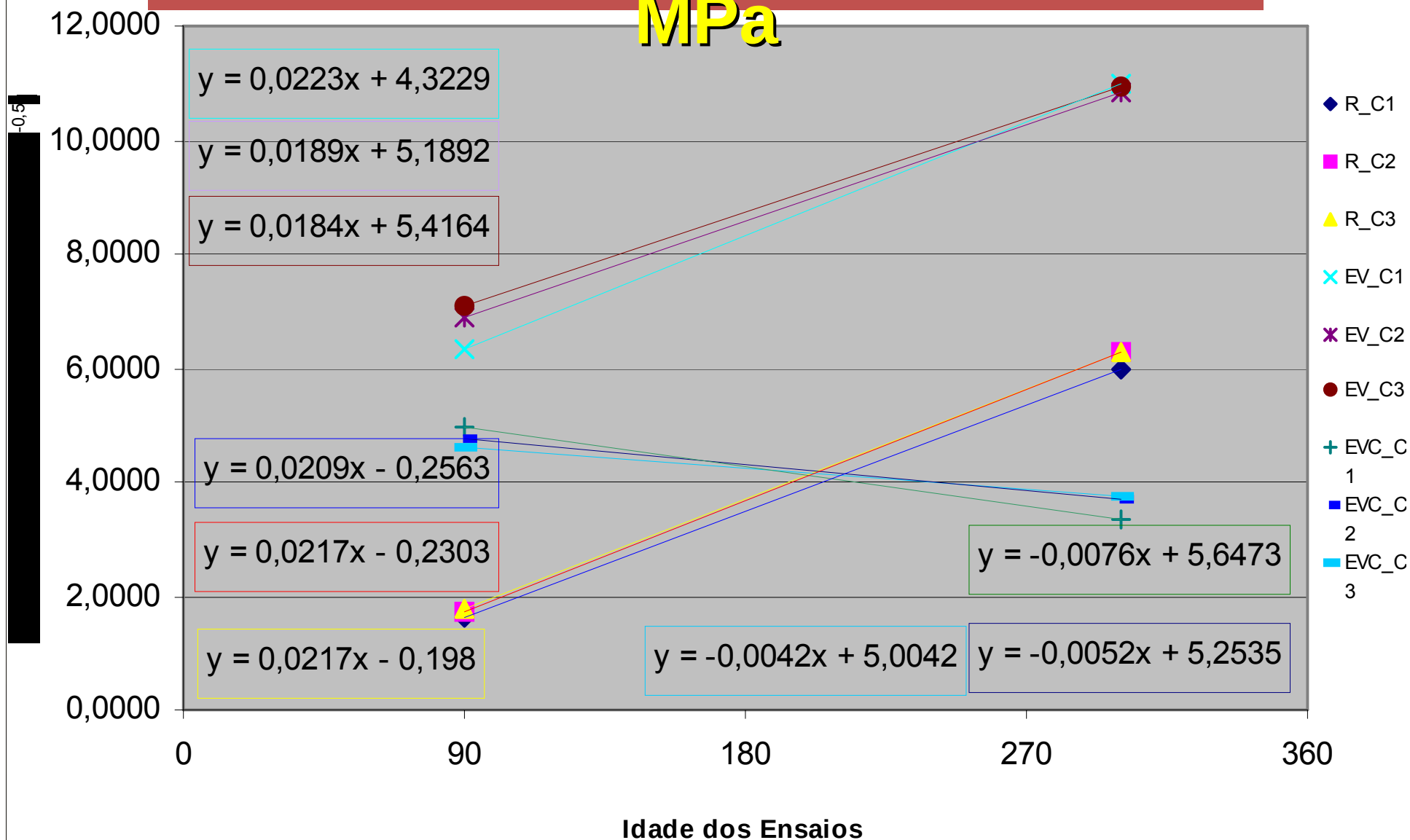




**Carbonatação
o acelerada**



Coeficiente de carbonatação em igualdade de resistência = 50 MPa



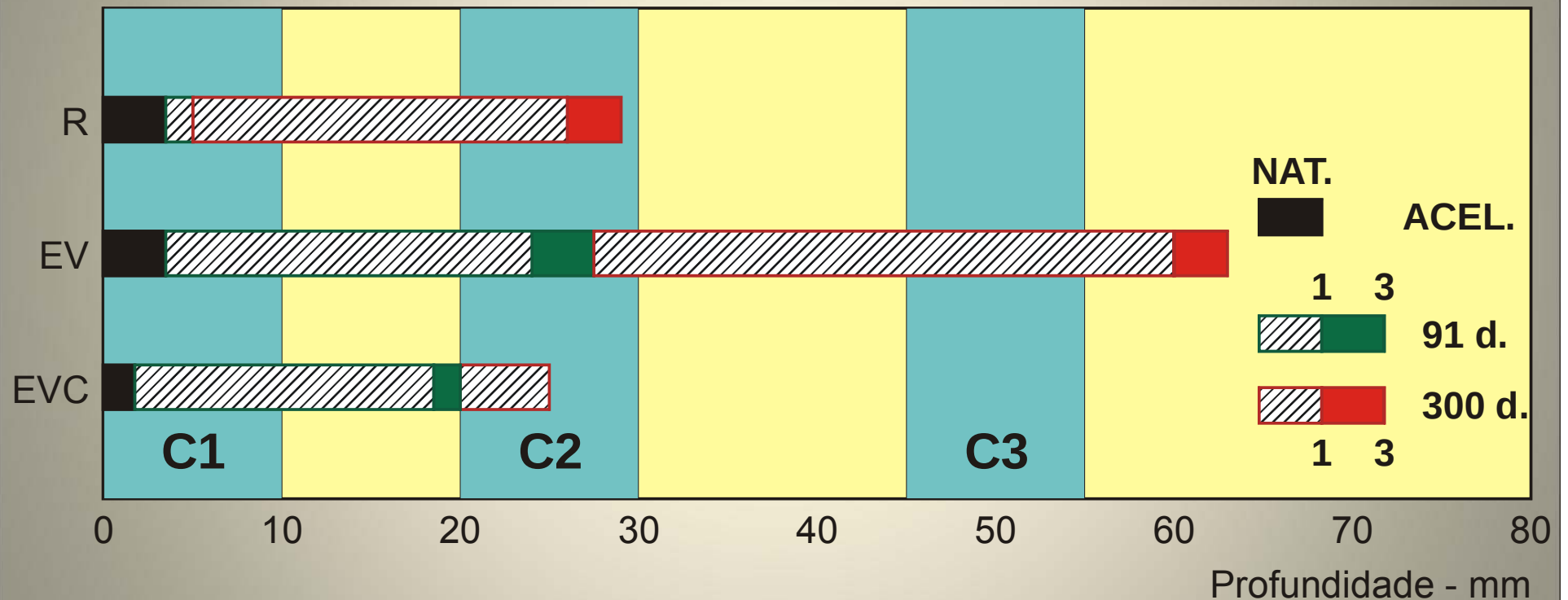
Coeficiente de carbonatação – $a/a_g = 0,40$

	91 dias			300 dias*		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Coeficiente carbon. mm.sem ^{-0,5}	6,17	5,55	5,36	4,04 -35%	4,07 -27%	3,98 -26%
Volume total de Hg Intrudido cm ³	0,0976	0,0963	0,0946	0,0603 -38%	0,0572 -41%	0,0520 -45%
Φ crítico nm	270	36	9	146 -46%	19 -47%	9 0%
Água combinada %	2,23	2,34	2,56	5,36 +140%	5,42 +232%	5,89 +230%
C-S-H / DRX Counts	140	167	155	172 +23%	226 +35%	201 +30%
CH remanescente %	2,10	3,20	6,30	2,75 +30%	3,50 +9%	6,45 +2%
pH	12,73	12,80	13,11	12,60 -1%	12,59 -2%	12,62 -4%

Teores de hidróxido de cálcio remanescente igualdade de resistência = 50 MPa

	CH - % 91 dias				CH - % 300 dias			
	C1	C2	C3	Δ_{31} - %	C1	C2	C3	Δ_{31} - %
R	4,09	3,29	2,81	-31,3	3,69	3,74	3,94	6,8
EV	2,99	3,09	3,62	21,1	1,86	2,27	2,85	53,2
EVC	3,18	4,18	6,85	115,0	3,05	4,03	6,40	210,0
EV/R	0,73	0,94	1,29		0,50	0,61	0,72	
EVC/R	0,78	1,27	2,44		0,83	1,08	1,62	
EVC/EV	1,06	1,35	1,89		1,64	1,78	2,25	

Profundidades carbonatadas para $f_c = 50$ MPa



Penetração de cloretos x Resistência

Penetração de Cloretos - Coulomb

8000

7000

6000

5000

4000

3000

2000

1000

750

500

250

$$C = -112,2.f_c + 9156$$
$$r^2 = 0,96$$

R_{300}

$$C = -128,9.f_c + 10512$$
$$r^2 = 0,98$$

R_{91}

$$C = -4,874.f_c + 668$$
$$r^2 = 0,77$$

EV_{91}

$$C = -3,080.f_c + 6643$$
$$r^2 = 0,98$$

EVC_{91}

$$C = -1,947.f_c + 391$$
$$r^2 = 0,30$$

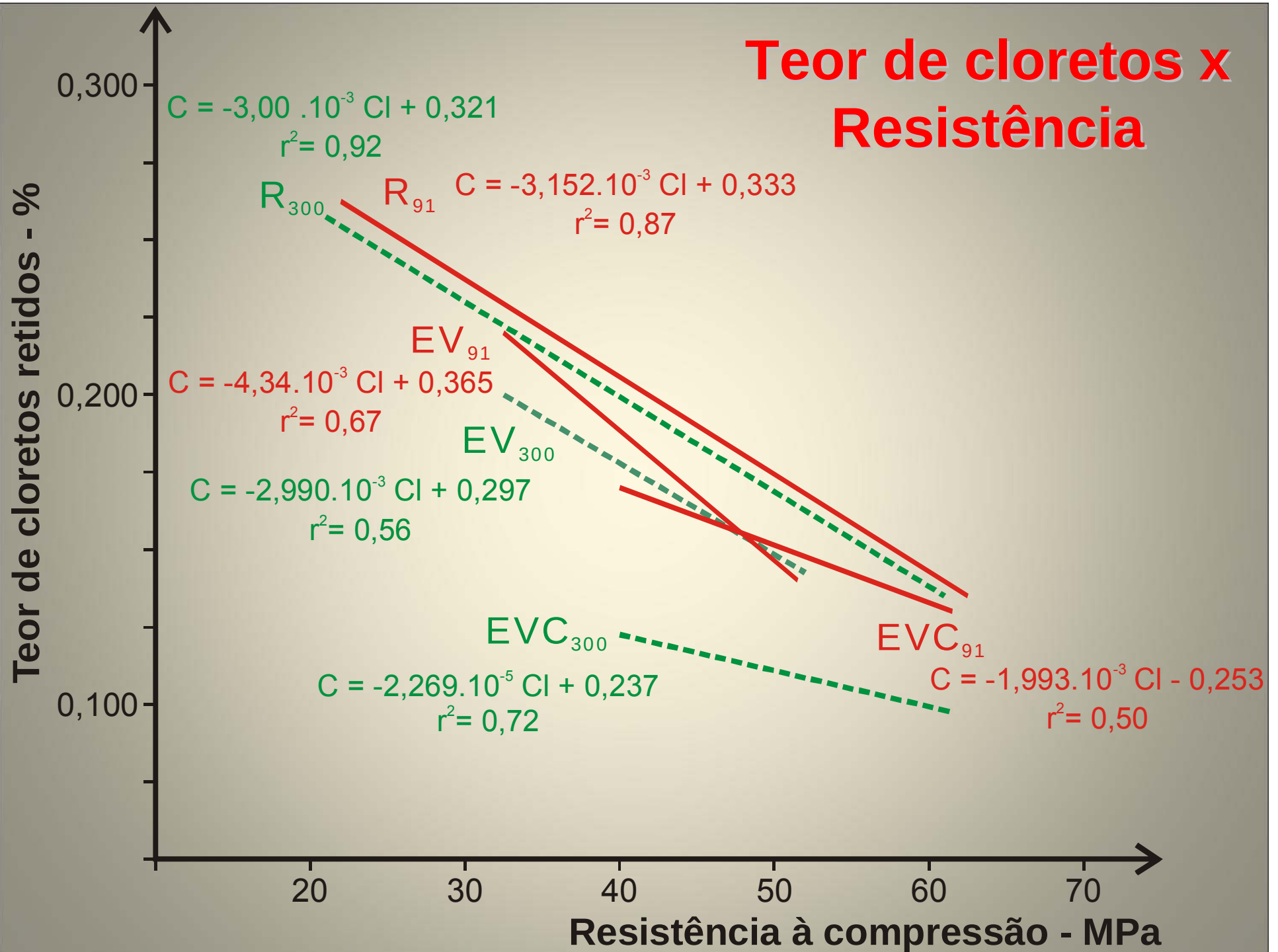
EV_{300}

$$C = -4,201.f_c + 553$$
$$r^2 = 0,73$$

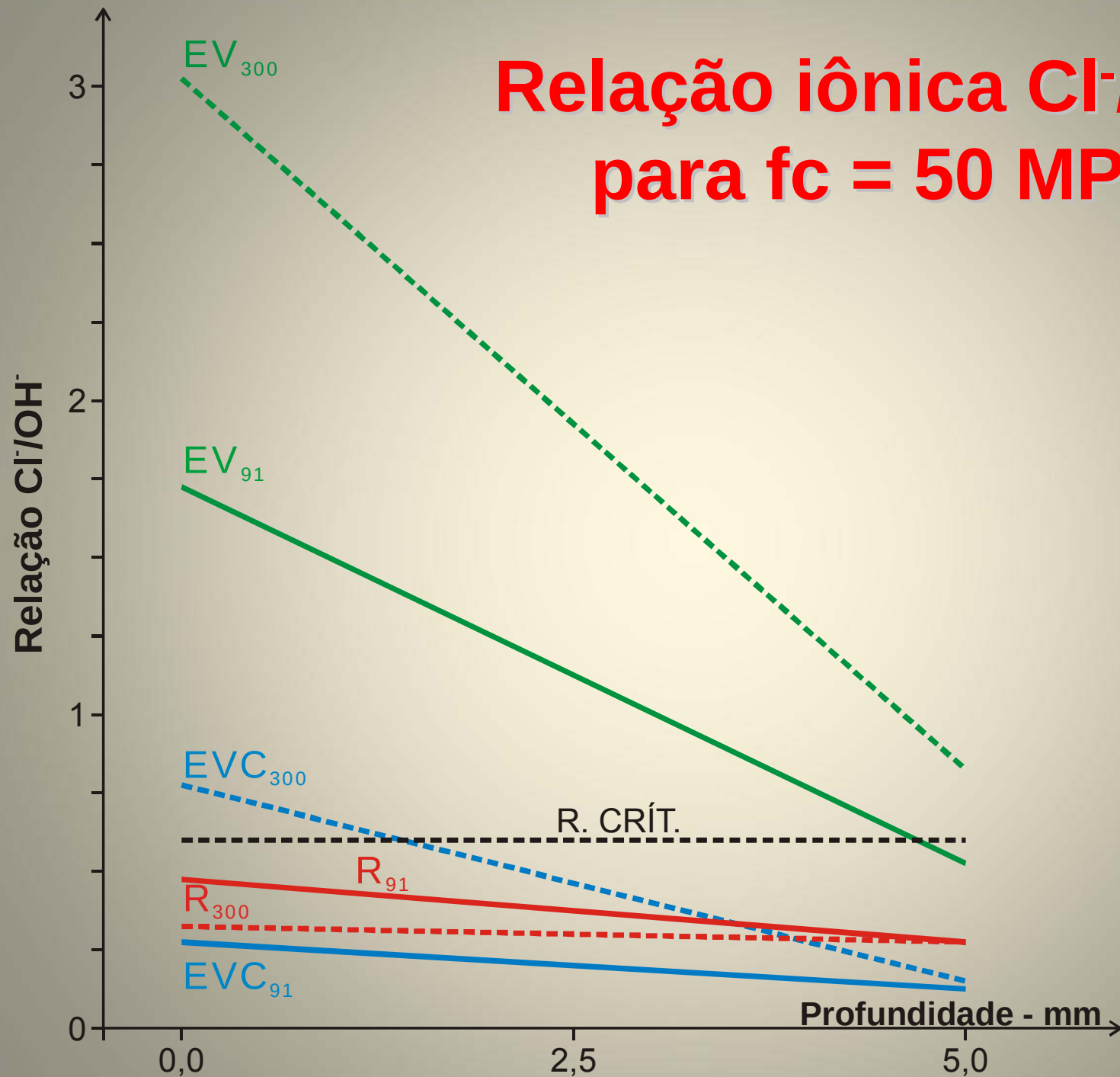
EVC_{300}

Resistência à compressão - MPa

Teor de cloretos x Resistência



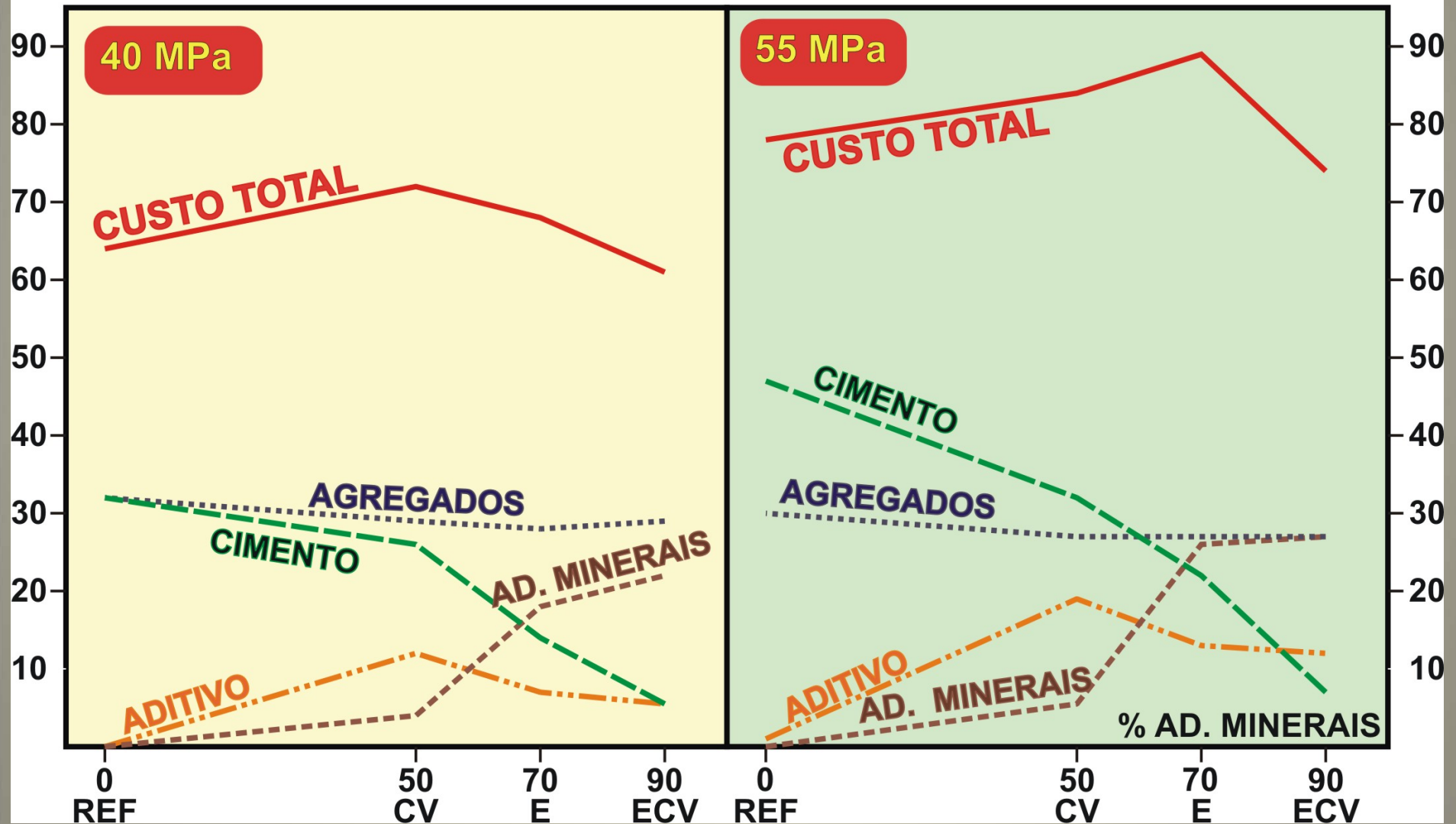
Relação iônica Cl^-/OH^- para $f_c = 50 \text{ MPa}$



Estudo de sustentabilidade: 4º estudo de caso

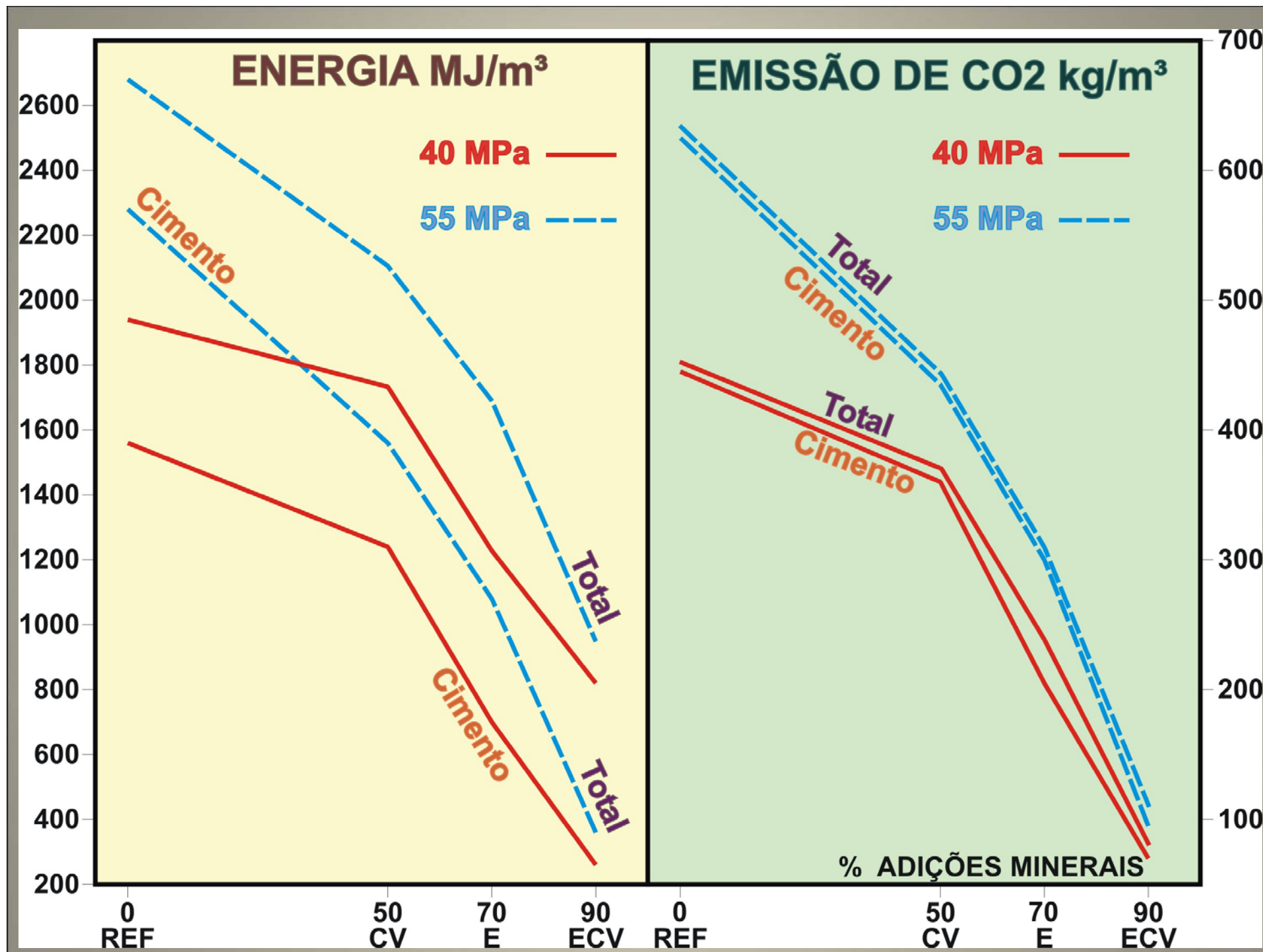
- **Concreto de referência: 100% CP**
- **Cinza volante: 50%**
- **Escória de alto forno: 70%**
- **Escória + cinza volante: 70% + 20%**
- **Ensaio de durabilidade: carbonatação, penetração de cloretos, teor de cloretos retidos e relação Cl^-/OH^-**
- **Análise dos resultados para 40 e 55 MPa**

Custo dos materiais US\$/m³

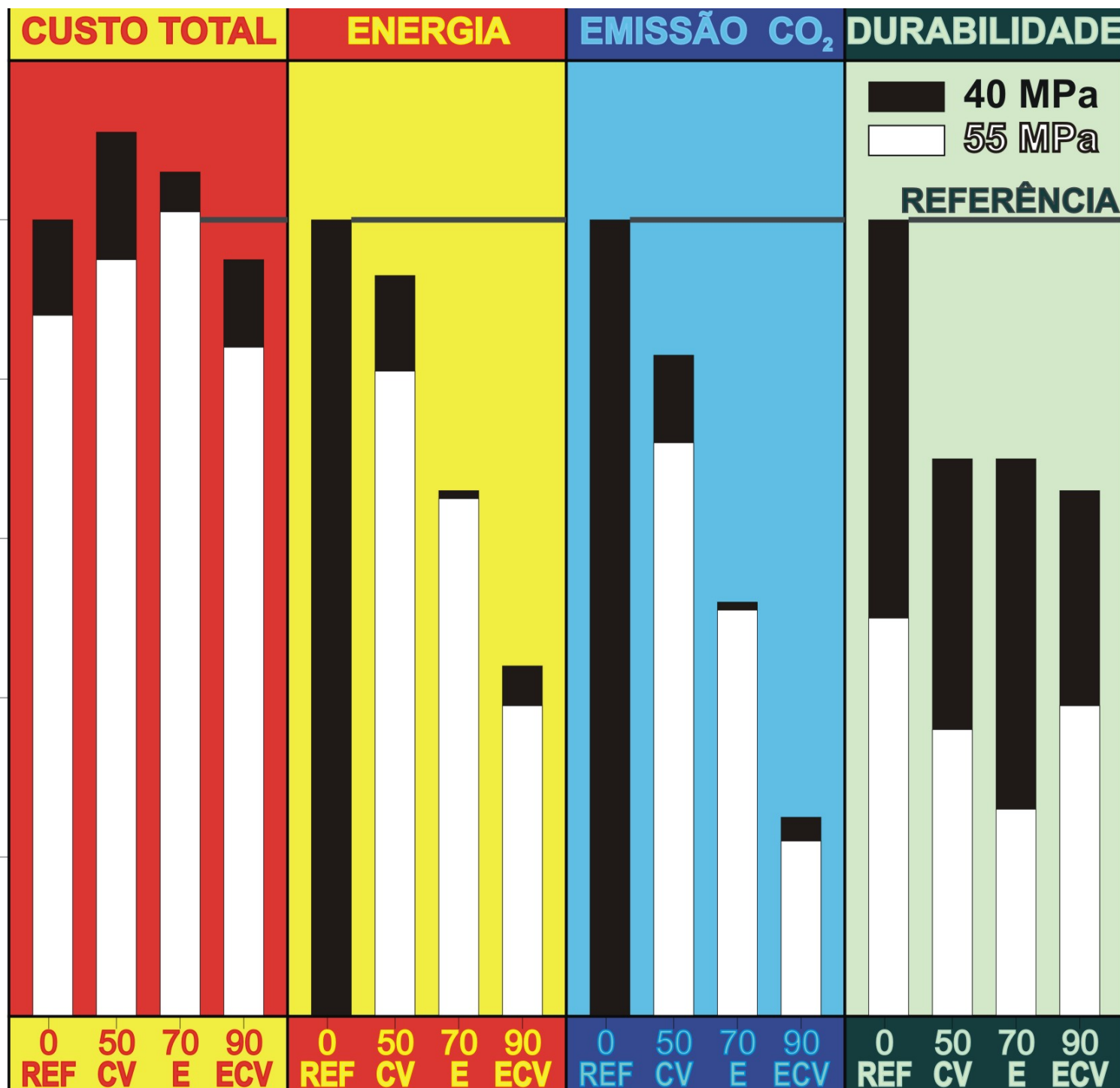


Índices de durabilidade

f_c MPa	Traço	Carbo- natação	Penet Cl ⁻	Cl ⁻ retido	Cl ⁻ / OH ⁻	Indice médio
40	REF	100	100	100	100	100
	90ECV	90	14	78	81	66
55	REF	22	83	100	100	50
	90ECV	70	13	71	63	39



ÍNDICES UNITÁRIO DE DESEMPENHO GLOBAL - I.MPa⁻¹



Diferenças entre os traços REF e 90 ECV

f_c MPa	Cimento kg/m ³	Custo US\$/m ³	Energia MJ/m ³	CO ₂ eq kg/m ³	Durab. índice
40	222 (83%)	3,48 (5%)	1140 (58%)	370 (81%)	34 (34%)
50	338 (85%)	4,04 (5%)	1753 (65%)	523 (83%)	14 (21%)

Ganhos potenciais

- Se 3,5 % (230 Mm³, 2005) da PM de concreto fosse executada com o traço 90ECV, os ganhos seriam:
 - ✓ 78 Mt de cimento (4,4%) = acréscimo anual da PM
 - ✓ 120 Mt de CO_{2eq} (0,5% da P.M)
 - ✓ 0,40 EJ (0,08% PM) = 5,3 Mhab (Dinamarca)
 - ✓ US\$ 1,53 bilhões de lucro (9% s/REF)

Conclusão

- Pelos estudos de caso conclui-se que:
- Os ganhos de durabilidade, de custo e de sustentabilidade são proporcionais ao teor de substituição do CP por adições minerais;
- Concretos de alta resistência (CAD) são mais sustentáveis e econômicos que os de resistência normal;
- Existe viabilidade de substituir-se até 90% do cimento por adições minerais, com adição de cal hidratada, sem prejuízo da durabilidade.