



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

**PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE
BETÕES COM AGREGADOS RECICLADOS
LEVANTAMENTO DO “*STATE-OF-THE-ART*”
EXPERIMENTAL INTERNACIONAL**

Ricardo Amaral Robles

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil**

Júri

Presidente: Doutor Francisco Loforte Ribeiro

Orientador: Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Vogais: Eng^o Arlindo Freitas Gonçalves

Julho de 2007

AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação é o resultado de vários meses de trabalho conjugados com a minha vida pessoal e profissional. Apenas com a enorme disponibilidade, capacidade de resposta e conhecimento científico do orientador deste estudo, o professor Jorge de Brito, do Instituto Superior Técnico, foi possível trilhar este caminho num tão curto espaço de tempo. Por estas razões, o meu agradecimento.

RESUMO

A definição de procedimentos expeditos de previsão do comportamento das propriedades dos betões com agregados reciclados é o principal objectivo do presente estudo. Realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre várias campanhas experimentais internacionais, cujos resultados serviram de base ao estudo. Foram estabelecidas correlações entre algumas propriedades do betão, no estado fresco e endurecido, e a massa volúmica e a absorção de água ponderada dos agregados que constituem a mistura e ainda a resistência à compressão axial aos 7 dias do betão.

A resistência à compressão axial, à tracção por compressão diametral e por flexão, o módulo de elasticidade, a penetração de cloretos, a retracção, a fluência, a carbonatação e a absorção de água foram as propriedades analisadas para o betão no estado endurecido. No estado fresco, foram analisadas a massa volúmica e a trabalhabilidade.

De forma a permitir uma análise comparativa entre as várias campanhas, a análise gráfica foi realizada com base na variação entre relações das propriedades dos betões com agregados reciclados e as dos betões de referência respectivos. A massa volúmica e a absorção de água dos agregados foram sujeitas a um processo de ponderação de forma a que os valores daquelas propriedades representassem a exacta proporção dos agregados reciclados e primários presentes na mistura.

A definição deste procedimento permitirá a previsão da variação das várias propriedades dos betões com agregados reciclados em função dos 3 parâmetros de fácil obtenção acima referidos e, desta forma, viabilizar a massificação da utilização destes agregados, contribuindo efectivamente para a sustentabilidade desta actividade.

Palavras-chave: betão, agregados reciclados, massa volúmica, absorção de água, resíduos de construção e demolição.

ABSTRACT

The definition of expedient procedures in order to estimate the properties of concrete with recycled aggregates is the main objective of this study.

The experimental results used for this research were gathered from international campaigns developed on this subject. With these values, a relationship was established between some of the properties of hardened concrete and the density and water absorption of the aggregates used in the mixture and also the compressive strength of concrete at the age of 7 days.

The properties of hardened concrete with recycled aggregates under analysis were compressive strength, splitting and flexural strength, modulus of elasticity, chloride penetration, shrinkage, creep, carbonation penetration and water absorption. The workability and density were the properties analysed for fresh concrete.

In order to compare all the campaigns, the graphic analyses of each property were not made with absolute values, but instead with the relationship between those for the concrete with recycled aggregates and the one with natural aggregates only. The density and water absorption of all the aggregates in the mixture, for each substitution rate, were calculated in order to represent the exact proportion of each type of aggregates (natural and recycled).

This new method will allow the estimation of the variation of the properties of concrete with recycled aggregates by obtaining the results of the 3 parameters mentioned above. This innovative procedure can contribute to the increase of the use of recycled aggregates in the construction sector and make it a sustainable activity.

Keywords: concrete, recycled aggregates, density, water absorption, construction and demolition waste.

ÍNDICE GERAL

1.	Introdução	1.1
	1.1. Considerações preliminares	1.1
	1.2. Objectivos e metodologia	1.1
	1.3. Organização da dissertação	1.2
2.	Base de dados	2.3
	2.1. Apresentação	2.3
	2.2. Critérios analisados na base de dados	2.4
	2.3. Breve descrição das campanhas analisadas na base de dados	2.5
	2.4. Breve descrição das campanhas analisadas para o presente estudo	2.9
3.	Campanhas experimentais e resultados	3.11
	3.1. Introdução	3.11
	3.1.1. Princípios base assumidos	3.11
	3.1.2. Betão de referência e critérios de família dos BAR	3.12
	3.1.2.1. Campanha de Carrijo	3.12
	3.1.2.2. Campanha de Kou et al	3.12
	3.1.2.3. Campanha de Leite	3.12
	3.1.2.4. Campanha de Soberón	3.13
	3.1.2.5. Campanha de Cervantes et al	3.13
	3.1.2.6. Campanha de Katz	3.13
	3.2. Propriedades dos agregados	3.13
	3.3. Propriedades do betão no estado fresco	3.16
	3.3.1. Massa volúmica	3.16
	3.3.2. Trabalhabilidade	3.17
	3.4. Propriedades do betão no estado endurecido	3.19
	3.4.1. Resistência à compressão	3.19
	3.4.2. Módulo de elasticidade	3.39
	3.4.3. Resistência à tracção por compressão diametral	3.56
	3.4.4. Resistência à tracção por flexão	3.71
	3.4.5. Penetração de cloretos	3.74
	3.4.6. Retracção	3.79
	3.4.7. Absorção de água	3.84
	3.4.8. Fluência	3.86
	3.4.9. Carbonatação	3.88
4.	Conclusões	4.93
	4.1. Considerações finais	4.93
	4.2. Conclusões gerais	4.93
	4.3. Desenvolvimentos futuros	4.111
	Bibliografia	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 3.1 – Relação entre a massa volúmica dos AR e a mesma propriedade do betão fresco	3.17
Fig. 3.2 – Relação entre a taxa de substituição dos AP por AR e a massa volúmica do betão fresco	3.17
Fig. 3.3 – Relação entre a massa volúmica dos AR e o abaixamento do betão fresco	3.18
Fig. 3.4 – Relação entre a massa volúmica dos AR e o teor de aditivo adicionado à mistura	3.18
Fig. 3.6 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” para as várias relações a/c	3.18
Fig. 3.7 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” para as várias categorias de densidades	3.20
Fig. 3.8 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 (à esquerda) e aos 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR, com cura por imersão	3.20
Fig. 3.9 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR, com cura inicial por vapor	3.22
Fig. 3.10 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR	3.22
Fig. 3.11 – Variação da resistência à compressão do betão com a taxa de substituição de AP por AR para as várias idades ensaiadas	3.23
Fig. 3.12 – Variação da relação entre resistências à compressão com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” aos 28 dias	3.23
Fig. 3.13 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR	3.24
Fig. 3.14 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR	3.24
Fig. 3.15 – Variação da relação entre resistências à compressão do betão com a taxa de substituição de AP por AR para as várias idades ensaiadas	3.25
Fig. 3.16 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados “cinza” e “vermelho”	3.26
Fig. 3.17 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.26
Fig. 3.18 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.26
Fig. 3.19 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.27
Fig. 3.20 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.27
Fig. 3.21 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.27
Fig. 3.22 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.28
Fig. 3.23 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.28
Fig. 3.24 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.28
Fig. 3.25 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (0% de cinzas volantes)	3.29

Fig. 3.26 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Carrijo, Leite e Soberón	3.29
Fig. 3.27 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou	3.29
Fig. 3.28 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón	3.30
Fig. 3.29 – Variação da relação entre a resistência à compressão com a massa volúmica	3.30
Fig. 3.30 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados “cinza” e “vermelho”	3.31
Fig. 3.31 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.32
Fig. 3.32 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.32
Fig. 3.33 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	3.32
Fig. 3.34 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.33
Fig. 3.35 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.33
Fig. 3.36 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.33
Fig. 3.37 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.34
Fig. 3.38 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.34
Fig. 3.39 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (0% de cinzas volantes)	3.34
Fig. 3.40 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite e Soberón	3.35
Fig. 3.41 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou	3.35
Fig. 3.42 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón	3.35
Fig. 3.43 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.36
Fig. 3.44 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.36
Fig. 3.45 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.36
Fig. 3.46 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.37
Fig. 3.47 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.37
Fig. 3.48 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.37
Fig. 3.49 - Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.38

Fig. 3.50 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou com 0% de cinzas volantes	3.38
Fig. 3.51 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite e Soberón	3.38
Fig. 3.52 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou	3.39
Fig. 3.53 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón	3.39
Fig. 3.54 – Variação do módulo de elasticidade aos 28 dias do betão com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” para as várias relações a/c	3.40
Fig. 3.55 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho”	3.40
Fig. 3.56 – Variação do módulo de elasticidade do betão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR	3.41
Fig. 3.57 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR	3.42
Fig. 3.58 – Variação do módulo de elasticidade do betão aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR	3.42
Fig. 3.59 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR	3.43
Fig. 3.60 – Variação do módulo de elasticidade do betão aos 28 e 90 dias com a taxa de substituição de AP por AR	3.43
Fig. 3.61 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a taxa de substituição de AP por AR	3.43
Fig. 3.62 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da classe “cinza” e “vermelho”	3.44
Fig. 3.63 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.44
Fig. 3.64 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.44
Fig. 3.65 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.45
Fig. 3.66 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura	3.45
Fig. 3.67 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.45
Fig. 3.68 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.46
Fig. 3.69 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.46
Fig. 3.70 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.46
Fig. 3.71 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou(0% de cinzas volantes)	3.47
Fig. 3.72 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Carrijo, Leite e Soberón	3.47
Fig. 3.73 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou	3.47

Fig. 3.74 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón	3.48
Fig. 3.75 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados da classe “cinza” e “vermelho”	3.48
Fig. 3.76 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.48
Fig. 3.77 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.49
Fig. 3.78 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	3.49
Fig. 3.79 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.49
Fig. 3.80 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados	3.50
Fig. 3.81 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.50
Fig. 3.82 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.50
Fig. 3.83 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.51
Fig. 3.84 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (0% de cinzas volantes)	3.51
Fig. 3.85 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón	3.51
Fig. 3.86 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou	3.52
Fig. 3.87 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón	3.52
Fig. 3.88 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.52
Fig. 3.89 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.53
Fig. 3.90 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.53
Fig. 3.91 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.53
Fig. 3.92 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.54
Fig. 3.93 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.54
Fig. 3.94 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.54
Fig. 3.95 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou com 0% de cinzas volantes	3.55
Fig. 3.96 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite e Soberón	3.55

Fig. 3.97 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou	3.55
Fig. 3.98 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite e Soberón	3.56
Fig. 3.99 – Variação da relação entre o módulo de elasticidade com a resistência à compressão	3.56
Fig. 3.100 – Relação entre a idade do betão e a resistência à tracção por compressão diametral	3.57
Fig. 3.101 – Relação entre a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) e a taxa de substituição de AP por AR	3.57
Fig. 3.102 – Variação da relação de resistências à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR	3.58
Fig. 3.103 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias	3.59
Fig. 3.104 – Variação da relação de resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR	3.59
Fig. 3.105 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias	3.60
Fig. 3.106 – Variação da relação de resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a taxa de substituição de AP por AR	3.60
Fig. 3.107 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.60
Fig. 3.108 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.61
Fig. 3.109 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura	3.61
Fig. 3.110 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.61
Fig. 3.111 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura	3.62
Fig. 3.112 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.62
Fig. 3.113 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura	3.62
Fig. 3.114 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para Leite, Soberón e Kou sem cinzas volantes	3.63
Fig. 3.115 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para Leite, Soberón e Kou et al	3.63
Fig. 3.116 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para Leite e Soberón	3.63
Fig. 3.117 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura dos agregados	3.64
Fig. 3.118 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	3.64
Fig. 3.119 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.64
Fig. 3.120 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	3.65

Fig. 3.121 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.65
Fig. 3.122 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura dos agregados	3.65
Fig. 3.123 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.66
Fig. 3.124 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Leite, Soberón e Kou (sem cinzas volantes)	3.66
Fig. 3.125 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Leite, Soberón e Kou	3.66
Fig. 3.126 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Leite e Soberón	3.67
Fig. 3.127 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.67
Fig. 3.128 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.67
Fig. 3.129 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.68
Fig. 3.130 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.68
Fig. 3.131 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.68
Fig. 3.132 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.69
Fig. 3.133 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.69
Fig. 3.134 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou sem cinzas volantes	3.69
Fig. 3.135 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou	3.70
Fig. 3.136 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite e Soberón	3.70
Fig. 3.137– Variação entre a resistência à tracção por compressão diametral e a resistência à compressão	3.70
Fig. 3.138 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por flexão aos 28 dias	3.71
Fig. 3.139 – Variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR	3.71
Fig. 3.140 – Variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.72
Fig. 3.141 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.72
Fig. 3.142 – Variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	3.72
Fig. 3.143 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	3.73
Fig. 3.144 – Variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.73

Fig. 3.145 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.73
Fig. 3.146 – Variação entre a resistência à tracção por flexão e a resistência à compressão	3.74
Fig. 3.147 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a carga eléctrica que atravessa o betão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita)	3.75
Fig. 3.148 – Variação da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR	3.75
Fig. 3.149 – Variação da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.75
Fig. 3.150 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura	3.76
Fig. 3.151 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados	3.76
Fig. 3.152 – Variação da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura dos agregados	3.77
Fig. 3.153 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.77
Fig. 3.154 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados	3.77
Fig. 3.155 – Variação da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.78
Fig. 3.156 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.78
Fig. 3.157 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão	3.78
Fig. 3.158 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a retracção aos 28 dias	3.79
Fig. 3.159 – Variação da relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a relação entre retracções aos 28 dias	3.80
Fig. 3.160 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a retracção aos 90 dias	3.80
Fig. 3.161 – Variação da relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a relação entre retracções aos 90 dias	3.81
Fig. 3.162 – Variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre retracções aos 28 dias	3.81
Fig. 3.163 – Resumo da variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre retracções aos 28 dias	3.81
Fig. 3.164 – Variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre retracções aos 90 dias	3.82
Fig. 3.165 – Resumo da variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre retracções aos 28 e 90 dias para as campanhas de Soberón e Cervantes	3.82
Fig. 3.166 – Variação da relação entre absorções de água ponderadas com a relação entre retracções aos 28 dias	3.82
Fig. 3.167 – Resumo da variação da relação entre absorções de água ponderadas com a relação entre retracções aos 28 dias	3.83
Fig. 3.168 – Variação da relação entre absorções de água ponderadas com a relação entre retracções aos 90 dias	3.83
Fig. 3.169 – Resumo da variação da relação entre absorções de água ponderadas com a relação entre retracções aos 28 e 90 dias para as campanhas de Soberón e Cervantes	3.83
Fig. 3.170 – Variação da relação entre resistências à compressão com a relação entre retracções aos 90 dias	3.84
Fig. 3.171 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a absorção de água aos 28 dias	3.84
Fig. 3.172 – Variação da relação entre absorções de água aos 28 dias e a taxa de substituição de AP por AR	3.85
Fig. 3.173 – Variação da relação entre absorções de água aos 28 dias do betão com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura	3.85
Fig. 3.174 – Variação da relação entre absorções de água aos 28 dias do betão com a relação entre absorções ponderadas dos agregados da mistura	3.85

Fig. 3.175 – Variação da relação entre absorções de água aos 28 dias do betão com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.86
Fig. 3.176 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e o coeficiente de fluência aos 90 dias	3.87
Fig. 3.177 – Variação da relação entre coeficientes de fluência aos 90 dias e a taxa de substituição de AP por AR	3.87
Fig. 3.178 – Variação da relação entre coeficientes de fluência aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura	3.87
Fig. 3.179 – Variação da relação entre coeficientes de fluência aos 90 dias com a relação entre absorções ponderadas dos agregados da mistura	3.88
Fig. 3.180 – Variação da relação entre coeficientes de fluência aos 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.88
Fig. 3.181 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a profundidade de carbonatação aos 7 dias	3.89
Fig. 3.182 – Variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias e a taxa de substituição de AP por AR	3.90
Fig. 3.183 – Variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura	3.90
Fig. 3.184 – Resumo da variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias	3.90
Fig. 3.185 – Variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.91
Fig. 3.186 – Resumo da variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura	3.91
Fig. 3.187 – Variação da relação entre profundidades de carbonatação com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.91
Fig. 3.188 – Resumo da variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias	3.92
Fig. 4.1 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.95
Fig. 4.2 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.95
Fig. 4.3 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.95
Fig. 4.4 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.96
Fig. 4.5 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.96
Fig. 4.6 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.96
Fig. 4.7 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Leite, Soberón e Kou	4.97
Fig. 4.8 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Leite, Soberón e Kou	4.97
Fig. 4.9 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Leite, Soberón e Kou	4.97

Fig. 4.10 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Kou, Soberón, Carrijo e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)	4.98
Fig. 4.11 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Kou e Soberón	4.98
Fig. 4.12 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.98
Fig. 4.13 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Soberón e Kou	4.99
Fig. 4.14 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Kou, Soberón, Carrijo e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)	4.99
Fig. 4.15 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Kou e Soberón	4.99
Fig. 4.16 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón, Carrijo e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.100
Fig. 4.17 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Soberón e Kou	4.100
Fig. 4.18 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou, Soberón e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)	4.100
Fig. 4.19 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou e Soberón	4.101
Fig. 4.20 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Leite, Soberón e Kou	4.101
Fig. 4.21 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Soberón e Kou	4.101
Fig. 4.22 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.102
Fig. 4.23 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.102
Fig. 4.24 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias e a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.102
Fig. 4.25 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.103
Fig. 4.26 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 90 dias e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.103
Fig. 4.27 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)	4.103

Fig. 4.28 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou, Soberón e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)	4.104
Fig. 4.29 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 90 dias com a relação entre resistências aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou, Soberón e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)	4.104
Fig. 4.30 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou, Soberón e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)	4.104
Fig. 4.31 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Leite	4.105
Fig. 4.32 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Kou	4.105
Fig. 4.33 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Kou	4.105
Fig. 4.34 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Kou	4.106
Fig. 4.35 – Variação da relação entre retracções aos 28 (à esquerda) e aos 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Cervantes e Soberón	4.106
Fig. 4.36 – Variação da relação entre retracções aos 28 e aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Cervantes e Soberón	4.106
Fig. 4.37 – Variação da relação entre retracções aos 28 (à esquerda) e aos 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Cervantes e Soberón	4.107
Fig. 4.38 – Variação da relação entre retracções aos 28 e aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Cervantes e Soberón	4.107
Fig. 4.39 – Variação da relação entre retracções aos 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão na campanhas de Soberón	4.107
Fig. 4.40 – Resumo da variação da relação entre absorções de água com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Soberón	4.108
Fig. 4.41 – Resumo da variação da relação entre fluências com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) dos agregados e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Soberón	4.108
Fig. 4.42 – Resumo da variação da relação entre carbonatações com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Katz	4.108

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Classificação qualitativa dos coeficientes de correlação	3.11
Quadro 3.2 – Propriedades dos agregados primários utilizados na produção do BR	3.12
Quadro 3.3 – Percentagem de cada fase de componentes dos AR grossos identificados como “cinza” e “vermelho”, separados por densidades	3.14
Quadro 3.4 – Propriedades dos agregados utilizados	3.14
Quadro 3.5 – Propriedades dos agregados utilizados	3.15
Quadro 3.6 – Propriedades dos agregados utilizados	3.15
Quadro 3.7 – Propriedades dos agregados utilizados	3.15
Quadro 3.8 – Propriedades dos agregados utilizados	3.16
Quadro 3.9 – Propriedades dos agregados utilizados	3.16
Quadro 3.10 – Resistência à compressão axial dos betões aos 28 dias	3.19
Quadro 3.11 – Redução média da resistência à compressão do BAR relativamente ao BR	3.20
Quadro 3.12 – Resistência à compressão axial para várias idades e tipos de cura do betão	3.21
Quadro 3.13 – Resistência à compressão axial para as várias idades ensaiadas	3.22
Quadro 3.14 – Resistência à compressão axial para as várias idades ensaiadas	3.23
Quadro 3.15 – Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias	3.39
Quadro 3.16 – Redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do BAR relativamente ao BR para as categorias de agregados inferiores a 2,2 g/cm ³	3.40
Quadro 3.17 – Módulo de elasticidade do betão	3.41
Quadro 3.18 – Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias	3.42
Quadro 3.19 – Módulo de elasticidade do betão aos 7, 28 e 90 dias	3.43
Quadro 3.20 – Tracção por compressão diametral para as várias idades ensaiadas e curas	3.57
Quadro 3.21 – Comparação entre a variação de resistência à tracção por compressão diametral e a de compressão aos 28 dias	3.58
Quadro 3.22 – Resistência à tracção por compressão diametral, f_{ct} , aos 28 dias	3.58
Quadro 3.23 – Resistência à tracção por compressão diametral, f_{ct}	3.59
Quadro 3.24 – Resistência à tracção por flexão, f_{ft} , aos 28 dias	3.71
Quadro 3.25 – Carga eléctrica medida no atravessamento de betões	3.74
Quadro 3.25 – Valores experimentais obtidos na retracção por secagem aos 28 dias	3.79
Quadro 3.26 – Valores experimentais obtidos na retracção por secagem aos 90 dias	3.80
Quadro 3.27 – Valores experimentais obtidos para a absorção de água aos 28 dias	3.84
Quadro 3.28 – Valores experimentais obtidos para o coeficiente de fluência aos 90 dias	3.86
Quadro 3.29 – Valores experimentais obtidos para a profundidade de carbonatação aos 7 dias	3.89
Quadro 4.1 - Resumo de correlações das várias propriedades com massas volúmicas e absorções de água dos agregados da mistura e resistência à compressão aos 7 dias do betão	4.110

Abreviaturas

AFR – agregados finos reciclados;

AGR – agregados grossos reciclados;

AP – agregados primários ou naturais;

AR – agregados reciclados;

BAGR – betão fabricado com agregados grossos reciclados

BAR – betão fabricado com incorporação total ou parcial de agregados reciclados;

BR – betão de referência fabricado sem agregados reciclados;

RCD – resíduos de construção e demolição.

1. Introdução

1.1 Considerações preliminares

A indústria da construção é um dos sectores da economia com maior responsabilidade pelo consumo de recursos naturais e pela geração de resíduos. Dentro deste sector, as actividades relacionadas com a utilização de betão, desde a fabricação até à demolição, assumem um papel preponderante.

Segundo a organização norte-americana, Strategic Development Council (2002), cerca de 6 mil milhões de toneladas de betão são produzidas todos os anos, o que equivale a 1 tonelada por cada habitante do planeta. Para garantir estes níveis de consumo de betão, são necessárias quantidades equivalentes de materiais que, nos processos “tradicionais” de produção, são recursos naturais limitados e não renováveis, como areias, gravilha e outros agregados, na sua maioria provenientes de pedreiras. Por outro lado, a demolição de estruturas existentes provoca igualmente um impacto ambiental considerável. Como referem Masood et al (2001), estima-se que os resíduos de demolição de betão na União Europeia e nos Estados Unidos da América atingem cerca de 100 milhões de toneladas por ano. O destino a dar a estes resíduos é actualmente uma das maiores dificuldades e preocupações dos intervenientes no sector da construção, atendendo aos elevados custos de aterro e transporte e à escassez de locais próprios para a recepção destes materiais.

O cruzamento da necessidade de matérias-primas, cada vez mais escassas, para a produção de betão com a geração contínua de grandes quantidades de resíduos de construção e demolição levou ao desenvolvimento de estudos e tecnologias de execução de betão com agregados reciclados.

Na área de produção de betão, existe ainda um longo caminho a percorrer no sentido da sustentabilidade da actividade. A utilização de agregados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) em bases e sub-bases de pavimentos é a forma mais comum de reaproveitamento deste material. Embora seja considerada uma forma de reutilização de resíduos, esta não constitui a melhor valorização económica do recurso, tornando-se assim um processo de “downcycling” e de depreciação das capacidades deste material, segundo a opinião de muitos investigadores e partilhada pelo autor desta dissertação. Por outro lado, a fabricação de betão estrutural com agregados reciclados (AR) apresenta grandes potencialidades e proporciona uma efectiva reciclagem dos materiais. Nesse sentido, o presente estudo centra-se no levantamento de campanhas experimentais sobre betões com agregados reciclados (BAR) realizadas por investigadores em diversos países do mundo e no tratamento, sobretudo a nível estatístico e gráfico, da informação publicada, na tentativa de correlacionar as propriedades dos BAR com as propriedades dos AR utilizados em substituição dos agregados primários (AP). Finalmente, é também realizada a sistematização da informação recolhida e a interpretação de alguns dos resultados obtidos nessas campanhas no campo do betão estrutural.

A presente dissertação restringe-se à análise de resultados obtidos por investigadores estrangeiros em instituições de diversos países. Em paralelo com este estudo, decorre outro semelhante dedicado apenas às várias campanhas desenvolvidas em Portugal nos últimos anos, nomeadamente no Instituto Superior Técnico que, dispõe de resultados experimentais variados e muito bem documentados. A metodologia e os objectivos serão coincidentes em ambas as dissertações.

1.2 Objectivos e metodologia

Os estudos desenvolvidos sobre a utilização de AR na fabricação de betão têm demonstrado, de forma geral, uma diminuição das propriedades mecânicas e de durabilidade, quando comparadas com as de um betão com AP, com as mesmas características (composição, condições de cura, classe de resistência, etc.). Está também generalizada a conclusão de que quanto maior for a taxa de substituição dos AP por AR, maiores serão as diferenças de propriedades entre o BAR e o betão de referência (BR), isto é, sem agregados reciclados. Para melhor compreender o comportamento dos BAR no estado fresco e no estado endurecido, a presente dissertação propõe-se recolher dados experimentais de várias campanhas internacionais e, através destes, correlacionar algumas propriedades dos agregados (massa volúmica e absorção de água) e a resistência à compressão axial aos 7 dias com as propriedades dos BAR mais relevantes. Esta forma de abordagem não é absolutamente nova, atendendo a que as campanhas experimentais sobre BAR, normalmente, englobam o estudo das propriedades dos AR. No estudo de Limbachiya et al (2000) sobre betões de elevado desempenho com AR, os autores iniciam o ponto das conclusões caracterizando os AR utilizados quanto à massa volúmica e à absorção de água, relacionando estas propriedades com as dos AP. Salientam também que os AR provenientes de diferentes origens deverão ser analisados independentemente.

De facto, a massa volúmica e a absorção de água permitem caracterizar os agregados e diferenciá-los quanto à sua origem, visto que normalmente os AR apresentam valores de massa volúmica inferiores e de absorção de água muito superiores relativamente aos AP. A elevada absorção dos AR provenientes de betão justifica-se com a maior porosidade da pasta endurecida aderida às partículas, dependendo também do tipo de betão de origem e da respectiva relação água / cimento. A absorção de água dos agregados aumenta com a diminuição da granulometria, atendendo ao aumento da superfície específica das partículas. Existe também um incremento da absorção de água entre os AR de betão e os AR de base cerâmica. O tipo de britagem empregue influenciou também na capacidade de absorção dos AR, uma vez que condiciona a quantidade de argamassa aderida que é libertada durante a britagem. Para estabelecer correlações entre as propriedades dos BAR e a massa volúmica e a absorção de água dos agregados introduzidos na mistura e a resistência à compressão aos 7 dias do betão, foi estabelecida uma metodologia de análise gráfica que seguiu os seguintes passos:

- análise e organização dos dados disponibilizados por cada campanha experimental, incluindo as propriedades ensaiadas dos AP, dos AR e dos BAR;
- através do estudo de composição dos betões (BR e BAR) e das propriedades dos agregados, obtenção dos valores da massa volúmica e absorção de água ponderada dos agregados (AR e AP) incluídos na mistura;
- composição gráfica da relação entre a taxa de substituição de AP por AR e as propriedades do betão;
- composição gráfica da variação da relação entre propriedades do BR com os BAR e a taxa de substituição de AP por AR;
- composição gráfica da variação da relação entre propriedades do BR com as dos BAR e a relação entre massas volúmicas ponderadas da mistura dos agregados do BR com a dos BAR;
- composição gráfica da variação da relação entre propriedades do BR com as dos BAR e a relação entre absorções de água ponderadas da mistura dos agregados do BR com a dos BAR;
- composição gráfica da variação da relação entre propriedades do BR com as dos BAR e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do BR com a dos BAR;
- sobreposição dos resultados gráficos de cada propriedade obtidos para as várias campanhas analisadas e obtenção de rectas de regressão linear com representação dos respectivos coeficientes de correlação;
- correcção de posicionamento das rectas de regressão linear obtidas, de forma a que estas sejam representativas do comportamento físico em análise, para que passassem no ponto correspondente ao betão de referência, tendo no entanto como inconveniente o decréscimo do valor do coeficiente de correlação respectivo;
- compilação da informação em quadro resumo, incluindo o declive de cada recta de regressão linear e os respectivos coeficientes de correlação.

1.3 Organização da dissertação

A apresentação do presente estudo está dividida em quatro capítulos, nos quais se inclui a introdução agora exposta com a definição dos objectivos principais e da metodologia adoptada.

No segundo capítulo, é apresentado o levantamento realizado às campanhas experimentais internacionais e a organização desta informação numa base de dados própria. É também realizado comentário à heterogeneidade de procedimentos experimentais encontrados e aos critérios adoptados na selecção de campanhas para a presente dissertação.

No terceiro capítulo, é realizado o desenvolvimento da análise dos valores experimentais recolhidos nas várias campanhas. Os resultados são apresentados graficamente para cada propriedade dos BAR. Dentro de cada propriedade, as campanhas são primeiro analisadas de forma individual e posteriormente sujeitas a um resumo que implica a sobreposição dos valores de todas as campanhas. Atendendo ao facto de as campanhas experimentais não serem coincidentes em todos os parâmetros, os gráficos resumo, com a sobreposição de várias campanhas, são alvo de análises múltiplas mediante o critério de comparação adoptado (como por exemplo a idade de execução do ensaio). Foi também estabelecido um critério qualitativo para a classificação do coeficiente de correlação correspondente à curva de regressão linear de cada representação gráfica. No quarto capítulo, são apresentados os resultados finais e as respectivas conclusões. Nesta fase, as variantes de cada campanha são restringidas ao conjunto de resultados considerados comparáveis entre si. Por último são apresentados os anexos com a base de dados das várias campanhas, as fichas descritivas das campanhas experimentais analisadas e a listagem com as publicações a que não foi possível aceder.

2. Base de dados

2.1 Apresentação

A presente dissertação iniciou-se através de pesquisa bibliográfica dentro da temática dos BAR e, em particular, de campanhas experimentais realizadas internacionalmente com publicação de resultados. Pelo seu carácter internacional, esta pesquisa foi principalmente realizada através de motores de busca na *Internet*. A consulta de campanhas experimentais estendeu-se também a artigos em revistas científicas, a compilações de artigos em conferências e seminários, teses de final de curso, mestrado e doutoramento. Atendendo à falta, ou à não publicação, de resultados, foram igualmente tentados alguns contactos, por correio electrónico, com autores de várias campanhas no sentido de esclarecer e/ou obter informação suplementar, não tendo sido fornecida qualquer resposta na maioria dos casos.

Uma das fontes privilegiadas de informação para esta recolha foi o sítio da Universidade de São Paulo, nomeadamente a secção de “resíduos da construção”. Destaca-se esta fonte, das restantes utilizadas, pela qualidade e quantidade de informação disponibilizada (dissertações de final de curso, teses de mestrado e de doutoramento, artigos técnicos). Infelizmente, a maioria dos centros de investigação não possuiu e/ou, não adopta o mesmo procedimento de divulgação deste conhecimento científico, dificultando a pesquisa de outros investigadores da mesma área. Durante a pesquisa em motores de busca na *Internet*, constatou-se que a maioria dos artigos científicos está apenas disponível comercialmente. Perante esta dificuldade, foi realizada uma listagem de artigos que, através da leitura dos respectivos resumos, demonstraram enquadrar-se na presente temática. Esta listagem é apresentada conjuntamente com a base de dados.

Esta pesquisa orientou-se por critérios que permitissem, dentro do prazo definido, a recolha de informação adequada ao estudo em questão. Desse conjunto de critérios, destacam-se os seguintes:

- o disponibilidade de valores de ensaios realizados aos AR, em particular de absorção de água e de massa volúmica;
- o disponibilidade de valores experimentais relativos ao maior número de propriedades do betão no estado fresco e endurecido (tanto mecânicas como de durabilidade), em particular a resistência à compressão axial aos 7 dias;
- o maior número de diferentes taxas de substituição de AP por AR;
- o maior número de parâmetros fixos (relação a/c, composição granulométrica, trabalhabilidade, tipo de cura, entre outros) no processo experimental de execução dos BAR;
- o existência de um betão de referência, sendo este um critério eliminatório;

Das campanhas analisadas, apenas um pequeno grupo foi considerado apto para o tratamento da informação, visto que a maioria das campanhas não verificava algumas, ou em certos casos a maioria, das condições enumeradas.

Destaca-se uma tendência de investigação nas campanhas experimentais internacionais de comparação de BAR com BR mantendo a mesma capacidade de resistência à compressão através do incremento da quantidade de cimento ou, de forma análoga, ajustes na relação a/c. Infelizmente, campanhas experimentais muito interessantes e completas (com inúmeros ensaios aos BAR no estado fresco e endurecido), como as de Limbachiya et al (2000), Latterza e Eloy (2003), Levy (2001), Etxeberria et al (2004) e Larrañaga (2004), englobam-se nesta categoria, em que o estudo de composição dos betões foi realizado de forma a que a resistência à compressão do betão fosse mantida constante após o processo de substituição dos agregados. Este tipo de procedimento dificulta a aferição rigorosa da influência da taxa de substituição de AP por AR, e das diferentes origens dos AR, atendendo a que os betões em questão deixam de ser directamente comparáveis. Não é possível distinguir com precisão o efeito de uma determinada variável porque existem outros parâmetros alterados.

Outro dos pontos registados negativamente relaciona-se com a falta de especificação das normas ou procedimentos adoptados em cada um dos ensaios realizados. Sobretudo nos artigos científicos, por serem menos extensos e descritivos sobre o processo experimental, esta lacuna de informação dificulta muito a análise das campanhas, inviabilizando por vezes uma análise rigorosa dos resultados. Um dos exemplos mais frequentes é a especificação sobre o estado de humidade dos agregados na medição da massa volúmica.

Em alguns dos documentos analisados, a apresentação dos resultados realizou-se apenas graficamente, dificultando, ou mesmo anulando, a possibilidade de tratamento dos dados neste estudo.

Concluído o processo de pesquisa, e através da análise desta amostra de campanhas recolhidas, destaca-se o reduzido número de campanhas experimentais centradas exclusivamente na análise do comportamento de BAR com substituição dos agregados finos. Apenas a campanha de Khatib (2004) aborda exclusivamente a influência da substituição deste tipo de AR na variação da resistência à compressão axial, da massa volúmica no estado endurecido, da propagação de ultra-sons, do módulo de elasticidade e da retracção. Constatou-se também que a maioria das campanhas experimentais se debruça sobre os estudos dos AR de betão, da mistura de betão com cerâmicos ou de misturas indiferenciadas (recolhidas sem critério de selecção relevante dos locais de demolição). O número de estudos sobre AR de origem exclusivamente cerâmica é muito reduzido e, por essa razão, deveria ser mais aprofundado, atendendo à elevada percentagem de resíduos com estas características (provenientes na maioria dos casos da construção e demolição de alvenarias, coberturas e alguns revestimentos) e pelas suas propriedades mais desfavoráveis à sua utilização, nomeadamente a massa volúmica e absorção de água.

2.2 Critérios analisados na base de dados

A apresentação da informação na base de dados foi organizada de forma a permitir uma fácil leitura e percepção dos principais pontos abordados em cada campanha experimental. Pretende-se que este documento caracterize cada uma das campanhas, nos seus pontos mais importantes, nomeadamente:

- a origem dos AR que analisa: apenas de betão, cerâmicos, dos dois tipos ou ainda indiferenciados;
- a granulometria dos agregados substituídos: grossos, finos ou ambos;
- os parâmetros fixos, ou seja, os critérios de produção que se mantém inalterados em todas as famílias de betões ensaiados (exemplos: a relação a/c, a composição granulométrica, a resistência à compressão axial, o traço em massa ou volume, a trabalhabilidade, a quantidade de cimento, entre outros);
- os parâmetros variáveis, ou seja, os critérios que definem as famílias dos BAR e sobre os quais recai o estudo de variação das propriedades do betão no estado fresco e/ou endurecido (exemplos: a taxa de substituição de AP por AR, a relação a/c, a quantidade de cinzas volantes ou fibras sintéticas adicionadas, o tipo de cura utilizado, a massa volúmica dos AR, a idade de britagem dos AR, o tipo de cimento, o tratamento superficial dos AR, a idade dos ensaios, entre outras);
- os ensaios realizados aos agregados (exemplos: a massa volúmica, a absorção de água, a resistência à abrasão, a quantidade de água retida, a composição granulométrica, o módulo de finura, a resistência à compressão, a baridade, a resistência aos ciclos gelo-degelo, o coeficiente de forma, entre outros);
- os ensaios realizados ao betão no estado fresco (exemplos: a trabalhabilidade, a massa volúmica, a exsudação e a quantidade de ar retida no interior);
- os ensaios realizados ao betão no estado endurecido (exemplos: a resistência à penetração de cloretos, à abrasão, à compressão axial, à tracção por flexão ou por compressão diametral, à abrasão, à carbonatação, a fluência, a absorção de água, a massa volúmica, a retracção, a porosidade, a permeabilidade, entre outros);

Os ensaios aos agregados e ao betão, no estado fresco e endurecido, são assinalados com a norma correspondente ou procedimento seguido na campanha experimental, sempre que essa informação é disponibilizada pelo(s) autor(es).

Apesar da grande diferença entre as campanhas experimentais se registar no critério dos parâmetros variáveis, originando assim as diferentes famílias dos BAR, a utilização desses resultados para este estudo é sempre possível, dada a capacidade de comparação dos resultados entre as “famílias de referência” das várias campanhas. Assim, e assumindo como exemplo a campanha de Kou et al (2004), a criação de várias famílias com diferentes teores de adição de cinzas volantes permitiu a análise dos resultados no contexto singular da campanha referida (entre todas as famílias desta campanha) e na comparação com outras campanhas privilegiou-se a família sem adição de cinzas volantes. Este procedimento poderia adoptar-se para a campanha de Tsujino et al (2007), com as várias famílias com diferentes níveis de tratamento superficial dos agregados, na campanha de Cervantes et al (2007) com a adição de fibras sintéticas, com a de Katz (2003) com diferentes tipos de cimento ou ainda com a de Buttler (2003) com as diferentes idades de britagem dos AR.

A concretização da base de dados decorre do processo de recolha de informação para a elaboração da presente dissertação e da necessidade de organização da informação obtida de forma a permitir uma rápida consulta para futuras investi-

gações. A utilidade futura desta compilação só poderá manter-se, se a mesma for continuamente actualizada com nova informação por outros investigadores.

2.3 Breve descrição das campanhas apenas incluídas na base de dados

As diversas referências apresentadas na base de dados foram alvo de análise e serão de seguida sumariamente descritas. A campanha experimental de Latterza e Machado (2003), intitulada “Concreto com agregado graúdo reciclado: propriedades no estado fresco e endurecido e aplicação em pré-moldados leves”, analisou a influência de taxas de substituição da fracção grossa de AP por AR de 50 e 100% na massa volúmica e trabalhabilidade do betão no estado fresco e as resistências à compressão axial, à abrasão, à tracção por compressão diametral e por flexão e o módulo de elasticidade do betão no estado endurecido. No processo de produção dos BAR, a variação da quantidade de cimento e a diferença de curvas granulométricas entre os AR e os AP conduziram a uma melhoria generalizada das propriedades em análise, apesar do aumento da taxa de substituição de AP por AR.

Na referência de Bodin e Zaharieva (2002), “Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete”, os AR utilizados foram de origem heterogénea e de granulometria fina e grossa. A taxa de substituição adoptada foi de 0 e 100%. Apesar de a quantidade de cimento ser um factor constante na produção dos betões, nesta campanha, a quantidade de água adicionada variou muito, resultando em relações a/c entre 0,43 e 0,66, inviabilizando a comparação directa dos betões. Foram adoptados dois processos de cura, um por imersão em água e outro em câmara com temperatura e humidade controlada (65%). Foram analisadas as seguintes propriedades: trabalhabilidade e massa volúmica no estado fresco e absorção de água, permeabilidade, retracção, resistência à compressão axial e à carbonatação no estado endurecido.

Wainwright et al (1994) analisaram, no artigo intitulado “Modifying the performance of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates”, a influência simultânea dos AR, de betão, finos e grossos na resistência à compressão axial, permeabilidade e porosidade dos BAR. Substituem também parte (10 e 30%) dos AR finos por cinzas de combustível provenientes de uma central eléctrica. A variação da relação a/c e a indisponibilidade de informação sobre o estudo de composição dos betões e das propriedades dos AR e dos AP inviabilizaram a utilização desta campanha no presente estudo.

Na campanha de Merlet e Pimienta (1993), documentada no artigo “Mechanical and physico-chemical properties of concrete produced with coarse and fine recycled concrete aggregates”, foram ensaiadas a resistência à compressão axial, à tracção por compressão diametral, à carbonatação, aos ciclos gelo-degelo, o módulo de elasticidade, a retracção e a absorção de água. Nesta campanha, os AR utilizados são de betão e com granulometria fina e grossa. Foram também realizados dois tipos de cura (por imersão e em câmara de cura com humidade e temperatura controladas). A relação a/c é um dos critérios variáveis na produção dos BAR e que inviabiliza a inclusão desta campanha no presente estudo.

No artigo “Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes”, de Olorunsogo e Padayachee (2001), foi analisada a influência de taxas de substituição de 50 e 100% de AP grossos por AR (de betão e de origem cerâmica) nas seguintes propriedades do betão endurecido: resistência à difusão de cloretos, absorção de água e permeabilidade. Nesta campanha, a quantidade de água e de cimento nas misturas foram consideradas constantes. No entanto, a campanha não foi considerada no presente estudo porque a absorção de água dos agregados não foi ensaiada e a massa volúmica dos AR e dos AP eram praticamente iguais, com os valores de 2,60 e 2,61, respectivamente.

O artigo “Utilisation de l’absorption d’eau des bétons comme critères de leur durabilité - application aux bétons de granulats recyclés”, da autoria de Wirquin et al (2000), foi centrado na análise da absorção de água do betão no estado endurecido. Os autores não mencionam as propriedades dos agregados utilizados (tanto AR como AP) e os resultados experimentais são apresentados apenas graficamente. A substituição de AP por AR foi realizada nas fracções fina e grossa e somente para taxas de 0 e 100%.

Na campanha experimental de Sago-Crentsil et al (2000), descrita no título “Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate”, foram analisadas as resistências à compressão axial, à flexão por compressão diametral e à abrasão, a retracção, a carbonatação e a absorção de água. No estado fresco, os ensaios recaíram sobre a trabalhabilidade, massa volúmica e quantidade de ar aprisionado no interior do betão. Apesar de se

tratar de uma campanha variada em termos de ensaios e bem documentada, é limitada pelo facto de só dispor de taxa de substituição de 0 e 100% e, por outro lado, apresentar uma relação a/c variável.

Fraaij et al (2002) apresentaram, no artigo “Performance of concrete with recycled aggregates”, diversos ensaios, centrados nas propriedades relacionadas com a durabilidade dos BAR. Foram realizados ensaios à penetração de cloretos, aos ciclos gelo-degelo, à retracção e à fluência. Nesta campanha, optou-se por manter constante a quantidade de cimento e variar a quantidade de água adicionada. Este facto, aliado à indisponibilidade de valores relativos às propriedades dos agregados (AR e AP), inviabilizou a utilização destes resultados no presente estudo.

O estudo realizado por Lin et al (2004), publicado no artigo “An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates”, abordou numa perspectiva estatística a melhor ponderação de quantidades na mistura dos agregados. Os ensaios centraram-se apenas na trabalhabilidade e na resistência à compressão axial. O procedimento experimental adoptado não previu a execução de um BR, pelo que esta campanha não pôde ser utilizada no presente estudo.

O estudo da influência dos AR na produção de betões de elevado desempenho foi abordado por Limbachiya et al (2000) no artigo “Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete”. Nesta campanha, são utilizados os AR de betão em duas granulometrias distintas da fracção grossa (10-5 e 20-10 mm). Os autores optaram por desenvolver o estudo com o critério de manter a mesma classe de resistência à compressão após a substituição de AR por AP, usando para isso diferentes relações a/c. Foram realizados ensaios à resistência à flexão, à penetração de cloretos, aos ciclos gelo-degelo, à abrasão, ao módulo de elasticidade, à retracção, à fluência, à carbonatação e à permeabilidade. Concluíram os autores que, na generalidade das propriedades mecânicas, os AR grossos de betão podem ser utilizados na produção de betões de elevado desempenho. Relativamente às propriedades de durabilidade, nomeadamente a fluência e a retracção, os resultados não são tão satisfatórios.

A tese de doutoramento de Levy (2001), com o título “Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria”, debruçou-se sobre a influência de AR de origem cerâmica e de betão, de granulometria grossa e fina, nos BAR. Os ensaios realizados incidiram sobre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade e, relativamente à durabilidade, a carbonatação, a penetração de cloretos e a absorção de água. Foi ainda ensaiada a resistividade eléctrica do betão com o objectivo de medir o teor em água no interior do mesmo e, desta forma, avaliar a propensão para o fenómeno de corrosão. Embora seja um estudo bem documentado e exaustivo sobre as propriedades analisadas, não pôde ser utilizado na presente dissertação porque o autor optou por fixar as classes de resistência do betão variando a quantidade de cimento adicionada a cada BAR.

A campanha de Levy e Helene (2004), relatada no artigo “Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development”, descreveu os ensaios realizados à resistência compressão axial dos BAR, com taxas de substituição de 0, 20, 50 e 100%, e à carbonatação. A porosidade e a absorção de água foram igualmente alvo de estudo. Foram utilizados AR finos e grossos e de origem cerâmica e de betão. A falta de informação sobre a composição exacta dos betões invalidou a hipótese de utilização no presente estudo.

Na tese de doutoramento, intitulada “Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos”, Ângulo (2005) analisou a variação da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade com a taxa de substituição de AR (de origem cerâmica e de betão) por AP. Foi também analisada a influência na absorção de água dos BAR. O betão no estado fresco foi ensaiado quanto à trabalhabilidade e à massa volúmica. Também nesta tese, o autor optou por classificar as várias famílias pela classe de resistência à compressão variando a quantidade de cimento adicionada. Outro dos critérios adoptados foi a classificação dos AR por intervalos de massas volúmicas.

O mesmo investigador, Ângulo (1998), na sua dissertação de Mestrado, intitulada “Produção de concretos de agregados reciclados”, registou a campanha experimental com AR de origem cerâmica e betão e de fracção grossa e fina. Os ensaios ao betão endurecido foram apenas relativos à resistência à compressão axial e ao módulo de elasticidade. A trabalhabilidade e a massa volúmica foram as propriedades ensaiadas no estado fresco. A variação da relação a/c, com a respectiva adição de diferentes quantidades de cimento, não permitiu uma análise directa do efeito da taxa de substituição de AR por AP nas propriedades dos BAR.

A campanha experimental realizada por Buttler (2003), descrita na dissertação de Mestrado intitulada “Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados”, descreveu ensaios realizados no betão fresco (massa volúmica e trabalhabilidade) e no betão no estado endurecido (resistência à compressão axial e à tracção por compressão diametral, módulo de elasticidade, massa volúmica e absorção de água). As famílias dos BAR são definidas por diferentes idades dos AR de betão (idade do betão de origem no momento da britagem). Também este autor optou por fazer variar a relação *a/c*.

Etxeberria et al (2004) descreveram, no artigo “The role and influence of recycled aggregate in recycled aggregate concrete”, vários ensaios realizados à resistência à compressão e à tracção por compressão diametral e ao módulo de elasticidade. No entanto, esta campanha centrou-se na análise do comportamento de vigas em betão armado (com diferentes tipos de armadura transversal). As diferentes quantidades de cimento adicionadas para cada um dos BAR (com diferentes taxas de substituição) teve como objectivo a manutenção da resistência à compressão. Foi ainda realizada análise microscópica à reacção álcalis-sílica nos BAR, em particular nas zonas próximas à pasta de cimento aderida aos AR. O artigo “Recycled concrete aggregate as a structural material”, também da autoria de Etxeberria et al (2006), aborda a mesma campanha experimental embora numa perspectiva mais aprofundada do comportamento estrutural das vigas e respectiva armadura.

A campanha experimental de Barra e Vázquez (1998), descrita no artigo “Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation”, tratou a influência dos AR de origem cerâmica e de betão, na fracção grossa, na variação da resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, massa volúmica e absorção de água. A relação *a/c* não é constante na preparação dos vários BAR, tendo sido definidas três famílias com classes de resistência distintas.

Segundo a campanha de Knights, J., descrita em “Relative performance of high quality concretes containing recycled aggregates and their use in construction”, foi analisada a resistência à compressão axial e a trabalhabilidade. A massa volúmica e a absorção de água por capilaridade também foram analisadas mas os resultados não foram publicados no artigo referido. Os AR analisados foram recolhidos em dois centros distintos de demolição, sendo um deles maioritariamente composto por betão e o outro por materiais indiferenciados (betão, asfalto e cerâmicos). As taxas de substituição estudadas foram de 0, 30 e 60%. A limitação desta campanha revelou-se na inexistência de informação relativa às propriedades dos AP usados nos BR, inviabilizando assim o presente estudo.

Roos e Zilch (1998) analisaram, no artigo “Verification of the dimensioning values for concrete with recycled aggregates”, a influência nos BAR dos AR de betão de granulometria grossa e fina. Esta campanha mantém a maioria dos parâmetros de produção dos BAR constantes (composição granulométrica, quantidade de cimento, relação *a/c* e trabalhabilidade) variando apenas a taxa de substituição de AP por AR. O facto de os autores não apresentarem as propriedades dos agregados (AR e AP) inviabilizou a sua utilização no presente estudo. Foram estudadas propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade) e de durabilidade (retracção e fluência).

Na campanha de Gutiérrez e de Juan (2004), descrita no artigo “Influence of recycled aggregate quality on concrete properties”, foram realizadas taxas de substituição de AP por AR de 0, 20, 50 e 100%. As famílias dos BAR foram definidas pela taxa de substituição e por diferentes categorias de relação *a/c*. Os ensaios realizados englobaram a resistência à compressão axial e tracção por flexão, o módulo de elasticidade e a retracção. No estado fresco, realizaram-se ensaios à trabalhabilidade e quantidade de ar aprisionado no betão. A “debilidade” deste artigo refere-se à forma de publicação dos resultados. Os valores obtidos experimentalmente são apenas apresentados de forma gráfica e só para algumas das famílias de BAR ensaiadas. Por esta razão, a campanha não será analisada no presente estudo.

Da campanha relatada por Vieira et al (2004) em “Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição” publicaram-se resultados dos ensaios realizados sobre a resistência à compressão axial e o potencial de corrosão das armaduras nos BAR. Os resultados foram apresentados apenas graficamente. Os AR analisados foram de origem indiferenciada e a substituição ocorreu simultaneamente na fracção grossa e fina.

A campanha relatada em “The compressive strength of concrete containing tile chips, crushed callop shells, or crushed roofing tiles”, por Sugiyama (2004), abordou a utilização de diversos tipos de materiais (mosaicos cerâmicos, conchas de bivalves e telhas cerâmicas) na produção de BAR e a respectiva influência na resistência à compressão axial e no

módulo de elasticidade. As famílias de BAR foram definidas com base na origem dos AR finos e grossos utilizados. Os valores obtidos por este investigador são contrários à maioria das restantes campanhas, visto que, apesar de a relação a/c ser constante, a resistência à compressão axial aumenta (à excepção dos BAR com conchas de bivalves) com a taxa de substituição de AP por AR.

No estudo desenvolvido por Poon et al (2006), descrito no artigo “Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete”, foram utilizados AR grossos (10-20 mm) indiferenciados provenientes de resíduos de construção e demolição. A relação a/c foi mantida constante durante o processo de produção dos BAR com diferentes teores de AR (0, 20, 50, 80 e 100%). Foram diferenciadas duas famílias de BAR com base no material cimentício utilizado. Numa das famílias, foi utilizado cimento portland tradicional e, na outra, este material foi substituído em 25% por cinzas volantes. A trabalhabilidade e a exsudação foram as propriedades analisadas no estado fresco, tendo a segunda sido alvo de análise aprofundada. A resistência à compressão axial foi a única propriedade analisada no estado endurecido.

A campanha experimental da autoria de Khatib (2004), relatada em “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate”, debruçou-se sobre a análise comparativa da influência dos AR de betão e os de origem cerâmica em diversas propriedades dos BAR. A trabalhabilidade foi a única propriedade ensaiada no estado fresco. No estado endurecido, foi ensaiada a resistência à compressão axial, a velocidade de propagação dos ultra-sons, a massa volúmica, o módulo de elasticidade e a retracção. Apesar de a quantidade de cimento ser variável, a relação a/c mantém-se constante na produção dos vários BAR.

A tese de doutoramento de Larrañaga (2004), com o título “Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete”, abordou o comportamento estrutural de vigas executadas com BAR. A resistência à compressão axial e à tracção por flexão e o módulo de elasticidade foram as propriedades ensaiadas por esta autora. Um dos parâmetros fixos no processo de produção dos BAR foi a resistência à compressão axial, pelo que esta campanha não pôde ser utilizada na presente análise.

Tsujino et al (2007) relataram no artigo “Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment”, o processo experimental de tratamento superficial dos AR antes da mistura para obtenção dos BAR. Este tratamento superficial visa a redução da elevada absorção de água dos AR. Foram adoptados dois tipos de tratamento superficial, um à base de óleo e outro à base de silano (SiH_4), concluindo-se que o primeiro não degrada significativamente as propriedades dos BAR, ao contrário do segundo. No processo de execução dos BAR, foram adoptados dois valores diferentes para a relação a/c. A trabalhabilidade foi um factor constante no processo. No estado fresco, a trabalhabilidade e o conteúdo de ar no interior do betão, foram as propriedades ensaiadas. No estado endurecido, foi ensaiada a resistência à compressão axial e à tracção por compressão diametral, o módulo de elasticidade, a retracção, a carbonatação e a fluência. Foram ainda realizados ensaios em vigas de betão armado, em particular ao fenómeno de fendilhação e deformação.

Muller (2004), no artigo “Lightweight aggregates from masonry rubble”, regista a influência dos AR de origem cerâmica com reduzida massa volúmica e a sua viabilidade na produção de blocos em betão. Foram realizados ensaios à resistência à compressão axial, à massa volúmica, à resistência aos ciclos gelo-degelo e à condutividade térmica.

Na campanha de Oliveira et al (2004), descrita no artigo “Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate”, foi analisada a influência de AR indiferenciados, provenientes de resíduos de construção e demolição, de granulometria grossa, na resistência à compressão axial, no módulo de elasticidade e na capacidade de absorção de água. Também nesta campanha, o critério de manutenção da resistência à compressão para os vários BAR provocou a adição de cimento em quantidades variáveis e, por essa razão, a inviabilidade na utilização do presente estudo.

A campanha descrita no artigo “High quality recycled aggregate processed by decompression and rapid release”, da autoria de Kimura et al (2002), registou os ensaios realizados à resistência à compressão axial, ao módulo de elasticidade, a fluência, a retracção, aos ciclos gelo-degelo e à carbonatação. Foi ainda ensaiada a trabalhabilidade do betão no estado fresco. Esta campanha abordou uma técnica inovadora de mistura dos componentes do betão. Os autores ensaiam um processo de descompressão-compressão rápida, numa câmara de mistura apropriada, de forma a reduzir a quantidade de ar na superfície de interface entre os AR e a pasta de cimento, obrigando à “compressão” desta ligação. Os AR

utilizados nesta campanha eram de origem indiferenciada e de granulometria grossa e fina. A informação mais relevante desta campanha sobre os ensaios aos BAR foi apenas publicada graficamente.

Os resultados experimentais de Corinaldesi (2003), relatados em “Influence of recycled aggregate on the concrete performance”, abordaram os efeitos dos AR indiferenciados, de granulometria grossa e fina, nos BAR com taxas de substituição de 0 e 100%. Na produção dos BAR, a relação *a/c* foi um critério variável (para atingir uma resistência à compressão de 35 MPa em todos os betões), tendo também sido adicionadas cinzas volantes. Os resultados dos ensaios foram apresentados graficamente. O betão no estado endurecido foi ensaiado à resistência à compressão axial, aos ciclos gelo-degelo, à tracção por compressão diametral, à retracção, à carbonatação e à difusão de cloretos.

O estudo realizado por Mendes et al (2004), relatado em “Study on ARC’s aggregate utilization recycled of concrete”, abordou vários ensaios realizados em BAR com diferentes relações entre a quantidade de cimento e a quantidade de agregados. Os ensaios realizados abrangeram a resistência à compressão axial, o módulo de elasticidade e a fluência em vigas em betão armado. O betão no estado fresco foi sujeito a ensaios de trabalhabilidade e massa volúmica. Foram adoptadas diferentes relações *a/c* para diferentes valores de referência da resistência à compressão.

A campanha realizada por Chen et al (2003), documentada no artigo “Use of building rubble as recycled aggregates”, diferenciou as várias famílias de BAR pela relação *a/c* e pela lavagem prévia ou não dos AR. Neste estudo, foram também abordadas propriedades das argamassas realizadas com AR. As propriedades ensaiadas foram a resistência à compressão axial e tracção por flexão e o módulo de elasticidade. Os resultados destes ensaios estão apenas documentados graficamente.

A campanha de Kenai et al (1998), descrita em “Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled aggregates”, apresentou a variação de diversas propriedades dos BAR após a substituição de AR por AP na fracção grossa e fina, independentemente e em simultâneo. As propriedades analisadas foram a resistência à compressão axial e à tracção por flexão, o módulo de elasticidade, a retracção, a absorção de água e a permeabilidade. Apesar de se tratar de uma campanha exaustiva, o artigo analisado não disponibilizava os valores obtidos para cada um dos ensaios, inviabilizando qualquer tratamento da informação ou análise detalhada dos resultados.

2.4 Breve descrição das campanhas seleccionadas para o presente estudo

Após a recolha da informação, foram seleccionadas seis campanhas que preenchem os requisitos enunciados no ponto 2.1. e que, por essa razão, são alvo de análise aprofundada no âmbito da presente dissertação. As campanhas escolhidas são, seguidamente, apresentadas de forma sucinta.

Carrijo (2005), na sua dissertação de Mestrado intitulada “Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto”, desenvolveu um programa experimental de substituição de AR de origem cerâmica e de betão (de granulometria grossa) por AP na produção de BAR. As famílias de BAR definidas por Carrijo (2005) são caracterizadas pela massa volúmica dos AR, que foram divididos em quatro grupos segundo este critério. A autora optou por manter a relação *a/c* constante. Definiu três grupos de BAR com diferentes quantidades de consumo de cimento (300, 400 e 500 kg/m³).

A campanha de Leite (2001), realizada no âmbito da tese de Doutoramento com o tema “Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição”, abordou também a influência de AR de origem cerâmica e de betão. A substituição de AP por AR é realizada na fracção grossa e fina. Foram realizados ensaios à resistência à compressão axial, tracção por compressão diametral e por flexão e módulo de elasticidade. O betão no estado fresco foi também ensaiado quanto à trabalhabilidade e massa volúmica. Esta investigadora optou por obter parte dos resultados experimentalmente e parte por projecção estatística. As várias famílias definidas por Leite (2001) são caracterizadas pelos diferentes valores de relação *a/c* estabelecidos por esta autora.

A campanha de Kou et al, documentada no artigo “Properties of steam cured recycled aggregate fly ash concrete”, foi caracterizada pelo estudo da influência da adição de cinzas volantes na produção dos BAR e, por outro lado, do tipo de cura adoptado. Embora seja um estudo relevante, a presente dissertação não aprofunda a vertente relacionada com a adição de cinzas volantes nem o tipo de cura escolhido. Os AR utilizados são de origem indiferenciada e de granulometria grossa. Os ensaios realizados ao betão no estado endurecido relacionaram-se com a resistência à compressão axial e à tracção por compressão diametral, o módulo de elasticidade e a difusão de cloretos.

Cervantes et al (2007), no artigo “Fracture and drying shrinkage properties of concrete containing recycled concrete aggregate”, analisaram o comportamento dos BAR com adição de fibras sintéticas. Os AR de betão utilizados nesta campanha são apenas de granulometria grossa, sendo que as taxas de substituição de AP por AR foram de 0, 50 e 100%. Esta campanha aprofunda os ensaios de ruptura realizados a vigas de betão, com e sem fibras sintéticas, simplesmente apoiadas. Os valores utilizados para o presente estudo foram os relacionados com a retracção. Foram ainda realizados ensaios de resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade. A manutenção da relação a/c na produção de todos os BAR foi um dos critérios essenciais para utilização destes resultados.

No artigo “Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete”, Katz (2003) analisou a influência da substituição de AR de betão por AP em algumas das propriedades dos BAR. Os substituição de agregados foi realizada na fracção grossa e fina. A diferenciação entre famílias de BAR é realizada por Katz (2003) através do tipo de cimento utilizado (tradicional e branco) e da idade de britagem dos AR (1, 3 e 28 dias). Para que o processo de hidratação dos betões transformados em AR fosse interrompido, após a respectiva britagem foram colocados num forno para secagem a 105 °C. Foram realizados ensaios à resistência à compressão axial, tracção por compressão diametral e flexão, ao módulo de elasticidade, à retracção e à carbonatação. O betão no estado fresco também foi ensaiado quanto à massa volúmica, trabalhabilidade e quantidade de ar aprisionado no interior do betão. O facto de a taxa de substituição ser de 0 e 100% limitou a obtenção de resultados e respectivas conclusões.

A campanha de Soberón (2002), relatada no artigo “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study”, é centrada na medição da variação da porosidade dos BAR com a taxa de substituição de AP por AR (0, 15, 30, 60 e 100%). O ensaio à porosidade foi realizado através de uma técnica de intrusão de mercúrio. São também apresentados resultados para outras propriedades, nomeadamente a resistência à compressão axial e tracção por compressão diametral, o módulo de elasticidade, a retracção, a absorção de água, a fluência e a massa volúmica. As várias famílias dos BAR foram apenas diferenciadas pelas idades de realização dos ensaios.

As campanhas descritas no presente ponto são apresentadas, de uma forma resumida em folhas de campanha experimental, no anexo 1 desta dissertação. A base de dados é apresentada em forma de tabela no anexo 2.

3. Campanhas experimentais e resultados

3.1 Introdução

O presente capítulo apresenta as diversas campanhas experimentais e analisa, em particular, a influência da taxa de substituição de AP por AR e de algumas propriedades da mistura dos agregados utilizados, nomeadamente a massa volúmica e a absorção de água, no comportamento dos BAR.

Primeiramente, são enunciados os princípios base e os critérios que caracterizam cada campanha experimental analisada. Prossegue-se com a análise das propriedades dos agregados, em particular da massa volúmica e da absorção de água, do betão no estado fresco e, por último, deste no estado endurecido.

Através dos resultados recolhidos, elaboram-se gráficos representando a relação entre a taxa de substituição dos AP por AR e algumas das propriedades do betão endurecido. De seguida, os valores das propriedades analisadas para os BAR são divididos pelos equivalentes do BR, obtendo-se assim valores relativos que permitirão uma comparação entre campanhas experimentais. Os gráficos de valores relativos, com a relação entre as propriedades da mistura dos agregados e as propriedades do betão no estado endurecido, são apresentados no final dos capítulos, com o propósito de identificar tendências de comportamento, através de curvas de regressão linear e respectivos coeficientes de correlação. No Quadro 3.1, apresenta-se o critério qualitativo definido para os valores dos coeficientes de correlação (R^2) obtidos.

Quadro 3.2 – Classificação qualitativa dos coeficientes de correlação

Classificação	Intervalo de valores
muito bom	$R^2 \geq 0,95$
bom	$0,80 \leq R^2 < 0,95$
aceitável	$0,65 \leq R^2 < 0,80$
não aceitável	$R^2 < 0,65$

3.1.1 Princípios de base assumidos

A campanha experimental desenvolvida por Carrijo (2005), no âmbito da dissertação de mestrado intitulada "Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto", centra-se na análise da relação entre a densidade dos AR e algumas das propriedades dos BAR, nomeadamente a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a absorção de água. Os valores obtidos nesta campanha experimental foram posteriormente utilizados na tese de doutoramento de Ângulo (2005), com o título "Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos".

A campanha experimental de Kou et al (2004), apresentada na conferência da RILEM de Barcelona, analisa a influência do tipo de cura do betão e o efeito de introdução de cinzas volantes na produção de BAR. Não sendo relevante para a presente dissertação a influência dos parâmetros mencionados, os ensaios realizados na campanha foram úteis e conclusivos. As taxas de substituição de AP por AR adoptadas na campanha foram de 0, 20, 50 e 100%. Foram utilizados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, tracção por compressão diametral, módulo de elasticidade e penetração de cloretos.

No âmbito da sua tese de doutoramento intitulada "Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição", Leite (2001) analisa o comportamento dos BAR no estado fresco e endurecido para vários valores de a/c. A substituição de AP por AR é realizada na fracção fina e grossa. Os valores obtidos experimentalmente foram extrapolados através de análise estatística e da modelação do comportamento das propriedades através de equações matemáticas.

A campanha de Soberón (2002) aborda os efeitos da substituição de AR grossos de betão em algumas propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tracção por compressão axial, módulo de elasticidade, retracção e fluência) e físicas (absorção, permeabilidade, densidade e porosidade) dos BAR. No entanto, a campanha centra-se nos testes à porosidade do betão por intrusão de mercúrio (ASTM D 4404).

A campanha de Cervantes et al (2007) analisa a influência da adição de fibras sintéticas nas propriedades dos BAR, nomeadamente na resistência à compressão, à tracção, à flexão em vigas e na retracção por secagem. No entanto, o

artigo a que se teve acesso sobre esta campanha centra-se especialmente na resistência à flexão de vigas.

A campanha experimental de Katz (2003) centra-se na análise comparativa de BAR executados com cimento portland tradicional e branco. As propriedades mecânicas ensaiadas foram a resistência à compressão, à flexão e à tracção por compressão diametral e o módulo de elasticidade. Relativamente às propriedades físicas e de durabilidade, foram realizados ensaios à absorção de água por capilaridade, retracção e carbonatação. Os BAR foram todos produzidos para uma taxa de substituição de AP por AR de 100%.

3.1.2 Betão de referência e critérios de famílias dos BAR

Neste ponto, são enumeradas as diversas campanhas experimentais analisadas e as principais características definidas por cada investigador para o betão de referência e para as famílias de betões. As famílias de betões são identificadas pela característica que o investigador fez variar para compreender o seu efeito nas propriedades do betão.

3.1.2.1 Campanha de Carrijo

Na produção do BR, foram utilizados, como AP, areia de rio e brita de origem basáltica. Na campanha experimental de Carrijo (2005), a absorção de água dos AP foi considerada igual a zero. No entanto, e de forma a permitir uma análise comparativa da absorção de água relativa entre AR e AP, considerou-se a absorção dos AP, tanto finos como grossos, igual a 1%.

Os valores de massa volúmica e absorção de água são apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Propriedades dos agregados primários utilizados na produção do BR (Carrijo, 2005)

Agregados primários	Massa volúmica (kg/dm ³)	Absorção de água (%)
Areia de rio	2,65	1,00
Brita de origem basáltica	2,68	1,00

Foram definidos três valores de relação a/c (0,4 / 0,5 / 0,67) na produção dos betões. O critério de substituição de AP por AR abrangeu apenas a fracção grossa dos agregados e a taxa de substituição ensaiada foi sempre de 100%. Esta metodologia inviabiliza a obtenção de valores intermédios que permitem uma melhor compreensão da evolução das propriedades do BAR com a substituição de AP por AR. Apesar desta limitação a obtenção dos coeficientes de correlação será realizada para garantir a sistematização da análise. A quantidade de água introduzida na mistura também foi um dos parâmetros constantes na produção dos betões.

Nesta campanha experimental, o critério de famílias dos BAR centrou-se na massa volúmica dos AR, tendo sido criadas quatro categorias denominadas por densidade.

3.1.2.2 Campanha de Kou et al

Tendo sido criadas três famílias de betões, de acordo com a quantidade de cinzas volantes adicionadas (0, 25 e 35% da quantidade de cimento definida inicialmente), foram produzidos três tipos de BR. A incorporação de cinzas volantes foi realizada por substituição do cimento.

Nesta campanha experimental, foi também ensaiada a influência do tipo de cura do betão. O processo de cura tradicional foi realizado por imersão dos corpos de prova em tanque de água a 27 °C após as primeiras 24 horas de cura ao ar. No processo de cura alternativa, os corpos de prova foram expostos a vapor de água a 65 °C durante 8 horas e, após este tratamento, foram igualmente imersos em tanque de água até à data dos ensaios. Não se insere no âmbito desta dissertação a comparação de resultados do tipo de cura.

O valor da relação a/c para esta campanha foi de 0,45 e foi mantido constante para a produção de todos os betões.

3.1.2.3 Campanha de Leite

O programa experimental baseou-se na selecção de algumas categorias de taxa de substituição de AP por AR dentro de cada família de BAR, definida pela relação a/c respectiva. Os valores obtidos originaram, por recurso a regressão linear múltipla, equações representativas de cada propriedade ensaiada.

As famílias de BAR são caracterizadas pela correspondente relação a/c. Foram ensaiadas 5 famílias (0,4/ 0,45/ 0,60/

0,75/ 0,80).

Para efeitos de análise da presente dissertação, serão utilizados os dados referentes às famílias com valores de *a/c* iguais a 0,4 e 0,45, atendendo a que, para as restantes, os valores registados por Leite (2001) são contraditórios com as demais campanhas experimentais analisadas, o que se deve sobretudo à presença significativa de AR finos.

3.1.2.4 Campanha de Soberón

Nesta campanha, os AR foram obtidos em laboratório, por britagem de um betão produzido para o efeito. Obtiveram-se dois tipos de granulometrias de AR grossos que, embora próximas das dos AP, não eram exactamente iguais. Atendendo a que os parâmetros de produção dos betões são constantes, existindo apenas a diferença na taxa de substituição de AP por AR, na proporção de 0, 15, 30, 60 e 100%, apenas da fracção grossa, o critério de famílias de BAR será aplicado à idade dos ensaios realizados.

A maior capacidade de absorção dos AR relativamente aos AP foi tida em consideração, procedendo-se a uma humedificação prévia à mistura com os restantes componentes. A trabalhabilidade de referência para a produção dos betões foi de 10 ± 3 cm. A relação *a/c* foi mantida constante com o valor de 0,52. Para o BR, foram utilizados os mesmos parâmetros dos BAR, com a utilização exclusiva de AP.

3.1.2.5 Campanha de Cervantes et al

O critério definido para as famílias de betões na campanha de Cervantes et al (2007) foi a adição de fibras sintéticas no processo de produção. O valor da relação *a/c* adoptado foi de 0,51 e manteve-se constante para todos os betões. A substituição de AP por AR foi realizada apenas na fracção grossa, com uma taxa de 0, 50 e 100%. Apesar de não ser relevante para a presente dissertação foram consideradas as famílias experimentadas por Cervantes et al (2007), caracterizadas pela inclusão de 0,2% de fibras sintéticas, dado o interesse em possuir o maior número possível de resultados experimentais.

3.1.2.6 Campanha de Katz

Na campanha experimental de Katz (2003), os AR foram produzidos em laboratório através da britagem de provetes de betão com 1, 3 e 28 dias de idade. Foram considerados 3 grupos de diferentes granulometrias para os agregados. A substituição de AP por AR realizou-se nas fracções grossas, 2,36-9,5 mm e 9,5-25 mm, e fina, granulometria inferior a 2,36 mm. Na produção dos BAR, foi mantida uma reduzida quantidade de AP finos que, segundo Katz (2003), serviria para melhorar a trabalhabilidade. Esta composição foi reflectida no processo de ponderação de massas volúmicas e absorções de água dos agregados na mistura.

A diferenciação de famílias foi realizada através do tipo de cimento (portland tradicional e branco) usado na produção dos betões e da “idade” de britagem dos AR. O BR executado. Refere-se que o cimento portland tradicional utilizado era de categoria de resistência inferior ao cimento portland branco (esta diferença é confirmada na resistência à compressão dos respectivos BR).

3.2 Propriedades dos agregados

As campanhas experimentais analisadas incluem diversos ensaios às propriedades dos agregados (porosidade, resistência à compressão, módulo de finura, índice de forma, baridade, composição granulométrica, entre outras), no entanto, a presente análise centra-se na massa volúmica e na absorção de água. É expectável que a massa volúmica dos AR seja inferior à dos AP, atendendo à quantidade de argamassa aderida dos primeiros, que possuiu uma elevada porosidade (maior quantidade de vazios) e contribui portanto para a diminuição referida. Pela mesma razão, a absorção de água dos AR será, expectavelmente, superior à dos AP.

Na maioria das campanhas analisadas, o processo de produção dos betões considerou a absorção de água dos AR na adição da água da amassadura. Os AR foram previamente saturados com a quantidade de água correspondente à água de absorção. Este procedimento é comum a várias campanhas experimentais e tem como objectivo compensar a elevada absorção dos AR e, desta forma, evitar que a relação *a/c* efectiva seja afectada por aquela propriedade dos AR. A quantidade de água aparente, ou seja, a adicionada à mistura, representa a soma da água efectiva de hidratação do cimento

com a água absorvida pelos AR. No caso dos betões com AP, neste caso o BR, não existe uma diferença significativa entre a relação a/c aparente e a efectiva, visto que a absorção de água dos AP é muito reduzida.

Na campanha experimental de Carrijo (2005), a designação de densidade para a separação das várias categorias de AR, corresponde à massa volúmica em superfície saturada seca dos agregados. Nos quadros e figuras, manter-se-á a designação densidade.

Foi realizada uma diferenciação, por análise visual, entre AR de origem predominantemente cerâmica e de betão, sendo identificados por “V – material vermelho” e “C – material cinza”, respectivamente. Este processo de diferenciação por identificação visual é pouco fiável e conduz a misturas de AR indiferenciados, com diferentes percentagens de resíduos de origem cerâmica e de betão (Quadro 3.3). Os AR foram separados em quatro categorias de densidade ($d < 1,9$ / $1,9 < d < 2,2$ / $2,2 < d < 2,5$ / $d > 2,5$ g/cm³).

Quadro 3.3 – Percentagem de cada fase de componentes dos AR grossos identificados como “cinza” e “vermelho”, separados por densidades (Carrijo, 2005)

Densidade d (g/cm ³)		d < 1,9		1,9 < d < 2,2		2,2 < d < 2,5		d > 2,5	
Tipo de agregado		vermelho	cinza	vermelho	cinza	vermelho	cinza	vermelho	cinza
Fases (% da massa total)	Cimentícia	69,1	78,9	92,0	92,7	60,0	46,3	23,6	13,3
	Cerâmica vermelha	24,2	15,4	4,6	0,3	0,3	0,1	0,0	0,0
	Cerâmica branca	2,3	1,8	3,0	2,6	0,3	0,0	0,1	0,0
	Rochas naturais	0,3	0,0	0,0	1,0	36,6	53,2	72,8	86,7
	Betume	2,2	2,4	0,0	3,5	2,8	0,4	3,5	0,0
	Amianto	1,9	1,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

O quadro evidencia a diferenciação de densidades das próprias fases dos resíduos, visto que nas categorias de massa volúmica mais baixa predominam os elementos cerâmicos e de origem cimentícia e nas restantes categorias destacam-se maiores percentagens de rochas naturais. As propriedades dos AR ensaiadas por Carrijo (2005) foram a massa volúmica e absorção de água, apresentadas no Quadro 3.4. Na campanha experimental em análise, não é possível evidenciar a diferença de valores de massa volúmica dos AR de betão e cerâmicos porque a separação dos AR por classes desta propriedade anula a diferenciação. Apenas para a categoria C, $2,2 < d < 2,5$, o valor da massa volúmica obtido ultrapassa ligeiramente o intervalo pré-definido, demonstrando que o processo de separação utilizado, *sink and float*, não é 100% eficiente. Conforme referido, esta separação dos AR conduziu à concentração de maiores quantidades de resíduos de argamassa e cerâmicos nas classes de densidade mais baixa e de resíduos de origem primária (rocha natural) nas classes de densidade mais elevada, independentemente da classificação visual cinza e vermelho.

A relação inversa entre a absorção de água e a massa volúmica, sobretudo atribuída à porosidade dos agregados, está evidenciada no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Propriedades dos agregados utilizados (Carrijo, 2005)

Categoria de densidade (kg/dm ³)	Massa volúmica (kg/dm ³)	Absorção de água (%)
C d < 1,9	1,78	14,6
V d < 1,9	1,74	15,3
C 1,9 < d < 2,2	2,11	8,0
V 1,9 < d < 2,2	2,02	9,0
C 2,2 < d < 2,5	2,53	2,0
V 2,2 < d < 2,5	2,49	2,8
C d > 2,5	2,60	1,5
V d > 2,5	2,62	1,4

Mais uma vez, o facto de o critério de separação dos AR ter sido por classes de massa volúmica conduziu a que os valo-

Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados

Levantamento do “*state-of-the-art*” experimental internacional res de absorção de água dos AR fossem da mesma ordem de grandeza dentro de cada classe, apesar da diferenciação visual “cinza” e “vermelho”, ou seja, resíduos de origem de betão e cerâmicos, respectivamente. Apesar desta constatação, é ainda possível registar que, dentro de cada classe de densidade, a absorção de água é maior no grupo de AR “vermelho” do que no “cinza”, em parte devido à ligeira tendência inversa na propriedade massa volúmica. A maior absorção do grupo “vermelho”, de origem cerâmica, poderá estar relacionada com a maior superfície específica dos AR cerâmicos relativamente aos de betão devido à sua forma habitualmente mais alongada.

Na campanha de Kou et al (2004), os AP utilizados foram areia de rio e brita de origem granítica. As propriedades dos agregados utilizados são representadas no Quadro 3.5. No entanto, os autores desta campanha não explicitaram os valores de massa volúmica e absorção de água para a areia de rio. Para as propriedades mencionadas e para viabilizar os estudos paramétricos realizados mais adiante, serão adoptados os valores de 2,65 kg/dm³ e 1%, respectivamente. Foram utilizados agregados grossos de dimensão nominal 10 e 20 mm, com a relação de 1:2, respectivamente, na composição do betão. Os valores da massa volúmica e da absorção de água dos AR são relativamente próximos dos valores respectivos nos AP, em especial os da primeira propriedade. A proximidade de características limita o efeito provocado pela substituição de AP por AR na variação das propriedades finais dos BAR.

Quadro 3.5 – Propriedades dos agregados utilizados (Kou et al, 2004)

Tipo de agregados	Dimensão	Massa volúmica (kg/dm ³)	Absorção de água (%)
Areia de rio	n.a.	2,65	1,00
Brita de origem granítica	10 mm	2,62	1,12
	20 mm	2,62	1,11
Agregados grossos reciclados	10 mm	2,49	4,26
	20 mm	2,57	3,52

Na campanha de Leite (2001), foi realizada a substituição de AP por AR na fracção grossa e fina. As propriedades dos AR e AP utilizados estão representadas no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Propriedades dos agregados utilizados (Leite, 2001)

Tipo de agregados	Massa volúmica (kg/m ³)	Absorção de água (%)
AFP	2632	1,00
AGP	3090	0,30
AFR	2529	8,60
AGR	2510	4,95

Todos os valores indicados foram ensaiados, à excepção da absorção de água dos agregados finos primários. O valor de 1% é referido por Leite (2001) como um valor habitual para este tipo de agregados. O elevado valor para a massa volúmica e reduzida absorção de água do agregado grosso primário é justificado com a sua origem basáltica.

No Quadro 3.7, apresentam-se os dados da campanha de Soberón (2002) para a massa volúmica e absorção de água dos AP e AR.

Quadro 3.7 – Propriedades dos agregados utilizados (Soberón, 2002)

Tipo de agregados	Massa volúmica (kg/m ³)	Absorção de água (%)
AFP	2570	1,49
AGP1	2640	1,13
AGP2	2570	0,88
AGR1	2420	6,81
AGR2	2410	5,83

Destaca-se a diferença de valores, entre AP e AR, na absorção de água. Os valores da massa volúmica, apesar de maio-

res no caso dos AP, como expectável, não apresentam uma diferença acentuada. Para a obtenção dos valores, foram realizados ensaios de acordo com as normas espanholas UNE específicas.

Os valores obtidos para as propriedades dos agregados na campanha de Cervantes et al (2007) são apresentados no Quadro 3.8. Refere-se que, à semelhança da campanha de Kou et al (2004), também na presente campanha as propriedades dos AR são relativamente próximas das dos AP que substituirão, em especial a massa volúmica.

Quadro 3.8 – Propriedades dos agregados utilizados (Cervantes et al, 2007)

Tipo de agregados	Massa volúmica (kg/m ³)	Absorção de água (%)
AFP	2510	1,79
AGP	2640	2,01
AGR	2420	5,27

Na campanha de Katz (2003), como referido, os AR foram produzidos por britagem de betão com 1, 3 e 28 dias de idade. Obtiveram-se 3 granulometrias de AR (1 fina e 2 grossas). Após a britagem, os agregados foram secos a 105 °C para que o processo de hidratação fosse interrompido. Os AR foram submetidos aos ensaios, de acordo com as normas ASTM, de massa volúmica, baridade, absorção de água, resistência à compressão e conteúdo de cimento. Na presente dissertação, são considerados apenas os AR britados aos 28 dias de idade, atendendo à maior similaridade com as restantes campanhas e com as propriedades deste material disponível no sector da construção. Assim, no Quadro 3.9, representam-se os valores para a massa volúmica e absorção de água dos agregados, AP e AR.

Quadro 3.9 – Propriedades dos agregados utilizados (Katz, 2003)

Tipo de agregados	Massa volúmica (kg/m ³)	Absorção de água (%)
AFP	2700	0,5
AFP1	2700	1,5
AGP2	2700	1,5
AGP3	2700	1,5
AFR1	2230	12,7
AGR2	2320	8,0
AGR3	2550	3,3

Os AFP correspondem a areia natural e os AFP1 correspondem a AP britados com uma granulometria inferior a 2,36 mm.

3.3 Propriedades do betão no estado fresco

As propriedades do betão no estado fresco são igualmente alvo de análise em algumas das campanhas experimentais. Nas campanhas de Carrijo (2005) e Leite (2001), a trabalhabilidade e a massa volúmica do betão foram as propriedades ensaiadas.

3.3.1 Massa volúmica

A massa volúmica do betão fresco está directamente relacionada com a massa volúmica dos seus componentes. Na composição do betão, a fracção correspondente aos agregados é maioritária, justificando-se por isso a maior influência da massa volúmica dos agregados nesta propriedade do betão.

A campanha experimental de Carrijo (2005) demonstra que, com a diminuição da relação a/c, ocorre um ligeiro aumento da massa volúmica do betão no estado fresco, conforme Figura 3.1. Os valores para o BR acompanham a mesma tendência dos restantes BAR, ou seja, a massa volúmica do betão no estado fresco decresce com o aumento da relação a/c.

Na campanha de Leite (2001), a massa volúmica do betão no estado fresco foi igualmente ensaiada pontualmente e

posteriormente extrapolada matematicamente para todas as famílias e respectivas taxas de substituição.

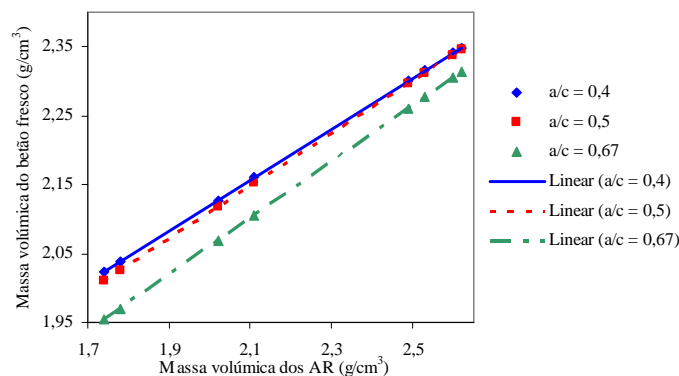


Fig. 3.1 – Relação entre a massa volúmica dos AR e a mesma propriedade do betão fresco (Carrijo, 2005)

Na Figura 3.2, representa-se o gráfico elaborado por Leite (2001) para a relação entre a taxa de substituição dos AP pelos AR, na fracção fina (AMR) e na grossa (AGR).

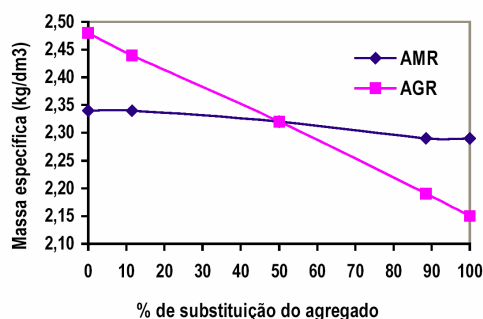


Fig. 3.2 – Relação entre a taxa de substituição dos AP por AR e a massa volúmica do betão fresco (adaptado de Leite, 2001)

Desta figura, concluiu-se que a substituição do AGP de origem basáltica, com elevada massa volúmica, pelo AGR reflecte uma maior influência na massa volúmica do betão fresco do que a mesma substituição na fracção fina dos agregados (AMR). O diferencial de massas volúmicas na fracção grossa é muito superior ao da fracção fina. Novamente, fica demonstrada a relação directa entre a massa volúmica do betão fresco e a mesma propriedade dos agregados que o compõem.

3.3.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do betão é uma das propriedades do betão no estado de fresco mais ensaiadas. Este controlo pode ser realizado de forma expedita através da medição do abaixamento do cone de Abrams, sendo assim facilmente realizado nos locais de aplicação do betão sem recurso a equipamentos de laboratório complexos.

As medições realizadas por Carrijo (2005) indicam uma tendência de redução da trabalhabilidade com a diminuição da classe de densidade, ou seja, da massa volúmica dos AR (Figura 3.3). Este comportamento do BAR em estado fresco relaciona-se com a maior absorção de água dos AR de massa volúmica menor, conforme refere Brito (2005).

Na preparação dos betões, foi utilizado o aditivo superplastificante Glenium 51, da marca MBT. O critério adoptado para a quantidade de aditivo adicionada a cada uma das misturas de betões foi o de obtenção visual de consistência plástica dessas misturas. Este critério não permite uma adequada análise dos resultados da trabalhabilidade, visto que a quantidade de aditivo influencia muito esta propriedade. Assim, e considerando esta adição de superplastificante, existe uma elevada dificuldade de correlação da trabalhabilidade com as restantes propriedades. No entanto, e apesar desta influência dos superplastificantes adicionados em diferentes quantidades na produção dos betões, é possível constatar que o teor de aditivo utilizado, decresce com o aumento da massa volúmica dos agregados (Figura 3.4) e que, ainda assim, tendencialmente, a trabalhabilidade se reduz com a diminuição desta propriedade dos agregados. O comportamento descrito realça a grande influência da massa volúmica dos AR na trabalhabilidade do betão.

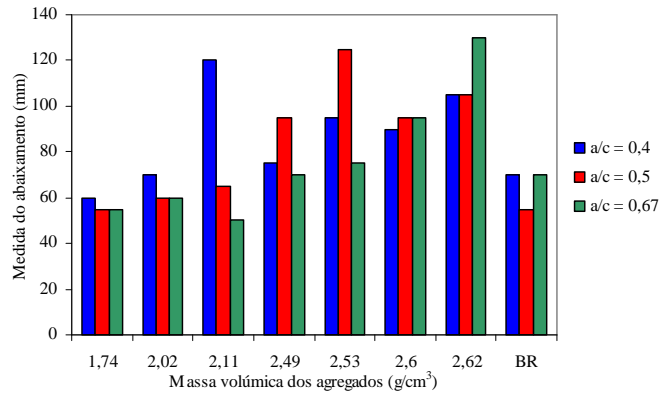


Fig. 3.3– Relação entre a massa volúmica dos AR e o abaixamento do betão fresco (adaptado de Carrijo, 2005)

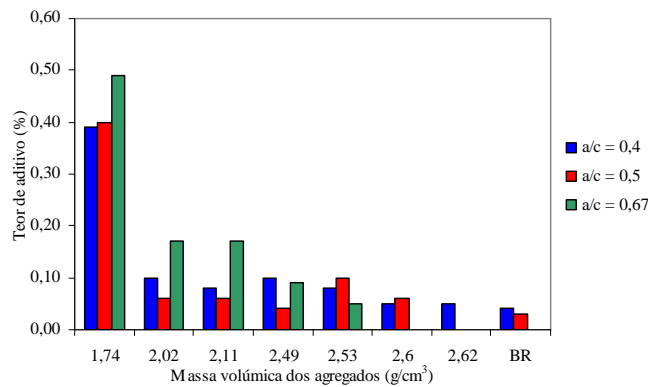


Fig. 3.4 – Relação entre a massa volúmica dos AR e o teor de aditivo adicionado à mistura (adaptado de Carrijo, 2005)

Contrariamente à tendência de aumento do abaixamento, no ensaio de cone de Abrams, com o aumento da massa volúmica dos agregados, o BR apresentou um abatimento menor do que os BAR com AR de categorias de massa volúmica elevada. Este comportamento poderá justificar-se com a adição inicial da água na preparação dos BAR para compensação da absorção de água dos AR.

Na campanha de Leite (2001), o ensaio sobre a trabalhabilidade do betão no estado fresco permitiu analisar o efeito da taxa de substituição dos AP por AR e da relação a/c.

Na Figura 3.5 representam-se os gráficos elaborados por Leite (2001) sobre a relação entre a taxa de substituição dos AGP por AGR e a relação a/c, com o abaixamento medido com o cone de Abrams. Os valores de abaixamento registados são muito reduzidos, podendo considerar-se inaceitáveis para a maioria dos usos, incluindo a aplicação em obra.

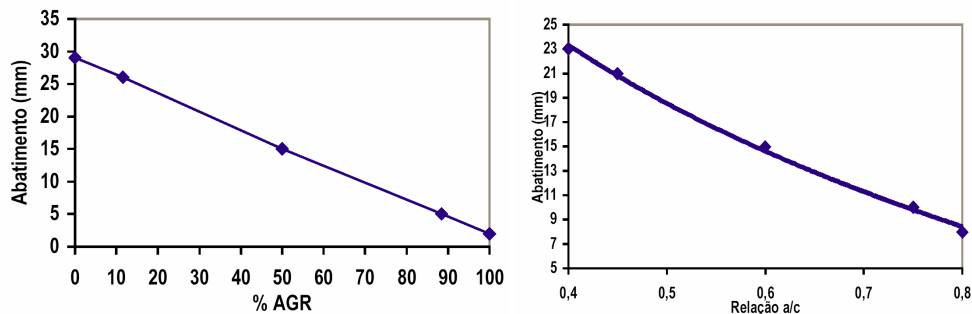


Fig. 3.5 – Relação entre a taxa de substituição de AR (à esquerda) e a relação a/c (à direita) e o abaixamento do betão no estado fresco (adaptado de Leite, 2001)

A redução do valor de abaixamento com o aumento da taxa de substituição de AP por AR justifica-se, novamente, com a maior taxa de absorção dos AR relativamente aos AP, reduzindo a quantidade de água livre que beneficia a trabalhabilidade.

lidade do betão. A maior rugosidade dos AR relativamente aos AP também contribui para esta redução da trabalhabilidade.

A influência da relação a/c na redução da trabalhabilidade do betão, justifica-se, conforme refere Leite (2001), com a menor quantidade de cimento na mistura. O cimento, pela sua reduzida granulometria, comporta-se como um lubrificante da mistura no estado fresco.

3.4 Propriedades do betão no estado endurecido

O conhecimento sobre as propriedades do betão no estado endurecido assume preponderância, atendendo a que é esse o estado em que é utilizado. Por essa razão, a presente dissertação aprofundará a resistência à compressão axial, à flexão e à tracção por compressão diametral, o módulo de elasticidade, a resistência à penetração de cloretos e à carbonatação e os efeitos da retracção, da absorção de água e da fluência.

3.4.1 Resistência à compressão

Na análise desta propriedade, será expectável que a substituição de AP por AR resulte sempre num decréscimo da resistência à compressão do betão. Este comportamento justifica-se com a inferior capacidade de resistência à compressão dos AR relativamente aos AP, na maior parte dos casos atribuída à quantidade de argamassa aderida dos AR (nos AR de betão) ou às próprias características dos materiais (nos AR cerâmicos e de argamassas).

Os resultados obtidos por Carrijo (2005) para a resistência à compressão axial do betão aos 28 dias, seguindo a metodologia especificada na norma NBR8522, são apresentados no Quadro 3.10, com a classificação dos AR por densidades e por categoria “C – cinza” e “V – vermelho”.

Quadro 3.10 – Resistência à compressão axial dos betões aos 28 dias (Carrijo, 2005)

BAR por categoria de agregados	Resistência à compressão (MPa)		
	$a/c = 0,4$	$a/c = 0,5$	$a/c = 0,67$
C $d < 1,9$	28,47	-	-
V $d < 1,9$	27,67	24,04	16,82
C $1,9 < d < 2,2$	32,28	29,04	17,37
V $1,9 < d < 2,2$	31,65	25,77	16,13
C $2,2 < d < 2,5$	42,59	29,68	20,7
V $2,2 < d < 2,5$	43,35	29,42	20,31
C $d > 2,5$	44,55	33,6	22,15
V $d > 2,5$	42,09	32,72	20,55
BR	45,23	35,57	23,2

Com base nos valores experimentais apresentados, foram realizados vários gráficos relacionando a resistência à compressão axial aos 28 dias com outras variáveis.

A primeira relação obtida foi a resistência à compressão com a taxa de substituição de AP por AR. Na Figura 3.6, apresenta-se a relação referida para as várias categorias de densidades pré-definidas por Carrijo (2005), para os AR “cinza” e “vermelho”. As rectas do gráfico representam correlações lineares para os 3 valores de relação a/c ensaiados. Para a taxa de substituição de AR por AP de 0%, ou seja, o BR, existem 3 valores de resistência à compressão correspondentes aos 3 tipos de betões executados com as diferentes relações a/c . Todas as rectas de correlação linear convergem no mesmo ponto de taxa de substituição igual a 0%, que representa o valor médio da resistência à compressão dos 3 BR ensaiados.

Por carência de material na amostra de AR grossos na categoria C $d < 1,9$, não foram produzidos betões para os valores de 0,5 e 0,67 de relação a/c . Esta ausência de resultados levará, em alguns momentos desta análise ao desprezo do valor de resistência à compressão na categoria C $d < 1,9$ para a relação a/c de 0,4, de forma a evitar um eventual enviesamento das correlações.

Da análise da Figura 3.6, e apesar de apenas existirem dados relativos a 100% de substituição de AR por AP, poderão

ser retiradas algumas conclusões sobre tendências de comportamento da resistência à compressão do BAR.

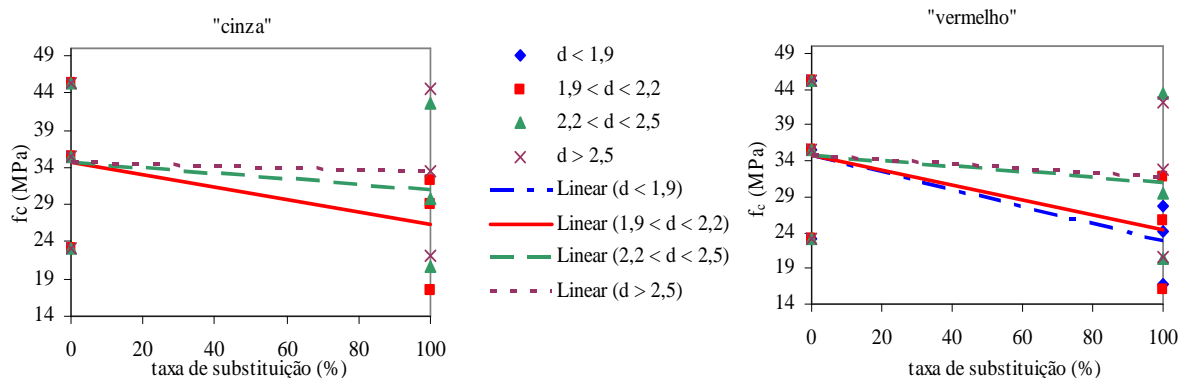


Fig. 3.6 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” para as várias relações a/c (Carrijo, 2005)

Quanto maior a classe de densidade dos AR, maior será a resistência à compressão do BAR. Nas categorias de densidade superiores a 2,2 g/cm³, tanto para AR “cinza” como “vermelho”, a redução da resistência à compressão do BAR relativamente ao BR é igual ou inferior a 11%. Para as categorias de densidade inferiores a 2,2 g/cm³, o decréscimo da resistência à compressão varia entre 24 e 33%.

Atendendo que o valor da massa volúmica dos AP é de aproximadamente 2,65 g/cm³, e que a resistência à compressão está directamente relacionada com esta propriedade do agregados, quanto maior for o valor da massa volúmica dos AR menor será o decréscimo da resistência à compressão do BAR relativamente ao BR.

De forma a compreender a influência da relação a/c, na resistência à compressão do BAR e do BR, realizaram-se os gráficos da Figura 3.7. Estes representam a mesma relação da taxa de substituição de AP por AR com a resistência à compressão, mas com os valores agrupados por séries de relação a/c.

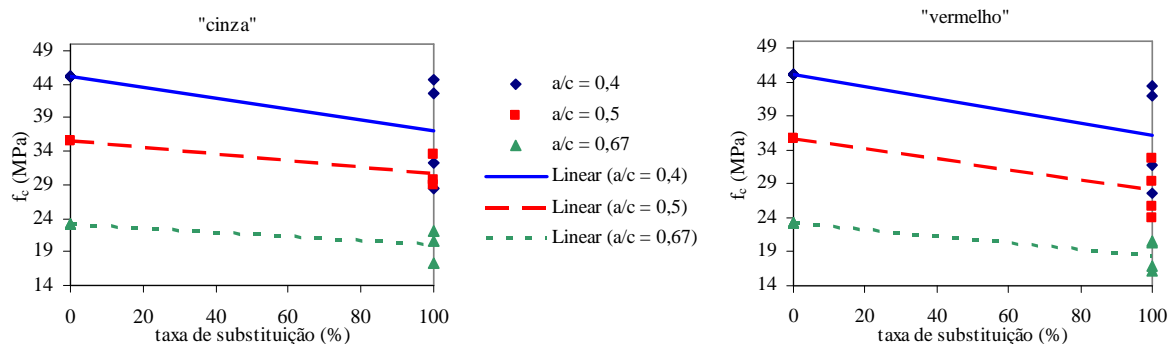


Fig. 3.7 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” para as várias categorias de densidades (Carrijo, 2005)

O comportamento da recta, que representa a correlação linear para as taxas de substituição 0 e 100%, tanto para os AR “cinza” como para os AR “vermelho”, é diferenciado para cada uma das relações a/c apresentadas. Constata-se que, à medida que aumenta a relação a/c, ou seja, a mistura tem maior quantidade de água relativamente ao cimento sendo por isso mais “pobre”, a redução da resistência à compressão do BAR relativamente ao BR é menor (Quadro 3.11).

Quadro 3.11 – Redução média da resistência à compressão do BAR relativamente ao BR (Carrijo, 2005)

Relação a / c	Redução média de f_{cBAR} relativamente a f_{cBR} (MPa)	
	AR "cinza"	AR "vermelho"
0,4	8,26	9,04
0,5	4,80	7,58
0,67	3,13	4,75

Desta constatação, poderá afirmar-se que a influência da massa volúmica dos AR na mistura é tanto maior quanto menor for a relação a/c. Com o aumento da relação a/c, a pasta de cimento torna-se menos resistente e passa a assumir um papel condicionante na resistência do betão.

Da campanha experimental de Kou et al (2004), obtiveram-se os valores de resistência à compressão axial para várias idades representados no Quadro 3.12. São reflectidos os dois tipos de cura ensaiados nesta campanha.

Quadro 3.12 – Resistência à compressão axial para várias idades e tipos de cura do betão (Kou et al, 2004)

Betões	Resistência à compressão axial (MPa)									
	cura por imersão em água					cura inicial por vapor				
	1 d	4 d	7 d	28 d	90 d	1 d	4 d	7 d	28 d	90 d
BR _{CV0}	25,8	45,8	53,8	66,8	72,3	41,8	49,6	53,2	58,1	63,9
BAGR20 _{CV0}	23,6	43,2	51,2	62,4	68	41,9	47,9	50,3	57,4	65,9
BAGR50 _{CV0}	21,1	40,3	44,8	55,8	61,5	38	41,9	46,7	55,1	62,2
BAGR100 _{CV0}	15,5	26,8	36,2	42	50,2	28,1	32,1	35,7	41,4	48,4
BR _{CV25}	17,6	32,6	39,9	54,4	69	37	41,9	46,2	55,3	66,4
BAGR20 _{CV25}	13,2	28,9	34,1	49,7	68,7	33,3	37,1	42,2	51,6	63,1
BAGR50 _{CV25}	11,6	25,7	31,3	44,3	65,2	30	34,5	37,6	48,3	58
BAGR100 _{CV25}	11,1	21,4	28,6	39,5	52,3	26,8	30,7	33,6	42,1	52
BR _{CV35}	12,8	25,6	30,6	45,9	56,6	30,4	33,6	36,4	46,2	52,2
BAGR20 _{CV35}	11,6	23,6	28,5	43,6	55,8	28,5	30,5	33,7	44,1	51,1
BAGR50 _{CV35}	10,9	21,2	26,3	40,4	52,3	26,3	28,9	32,1	42,3	47,2
BAGR100 _{CV35}	9,9	20,5	25,3	39,3	50,9	22,9	29,5	30,3	39,5	44,9

Na Figura 3.8, representam-se as variações da resistência à compressão com a taxa de substituição de AP por AR com cura por imersão para idades do betão de 28 e 90 dias, respectivamente. Registam-se elevados valores do coeficiente de correlação para as curvas de regressão linear de cada uma das famílias do betão (0, 25 e 35% de cinzas volantes).

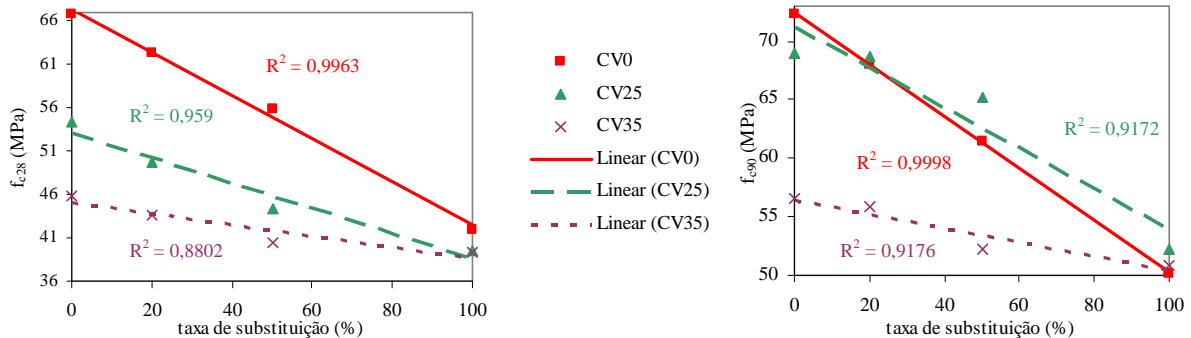


Fig. 3.8 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 (à esquerda) e aos 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR, com cura por imersão (Kou et al, 2004)

Na Figura 3.9, representam-se os mesmos parâmetros, mas para os betões sujeitos à cura inicial por vapor. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação para a relação entre a taxa de substituição de AP por AR são considerados bons e muito bons.

Para a representação gráfica, foram utilizados os resultados dos ensaios dos betões com cura por imersão em água (em detrimento dos betões com cura inicial por vapor) para os 28 e os 90 dias. Esta escolha resultou, por um lado, da necessidade de comparação com outras campanhas experimentais, em que o processo de cura por imersão é mais comum, e por outro, da constatação de que a cura por vapor, aparentemente, introduz algumas não linearidades difíceis de justificar, não se inserindo no âmbito da dissertação.

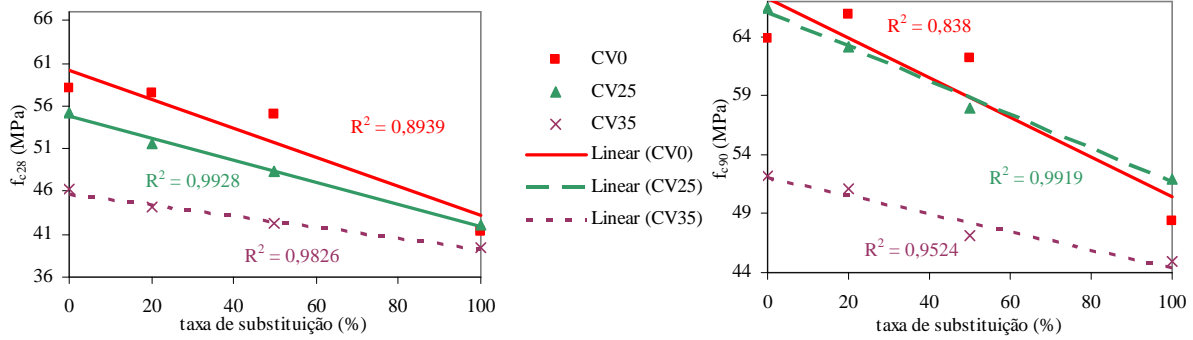


Fig. 3.9 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR, com cura inicial por vapor (Kou et al, 2004)

Para a campanha experimental de Leite (2001), obtiveram-se os valores representados no Quadro 3.13. Como referido em 3.1.1, os valores experimentais (NBR 5739 – 1994) de Leite (2001) são submetidos a tratamento estatístico e, através das equações matemáticas respectivas são extrapolados os valores apresentados. Na presente dissertação, são utilizados os valores experimentais (a vermelho no quadro 3.13) e, para as taxas de substituição onde estes não foram obtidos, os valores resultantes da projecção matemática realizada por Leite (2001) (a preto no quadro 3.13). Nos gráficos elaborados, são também identificados os valores obtidos experimentalmente e os obtidos por projecção matemática. Este procedimento repete-se em todas as propriedades analisadas por nesta campanha.

Os ensaios foram realizados aos 7, 28 e 91 dias. Por simplificação, e atendendo ao critério comparativo com outras campanhas, mencionam-se os ensaios aos 91 dias como sendo aos 90 dias.

Quadro 3.13 – Resistência à compressão axial para as várias idades ensaiadas (Leite, 2001)

		Resistência à compressão (MPa)		
Betões	a/c	7 d	28 d	90 d
BR	0,4	34,90	43,42	46,75
BAR11,5		35,09	38,64	49,23
BAR50		30,88	37,37	40,32
BAR88,5		30,03	32,53	39,95
BAR100		29,28	31,61	38,56
BR	0,45	28,30	37,08	41,73
BAR11,5		28,05	35,60	40,60
BAR50		26,66	29,50	37,98
BAR88,5		26,00	29,82	33,58
BAR100		25,08	27,43	34,40

Como referido, a substituição de AP por AR realizou-se na fracção fina e grossa. São utilizados, nesta análise, apenas os BAR em que a substituição de finos e grossos foi realizada na mesma proporção. Representa-se na Figura 3.10, a relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à compressão aos 28 e 90 dias.

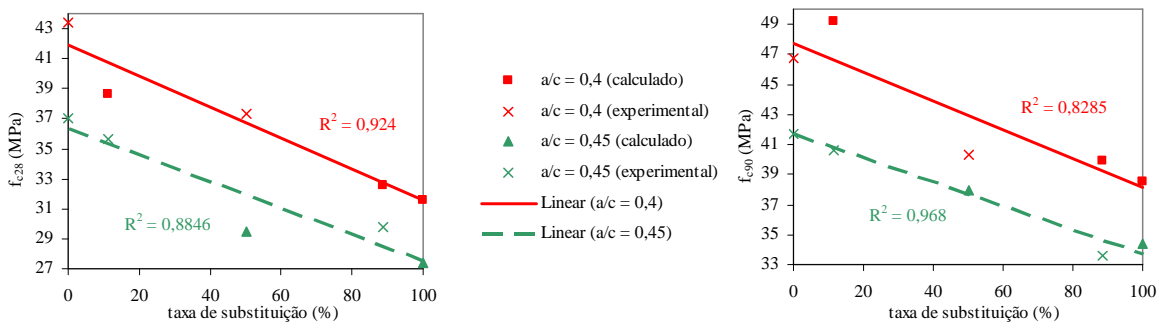


Fig. 3.10 – Variação da resistência à compressão do betão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR (Leite, 2001)

Regista-se um aumento significativo da resistência à compressão com a diminuição da relação a/c e com o aumento da idade do betão. Este comportamento dos BAR é análogo ao dos betões convencionais com AP. Os valores obtidos para o coeficiente de correlação são considerados bons ou muito bons. Na campanha de Soberón (2002), os resultados para a resistência à compressão axial foram obtidos conforme a norma UNE 83-304-84 para os 7, 28 e 90 dias. No Quadro 3.14, representam-se os valores obtidos. Os valores obtidos aos 7 dias são considerados anómalos por aumentarem com a taxa de substituição de AR por AP. Caso existisse um eventual efeito de “filler”, este seria também notado nas restantes idades, o que não ocorre. A justificação através da melhor performance relativa dos BAR ao longo do tempo de cura, também não é aplicável, visto que os valores contraditórios ocorrem na idade de 7 dias. Esta anomalia de valores reflecte-se na correlação das várias propriedades com a resistência à compressão axial do betão aos 7 dias.

Quadro 3.14 – Resistência à compressão axial para as várias idades ensaiadas (Soberón, 2002)

Betões	Resistência à compressão (MPa)		
	7 d	28 d	90 d
BR	33,30	39,00	42,10
BAR15	33,90	38,10	41,60
BAR30	34,80	37,00	39,50
BAR60	30,60	35,80	38,30
BAR100	30,70	34,50	37,50

Na Figura 3.11, representa-se a relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à compressão axial, confirmando-se a tendência de diminuição da resistência com o aumento da taxa de substituição. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados bom e muito bom para os 28 e 90 dias, respectivamente. Para os resultados aos 7 dias, o coeficiente de correlação é considerado não aceitável. De seguida, representa-se a relação entre a taxa de substituição e a resistência à compressão relativa entre o BAR e o BR.

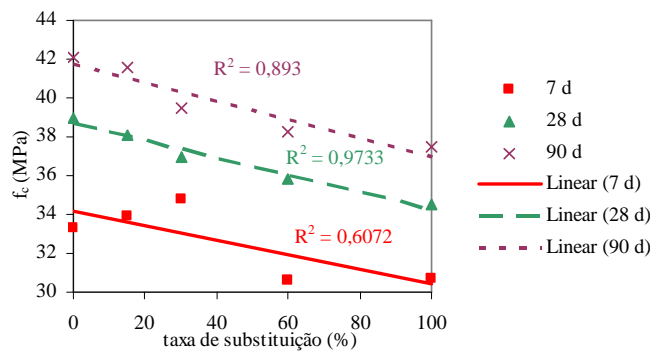


Fig. 3.11 – Variação da resistência à compressão do betão com a taxa de substituição de AP por AR para as várias idades ensaiadas (Soberón, 2002)

Para a campanha de Carrijo (2005), a Figura 3.12 volta a evidenciar a análise realizada, destacando a menor redução de valores de resistência à compressão para as categorias de densidade superiores. Este comportamento verifica-se tanto nos AR com predominância de resíduos de origem cerâmica, “vermelho”, como nos de origem de betão, “cinza”. Os valores obtidos para o coeficiente de correlação diminuem com o aumento da densidade dos AR e são considerados muito bom, bom, aceitável e não aceitável (para a categoria de maior densidade dos AR “cinza”).

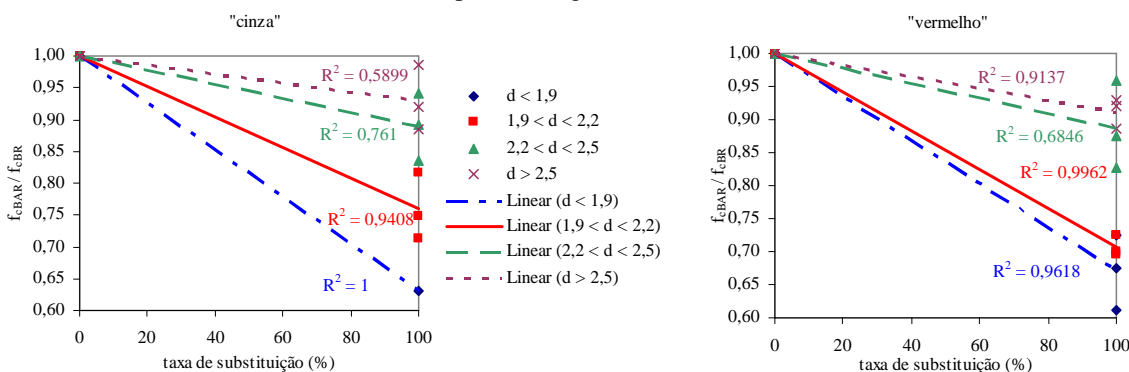


Fig. 3.12 – Variação da relação entre resistências à compressão com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” aos 28 dias (Carrijo, 2005)

Para a campanha de Kou et al (2004), realizaram-se os gráficos da Figura 3.13, com a variação da relação entre resistências à compressão com a taxa de substituição.

O comportamento de cada tipo de famílias de betão poderá considerar-se como linear, atendendo aos elevados valores do coeficiente de correlação obtidos, considerados bons e muito bons.

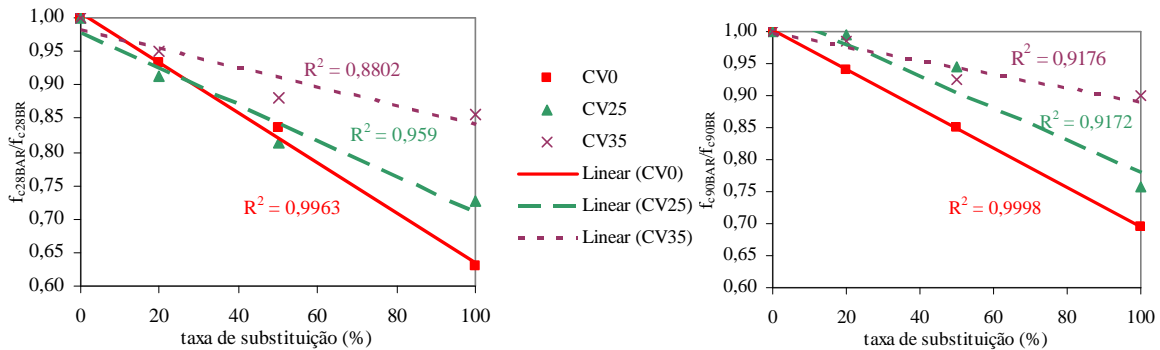


Fig. 3.13 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR (Kou et al, 2004)

Regista-se um aumento da relação entre resistências à compressão com a idade do betão. Este fenómeno poderá justificar-se com o efeito de cura tardia do BAR provocada pela maior absorção dos AR relativamente aos AP, conforme refere Leite (2001). A maior absorção dos AR e consequente maior retenção de água permitirão a continuidade do processo de hidratação do cimento durante um período de tempo mais prolongado.

Concluiu-se também que o aumento de cinzas volantes, por substituição do cimento, conduz a classes de resistência inferiores e, consequentemente, a variação da relação entre resistências à compressão diminui. Brito (2005) refere esta relação de aproximação de resistências dos BAR aos BR, com a diminuição da classe de resistência do BR.

Para a campanha de Leite (2001), representa-se na Figura 3.14 a relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias.

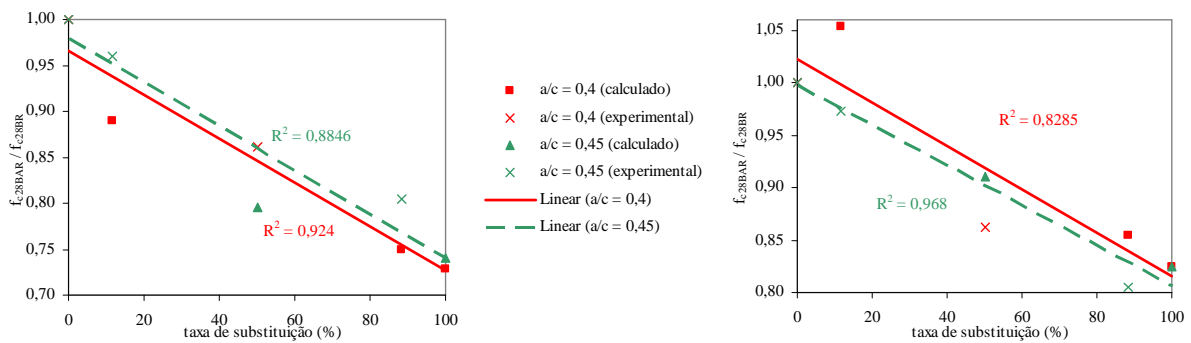


Fig. 3.14 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR (Leite, 2001)

O comportamento representado é coerente com o das restantes campanhas. A resistência à compressão dos BAR relativamente aos BR passou a ser menos influenciada pela relação a/c, em comparação com os valores absolutos, ou seja, a influência da relação a/c reflecte-se de igual modo nos BAR e nos betões com AP. Os valores obtidos para o coeficiente de correlação são considerados bons e muito bom (na família a/c = 0,45 aos 90 dias).

Para a campanha de Soberón (2002), a relação em análise é apresentada na Figura 3.15. O coeficiente de correlação para os ensaios aos 7 dias volta a evidenciar a dispersão de valores e é considerado não aceitável. Atendendo a esta dispersão e ao seu carácter anómalo e incoerente com os restantes resultados, a restante análise não considerará a família de resultados aos 7 dias desta campanha.

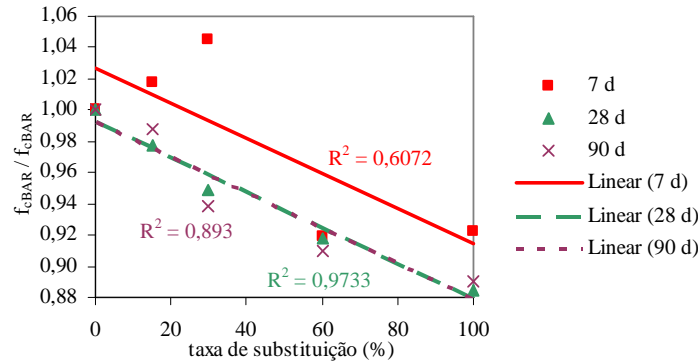


Fig. 3.15 – Variação da relação entre resistências à compressão do betão com a taxa de substituição de AP por AR para as várias idades ensaiadas (Soberón, 2002)

De seguida, realizou-se a análise da influência da massa volúmica da mistura dos agregados na resistência à compressão do betão. Para tal, foram concretizados gráficos representando a variação da resistência à compressão relativa com a massa volúmica relativa dos agregados AR e AP presentes na mistura. É expectável que a diminuição da massa volúmica dos AR relativamente aos AP provoque uma diminuição da relação entre resistências à compressão dos BAR. As campanhas analisadas confirmam esta tendência. A maior percentagem de pasta de cimento aderida aos AR, responsável pela diminuição da relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura, contribui para a diminuição da relação entre resistências à compressão dos BAR.

Para a obtenção do valor da massa volúmica ponderada dos agregados presentes na mistura do betão, foi utilizada a equação 3.1 que se descreve. Através desta equação geral, obter-se-ão os valores da massa volúmica dos agregados da mistura para as diversas taxas de substituição de cada campanha experimental, sendo também possível calcular para a taxa de substituição 0%, ou seja, para o BR. Apesar de, na campanha de Carrijo (2005), não existir substituição dos agregados finos, sendo a respectiva massa volúmica constante nos diversos BAR, a massa volúmica ponderada da mistura considera-os para efeitos de cálculo.

$$Mv = \frac{AF}{100} \times \left[\frac{subst_{AFR} \times mv_{AFR} + (100 - subst_{AFR}) \times mv_{AFP}}{100} \right] + \frac{(100 - AF)}{100} \times \left[\frac{subst_{AGR} \times mv_{AGR} + (100 - subst_{AGR}) \times mv_{AGP}}{100} \right] \quad (3.1)$$

em que,

Mv – massa volúmica ponderada dos agregados da mistura do betão;

AF – percentagem de agregados finos na composição do betão relativamente à totalidade dos agregados;

subst_{AFR} – percentagem de substituição de agregados finos primários por reciclados;

subst_{AGR} – percentagem de substituição de agregados grossos primários por reciclados;

mv_{AFR} – massa volúmica dos agregados finos reciclados;

mv_{AFP} – massa volúmica dos agregados finos primários;

mv_{AGR} – massa volúmica dos agregados grossos reciclados;

mv_{AGP} – massa volúmica dos agregados grossos primários.

A transformação dos resultados experimentais absolutos em valores relativos por comparação com o BR permite uma comparação entre diferentes campanhas realizadas.

Na Figura 3.16, representam-se os valores de Carrijo (2005) para a relação em análise. O facto de existir uma relação directa entre a massa volúmica do betão e a resistência à compressão deste material indicia que, quanto maior for a massa volúmica, dos AR e mais próxima do valor respectivo dos AP, maior proximidade existirá entre o valor da resistência à compressão do BAR e do BR. Nas famílias dos BAR com densidade elevada, os coeficientes de correlação obtidos são considerados muito bons.

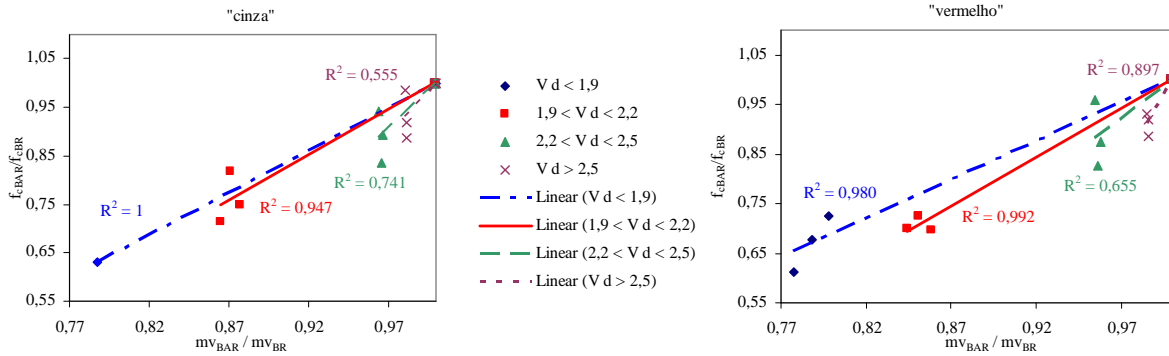


Fig. 3.16 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados “cinza” e “vermelho” (Carrijo, 2005)

Na Figura 3.17, representam-se todos os valores da relação entre a resistência à compressão relativa do betão e a massa volúmica dos agregados, compilando os resultados para as diversas categorias de densidade dos agregados, de classificação “cinza” e “vermelho” e para as três relações a/c analisadas. A justificação para este comportamento foi referida no texto introdutório da análise da influência da massa volúmica ponderada dos agregados da mistura.

A regressão linear obtida na Figura 3.17, com um coeficiente de correlação de 0,91, considerado bom, aponta para um comportamento linear na relação entre as massas volúmicas dos agregados utilizados na mistura e a relação entre resistências à compressão do betão.

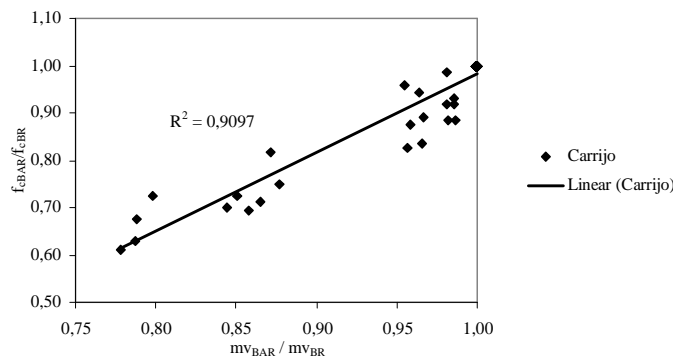


Fig. 3.17 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Carrijo, 2005)

Através dos resultados da campanha experimental de Kou et al (2004), obteve-se a Figura 3.18, com a representação da relação entre as propriedades referidas. O valor das massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura foi calculado com recurso à equação 3.1.

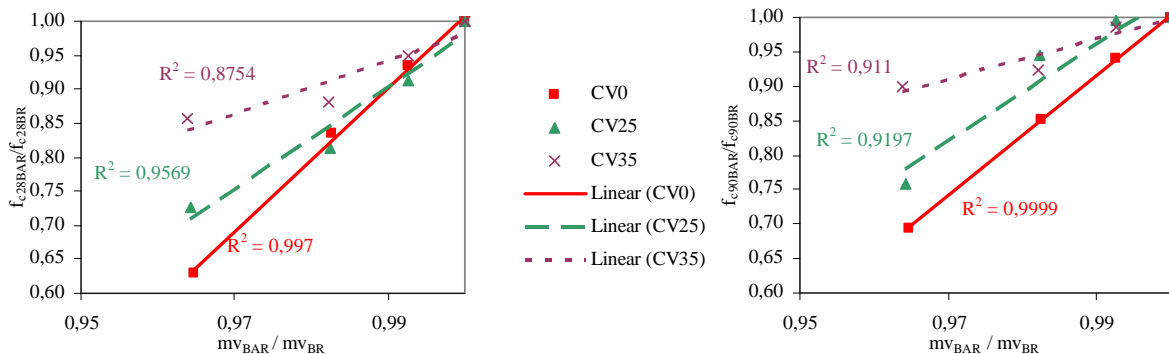


Fig. 3.18 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Os coeficientes de correlação obtidos têm valores muito elevados, considerados bons e muito bons, reforçando a hipótese de existência de relação linear entre as duas propriedades representadas. A extrapolação desta conclusão é limitada pela proximidade de valores já referida em 3.2. De forma a compreender o efeito da adição de cinzas volantes por substituição da quantidade de cimento, representa-se na Figura 3.19 a variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas, sendo as curvas de regressão linear representativas de cada grupo de BAR produzido com diferentes teores de cinzas volantes.

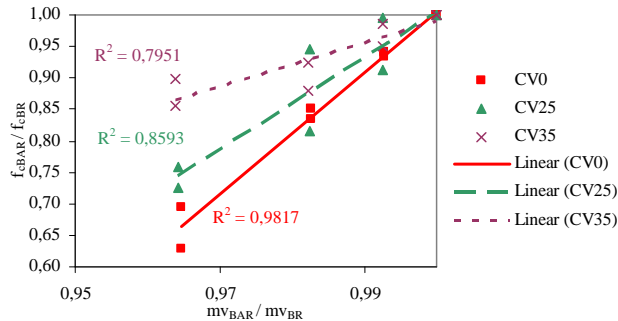


Fig. 3.19 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Constatando os elevados valores dos coeficientes de correlação, e apesar de a massa volúmica dos AR ser muito próxima da dos AP, conclui-se que existe uma influência não desprezável da adição de cinzas volantes na variação em análise. Quanto maior o teor de cinzas volantes, menor é a variação da relação entre resistências à compressão com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura. Este fenómeno poderá relacionar-se com a diminuição da classe de resistência do BR com a adição das cinzas volantes por substituição do cimento e conseqüente menor influência da introdução dos AR na resistência à compressão do betão, conforme referido. Na Figura 3.20, representa-se o resumo da variação entre a relação de resistências à compressão aos 28 e 90 dias e a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura. O valor do coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável.

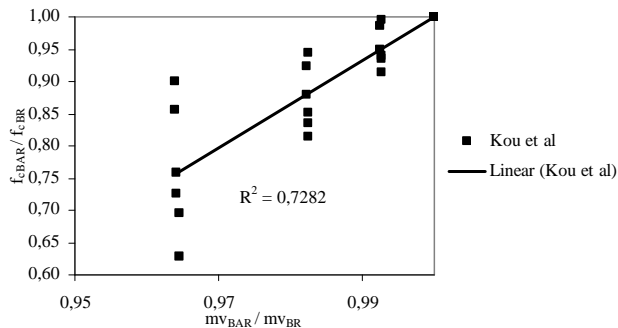


Fig. 3.20 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Para a campanha de Leite (2001), representa-se a Figura 3.21 com a variação entre a relação de massa volúmicas e a relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias.

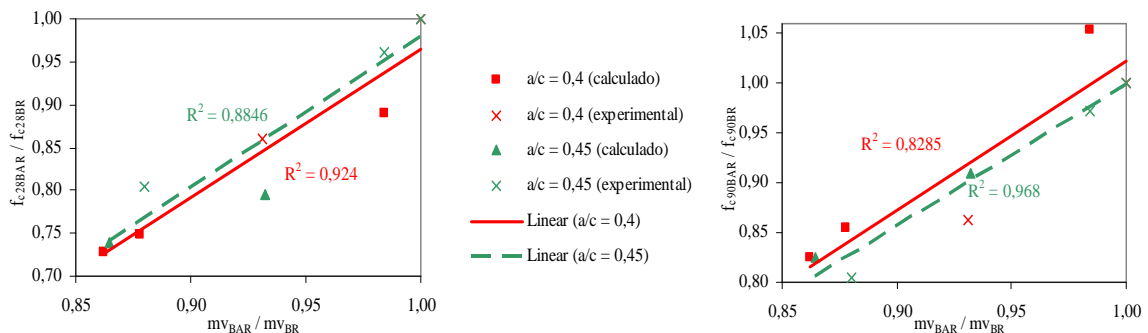


Fig. 3.21 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

A tendência de comportamento entre as duas relações representadas mantém-se semelhante à das restantes campanhas experimentais. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados bons e muito bom no caso da família $a/c = 0,45$ aos 90 dias.

Na Figura 3.22, reúnem-se os valores de Leite (2001) para a relação descrita, para as várias idades e relações a/c . O valor do coeficiente de correlação obtido é considerado bom.

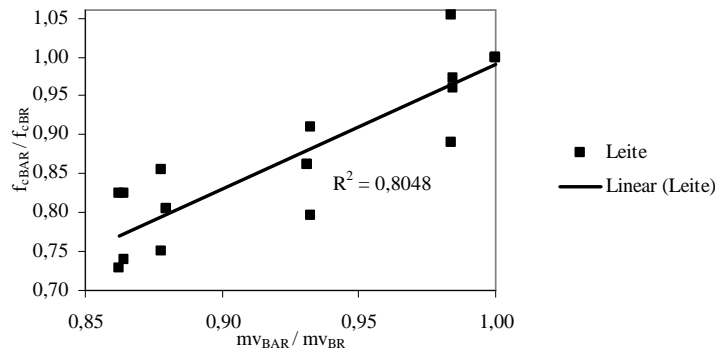


Fig. 3.22 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

Para a campanha de Soberón (2002), representa-se na Figura 3.23 a relação em análise, constatando-se que os valores obtidos para os coeficientes de correlação são muito elevados, sendo considerados bom e muito bom, reflectindo um comportamento linear da variação entre relações. Na Figura 3.24, representa-se a compilação de valores da mesma campanha, aos 28 e 90 dias, para a variação da relação entre resistências à compressão e a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura, confirmando-se o valor elevado do coeficiente de correlação, que é considerado bom.

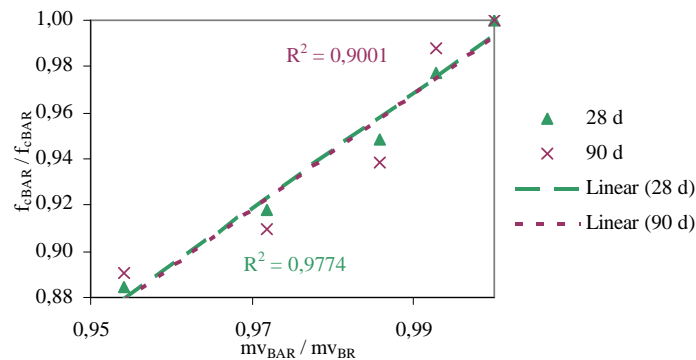


Fig. 3.23 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Soberón, 2002)

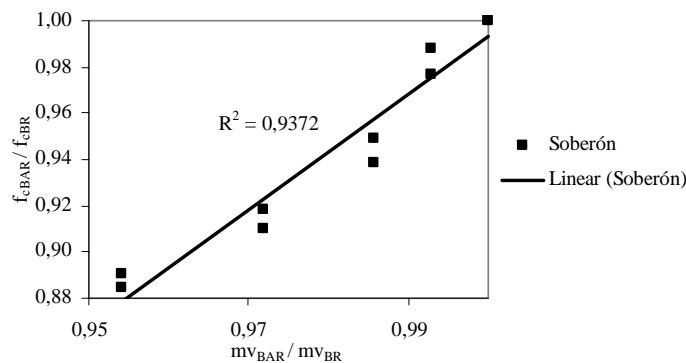


Fig. 3.24 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Soberón, 2002)

Na Figura 3.25, representa-se a reunião de valores das campanhas experimentais de Carrijo (aos 28 dias), Kou et al (28 e 90 dias e para betões sem adição de cinzas volantes), Leite (aos 28 e 90 dias) e Soberón (aos 28 e 90 dias).

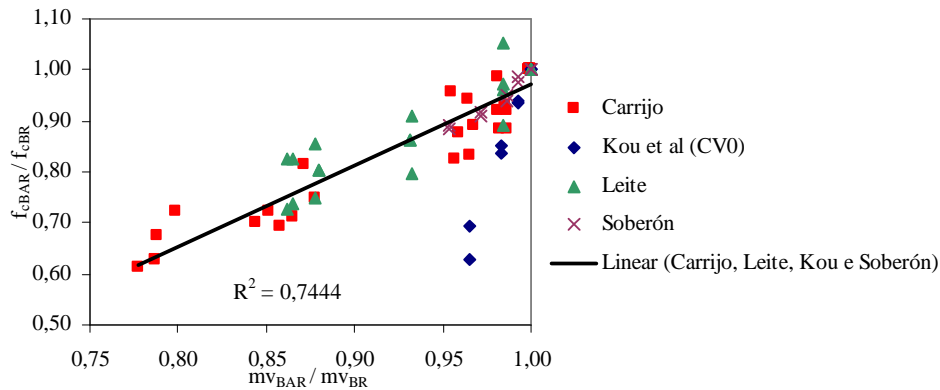


Fig. 3.25 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúnicas ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Carrijo, Leite, Soberón, Kou et al (0% de cinzas volantes)

Os valores da relação entre massas volúnicas ponderadas de Kou et al (2004) variam muito pouco e, por essa razão, contribuem desfavoravelmente e de forma significativa para o coeficiente de correlação da regressão linear de valores das quatro campanhas. Apesar deste facto, o coeficiente pode ser classificado de aceitável. Se fossem considerados apenas os dados das campanhas de Carrijo (2005), Leite (2001) e Soberón (2002), o coeficiente de correlação seria de 0,88, considerado bom, conforme representado na Figura 3.26.

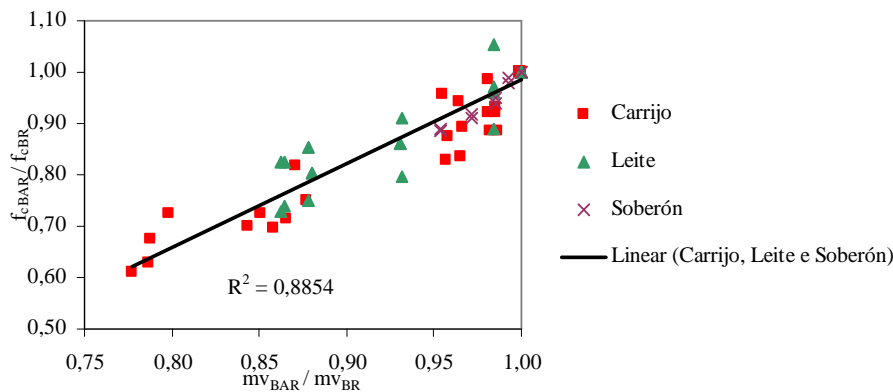


Fig. 3.26 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúnicas ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Carrijo, Leite e Soberón

Atendendo a que os valores experimentais de Carrijo (2005) para a resistência à compressão foram obtidos somente aos 28 dias, representa-se a Figura 3.27 com a variação em análise incorporando os valores de Kou et al (2004), Leite (2001) e Soberón (2002) somente para aquela idade.

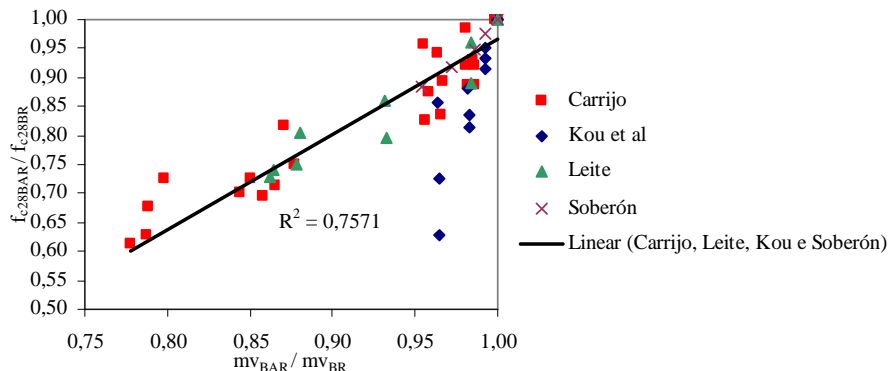


Fig. 3.27 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúnicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou et al

Na análise comparativa entre as campanhas, para os valores aos 28 dias, obtém-se um coeficiente de correlação de 0,76, considerado aceitável, um pouco melhor do que o obtido incorporando a resistência à compressão para as várias idades. Se fossem excluídos apenas os valores de Kou et al (2004), o valor do coeficiente de correlação aumentaria para 0,91, conforme apresentado na Figura 3.28.

Esta exclusão justifica-se com a reduzida variação da relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura, ou seja, a massa volúmica dos AR utilizados é muito semelhante à dos AP.

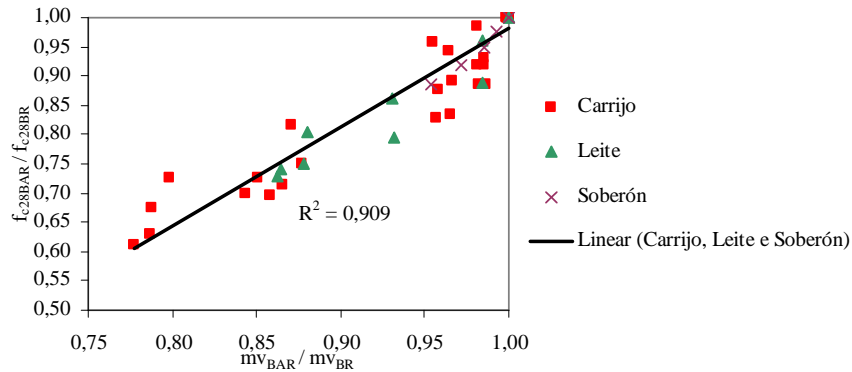


Fig. 3.28 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón

Esta tendência de comportamento linear está em concordância com a análise realizada por Xiao et al (2006) para a variação da resistência à compressão com a massa volúmica dos agregados em várias campanhas experimentais, representada na Figura 3.29.

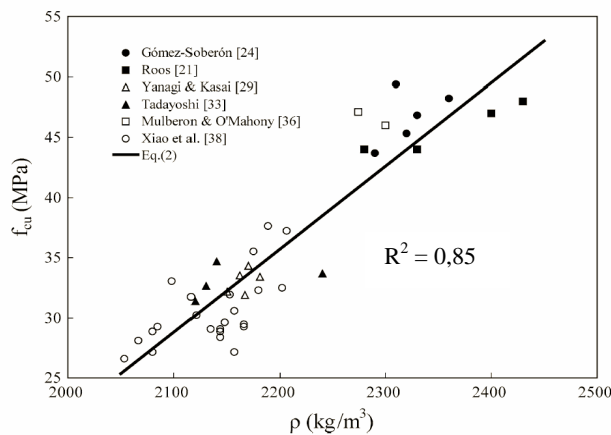


Fig. 3.29 – Variação da relação entre a resistência à compressão com a massa volúmica (adaptado de Xiao et al, 2006)

O mesmo procedimento de análise adoptado para a massa volúmica foi também aplicado à absorção de água dos agregados da mistura. É expectável uma tendência de diminuição da relação entre resistências à compressão com o aumento da relação entre absorções de água.

A maior capacidade de absorção de água dos AR relativamente aos AP é resultado da maior porosidade dos primeiros, assumindo a pasta de cimento aderida uma grande responsabilidade neste comportamento. Identicamente, a presença da pasta de cimento aderida contribui para a diminuição da resistência à compressão.

Na sua campanha experimental, Carrijo (2005) considerou a absorção de água dos AP, finos e grossos, igual a zero. Na presente dissertação, atendendo ao procedimento adoptado de comparação da absorção de água dos AP com AR, foi adoptado para os AR grossos o valor de absorção de água de 1%.

O processo de cálculo da absorção de água ponderada dos agregados da mistura foi análogo ao da massa volúmica e é representado na equação 3.2.

$$Ab = \frac{AF}{100} \times \left[\frac{subst_{AFR} \times ab_{AFR} + (100 - subst_{AFR}) \times ab_{AFP}}{100} \right] + \left(\frac{100 - AF}{100} \right) \times \left[\frac{subst_{AGR} \times ab_{AGR} + (100 - subst_{AGR}) \times ab_{AGP}}{100} \right] \quad (3.2)$$

em que,

Ab – absorção de água ponderada dos agregados da mistura do betão;

ab_{AFR} - absorção de água dos agregados finos reciclados;

ab_{AFP} – absorção de água dos agregados finos primários;

ab_{AGR} – absorção de água dos agregados grossos reciclados;

ab_{AGP} – absorção de água dos agregados grossos primários.

A leitura gráfica da relação entre a resistência à compressão do betão com a relação entre as absorções de água dos agregados utilizados na mistura é inversa à da massa volúmica, dado que quanto maior é a absorção dos agregados menor a resistência do betão correspondente (Figura 3.30).

A elevada absorção de água dos AR, relativamente aos AP, reflecte-se na resistência à compressão do betão pois a água disponível para a hidratação do cimento tem de ser compensada, aumentando assim a relação a/c aparente. O aumento da relação a/c aparente conduz igualmente a outras consequências no betão endurecido, nomeadamente ao aumento da porosidade deste e à conseqüente redução das características de durabilidade.

Da análise dos gráficos representados na Figura 3.30, poderá afirmar-se que não existe diferença significativa entre os AR classificados como “cinza” e os AR “vermelho” em qualquer das categorias de densidades. Esta semelhança de comportamento justifica-se com a grande proximidade de valores de absorção de água para os AR “cinza” e “vermelho” dentro de cada categoria de densidade, conforme indicado no Quadro 3.4. Os coeficientes de correlação obtidos para as famílias de BAR com densidade superior 2,2 kg/m³ são considerados muito bons.

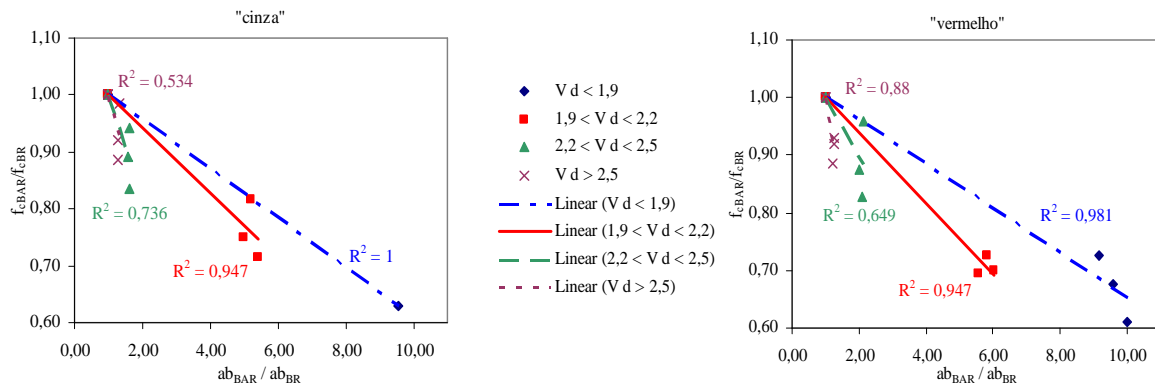


Fig. 3.30 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados “cinza” e “vermelho” (Carrijo, 2005)

Na Figura 3.31, apresenta-se o gráfico resumo com todos os valores da campanha experimental de Carrijo (2005) para a relação entre as resistências à compressão relativa com a relação entre a absorção de água relativa da mistura de agregados. Tal como na propriedade massa volúmica, também no caso da absorção de água é possível verificar a linearidade de comportamento relativamente à resistência à compressão, embora com um coeficiente de correlação mais reduzido, mas ainda assim considerado bom.

A mesma análise foi realizada para a campanha de Kou et al (2004), sendo os resultados ilustrados na Figura 3.32, correspondentes à variação da relação entre resistências à compressão e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura, para os 28 e 90 dias.

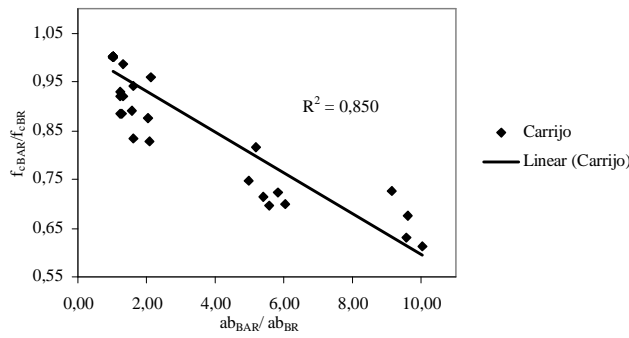


Fig. 3.31 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Carrijo, 2005)

As curvas de regressão linear correspondentes aos vários pontos do gráfico conduziram a coeficientes de correlação considerados bons e muito bom no caso do BAR com 0% de cinzas volantes em ambas as idades e com 25% de cinzas volantes no ensaio aos 28 dias.

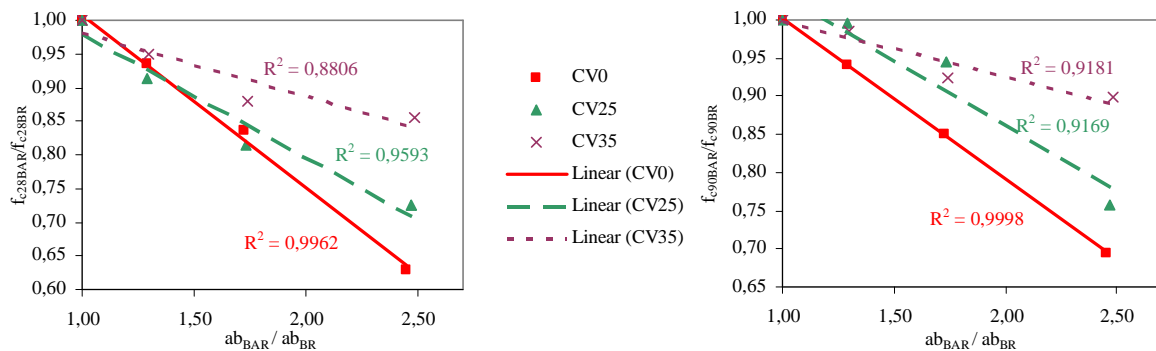


Fig. 3.32 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Kou et al, 2004)

Novamente, nesta campanha experimental, a proximidade de valores de absorção de água dos AR relativa aos AP, como referido em 3.2, condiciona um pouco a análise do comportamento. As características dos AR da campanha experimental de Kou et al (2004) aproximam-se das dos AR com massa volúmica maior do que $2,2 \text{ g/cm}^3$ da campanha experimental de Carrijo (2005).

Na Figura 3.33, representa-se a compilação da variação da relação entre resistências à compressão com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura, para os ensaios realizados aos 28 e 90 dias. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados bons e muito bom.

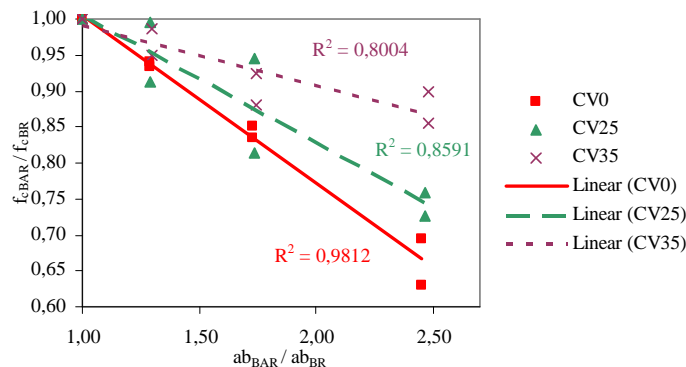


Fig. 3.33 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

A variação em análise é influenciada pelo teor de cinzas volantes presentes nos BAR. Quanto maior o teor de cinzas

volantes adicionadas, menor é a influência da relação entre absorções de água ponderadas dos AR na relação entre resistências à compressão. Na Figura 3.34, representa-se o resumo de valores da campanha de Kou et al (2004) para a variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura.

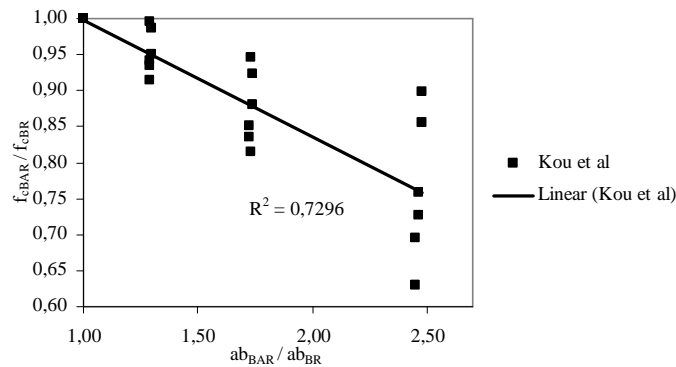


Fig. 3.34 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Kou et al, 2004)

O coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável e indica uma relação linear entre as propriedades analisadas. Através dos valores fornecidos por Leite (2001), obteve-se a Figura 3.35, referente à variação entre relações de absorção de água dos agregados da mistura e a relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias.

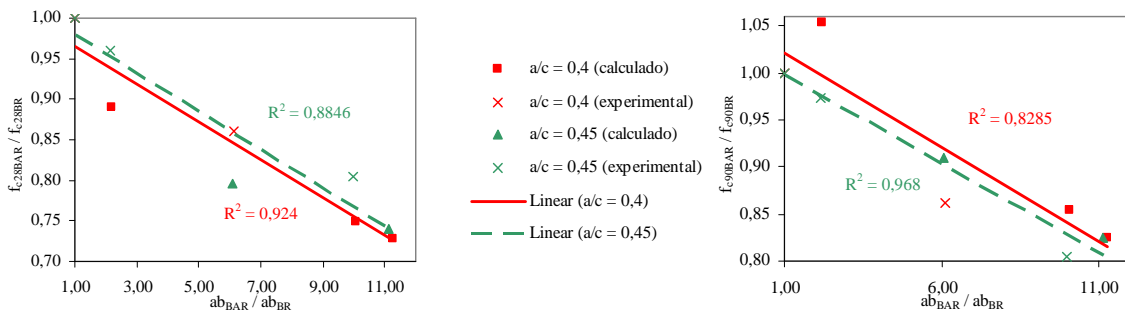


Fig. 3.35 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Leite, 2001)

Tal como na campanha de Carrijo (2005), os valores de absorção de água dos AP diferem em elevado valor dos dos AR. Esta diferença permite obter uma maior variação de valores da relação entre absorções de água. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados bons e, em particular para o BAR com $a/c = 0,45$ aos 90 dias, muito bom. O gráfico resumo para a campanha de Leite (2001), com a compilação dos valores da Figura 3.35 é apresentado na Figura 3.36, cujo coeficiente de correlação é de 0,80, sendo considerado bom.

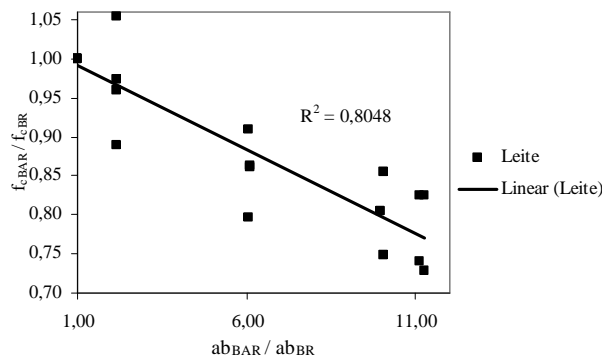


Fig. 3.36 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Leite, 2001)

Na campanha de Soberón (2002), obtiveram-se os resultados representados na Figura 3.37 para a variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias e a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura. Os coeficientes de correlação obtidos são considerados bom e muito bom para os ensaios aos 28 e 90 dias, respectivamente.

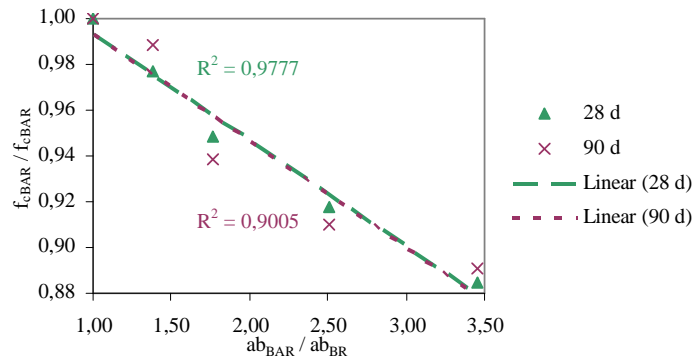


Fig. 3.37 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Soberón, 2002)

Na Figura 3.38, apresenta-se o resumo dos valores representados na Figura 3.37.

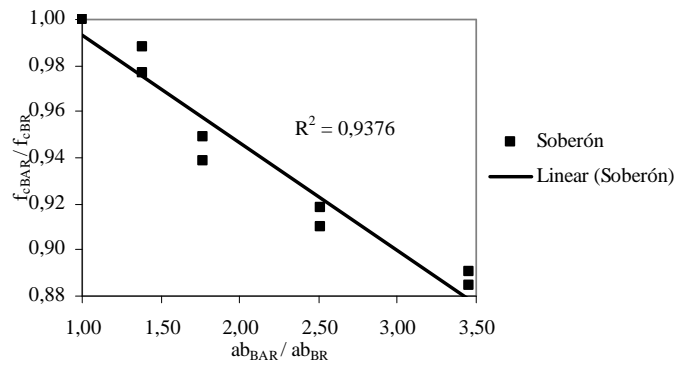


Fig. 3.38 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Soberón, 2002)

O coeficiente de correlação resultante é considerado bom. para os ensaios aos 28 e 90 dias com uma curva de regressão linear única. Na Figura 3.39, representa-se a compilação de valores das campanhas experimentais de Carrijo (aos 28 dias), Kou et al (28 e 90 dias e para betões sem adição de cinzas volantes), Leite (aos 28 e 90 dias) e Soberón (aos 28 e 90 dias). O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado não aceitável.

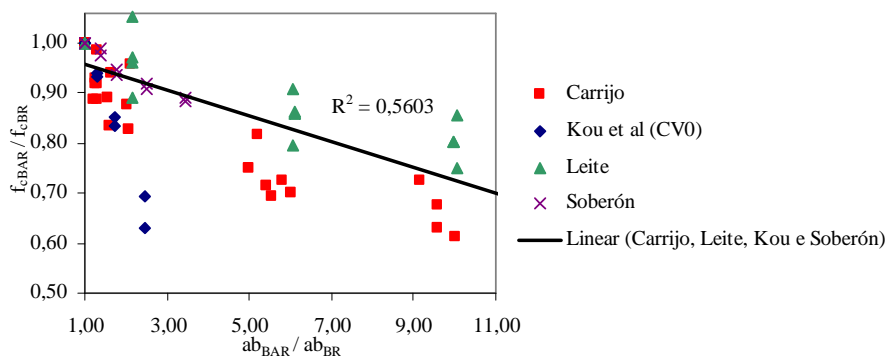


Fig. 3.39 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou et al (0% de cinzas volantes)

Se fossem considerados apenas os dados das campanhas de Carrijo (2005), Leite (2001) e Soberón (2002), o coeficiente de correlação seria de 0,6747, classificado como aceitável, conforme representado na Figura 3.40.

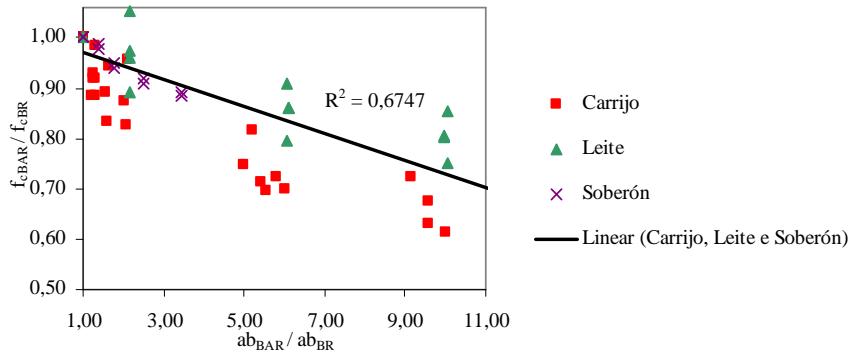


Fig. 3.40 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite e Soberón

Na Figura 3.41, representa-se a mesma compilação de valores, mas apenas para os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias nas campanhas experimentais referidas.

O coeficiente de correlação é superior ao resultado de valores sem cinzas volantes, com todas as campanhas, e é considerado não aceitável, embora muito perto da classificação de aceitável. Mais uma vez, a reduzida relação entre absorções de água na campanha de Kou et al (2004) diminui significativamente o valor do coeficiente de correlação. Caso fossem desprezados os valores de Kou et al (2004) no gráfico da Figura 3.41, seria obtido um valor do coeficiente de correlação de 0,77, conforme apresentado na Figura 3.42.

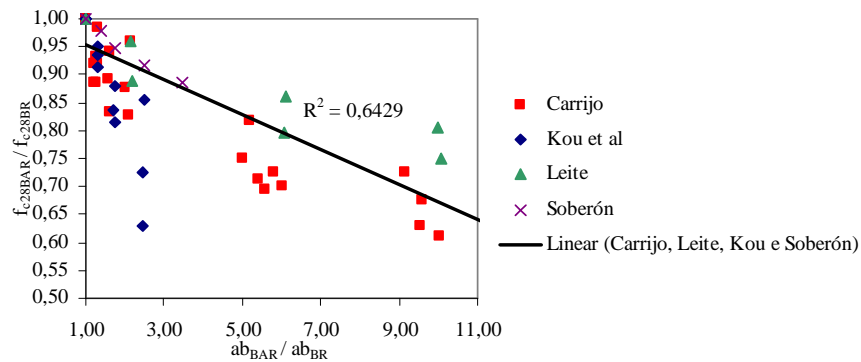


Fig. 3.41 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou et al

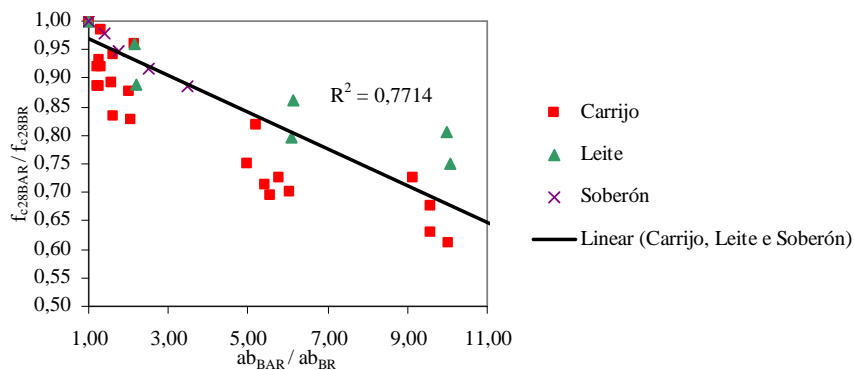


Fig. 3.42 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón

Nas campanhas experimentais de Kou et al (2004), Leite (2001) e Soberón (2002), foram ainda realizados ensaios de resistência à compressão aos 7 dias, podendo assim representar-se a relação entre essas resistências e as resistências aos 28 e 90 dias. A definição clara de uma relação entre a resistência aos 7 dias e a resistência aos 28 ou aos 90 dias permitirá a criação de mecanismos expeditos de controlo de qualidade de produção dos BAR. Na Figura 3.43, representam-se

as relações referidas para os valores de Kou et al (2004). Apenas para os valores de resistência aos 90 dias do betão com 25% de cinzas volantes foi obtido um valor de coeficiente de correlação não aceitável. Para os restantes, o elevado valor daquele coeficiente, considerado bom e muito bom, indicia uma relação linear entre as propriedades analisadas.

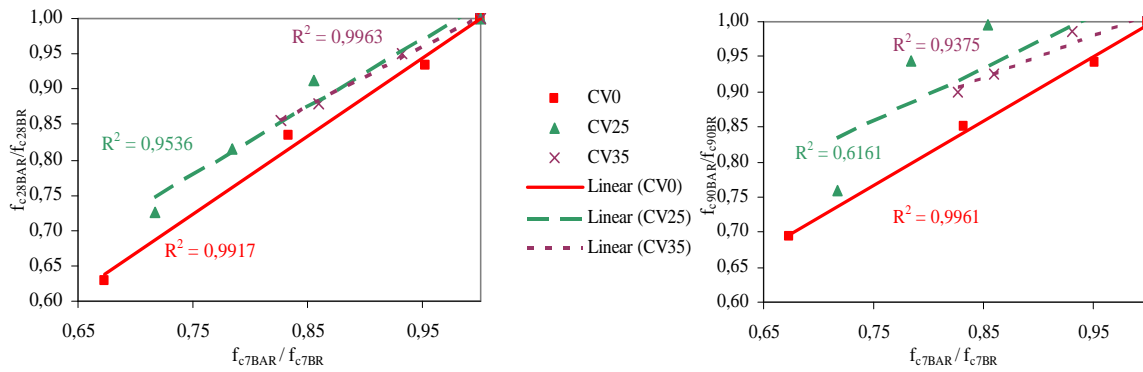


Fig. 3.43 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Na Figura 3.44, representa-se a compilação dos gráficos da Figura 3.43, com a idade de ensaios de 28 e 90 dias. Os coeficientes de correlação são considerados muito bom, bom e aceitável para os betões com 0, 25 e 35% de cinzas volantes, respectivamente.

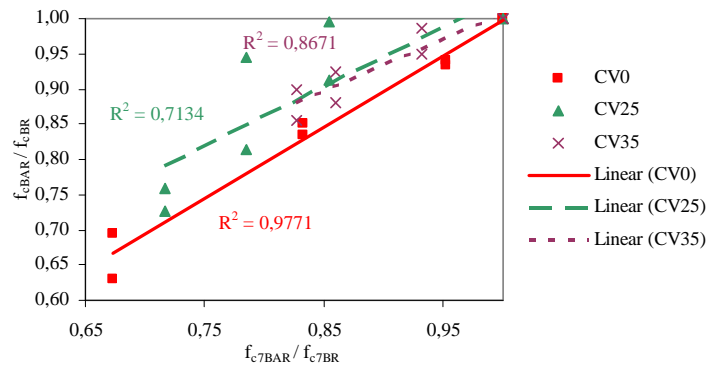


Fig. 3.44 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Apesar da proximidade entre as curvas de regressão linear para teores de 25 e 35% de cinzas volantes, é possível afirmar a existência de influência deste elemento na variação em análise. O aumento do teor de cinzas volantes contribui para a redução da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias. Na Figura 3.45, representa-se o resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias, para as 3 famílias de diferentes teores de cinzas volantes da campanha de Kou et al (2004).

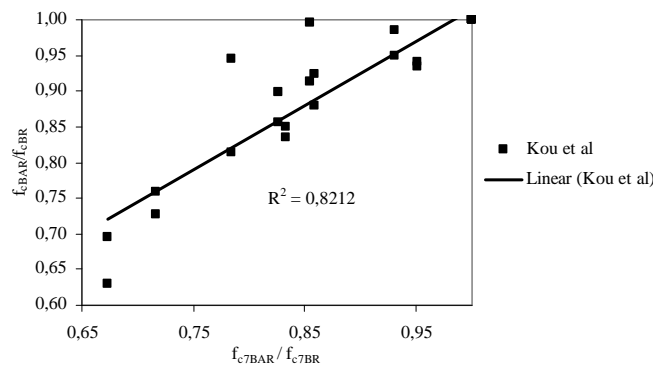


Fig. 3.45 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al)

O valor do coeficiente de correlação obtido foi de 0,8212, sendo considerado bom, o que indica a existência de linearidade entre as relações analisadas.

Para a campanha de Leite (2001), foi realizada análise semelhante. Na Figura 3.46, representa-se a variação entre a relação de resistências à compressão aos 7 dias e a resistência à compressão aos 28 e 90 dias.

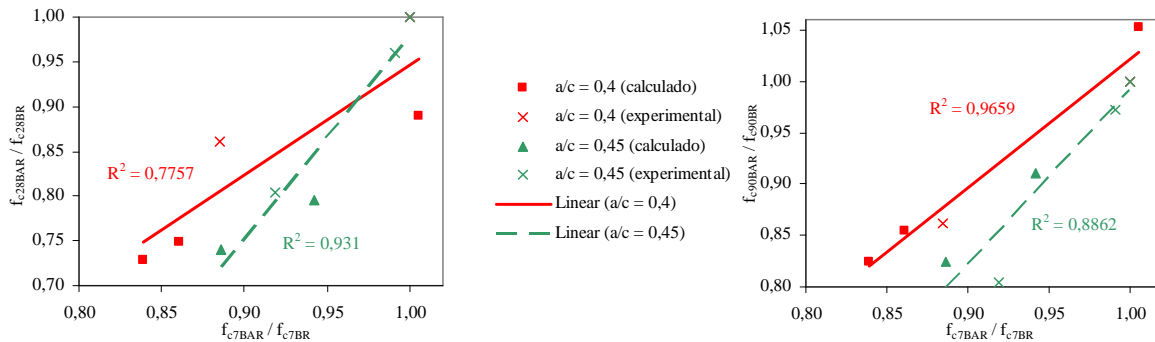


Fig. 3.46 – Variação da relação entre resistências à compressão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Leite, 2001)

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são elevados, sendo considerados bons para a família com a relação $a/c = 0,45$ e muito bom e aceitável, para a família com relação $a/c = 0,4$, aos 28 e 90 dias respectivamente.

O gráfico resumo de Leite (2001) para a variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias é apresentado na Figura 3.47. O valor obtido para o coeficiente de correlação é de 0,7072, sendo considerado aceitável.

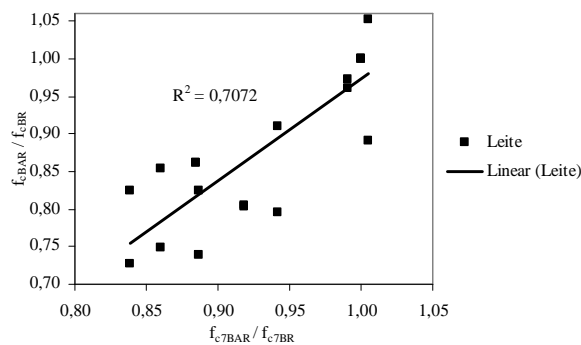


Fig. 3.47 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Leite, 2001)

Para a campanha de Soberón (2002), representa-se na Figura 3.48 a variação em análise. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados não aceitáveis, reflectindo a elevada dispersão de valores.

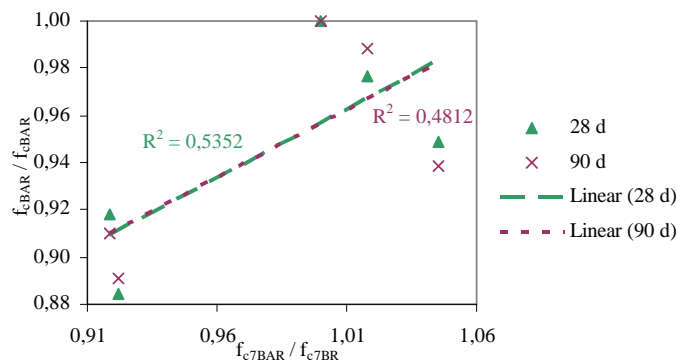


Fig. 3.48 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Soberón, 2002)

Na Figura 3.49, representa-se a compilação de valores da campanha de Soberón (2002). O valor do coeficiente de correlação é reduzido e considerado não aceitável.

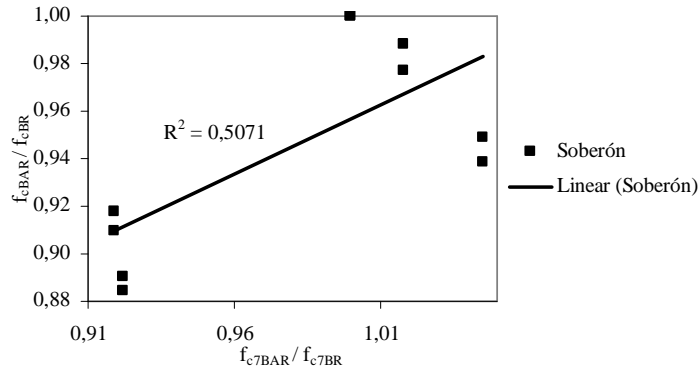


Fig. 3.49 - Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Soberón, 2002)

Na Figura 3.50, representa-se o resumo das campanhas de Leite, Soberón e Kou et al (com 0% de cinzas volantes) para a variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado não aceitável.

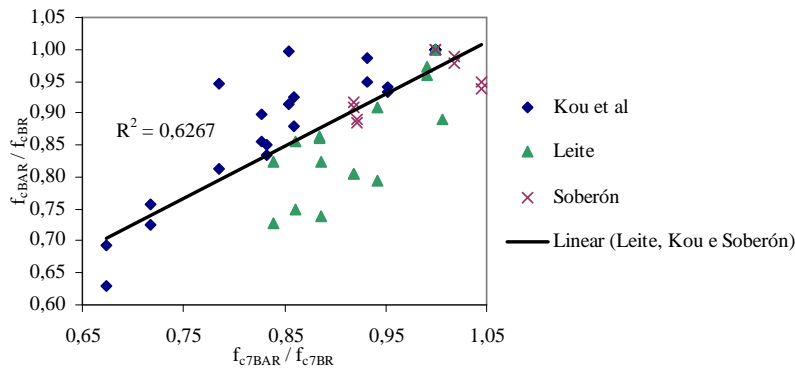


Fig. 3.50 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou et al com 0% de cinzas volantes

Se fossem considerados apenas os dados das campanhas de Leite (2001) e Soberón (2002), o coeficiente de correlação seria de 0,6747, classificado como aceitável, conforme representado na Figura 3.51.

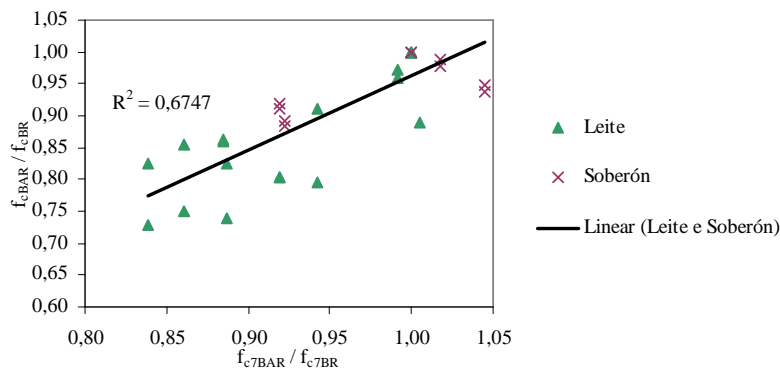


Fig. 3.51 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite e Soberón

Na Figura 3.52, representa-se o mesmo resumo, mas apenas para a variação entre resistências à compressão aos 28 dias. O coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável. Não considerando os resultados da campanha de Kou et al (2004), o valor do coeficiente de correlação aumentaria para o valor de 0,7203, sendo também considerado aceitável, conforme representado na Figura 3.53.

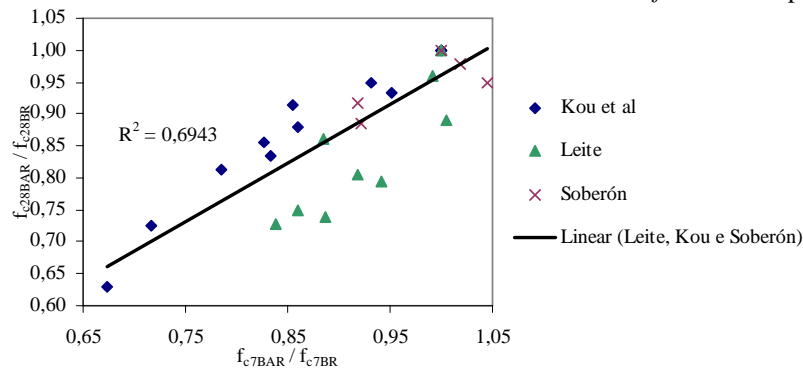


Fig. 3.52 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou et al

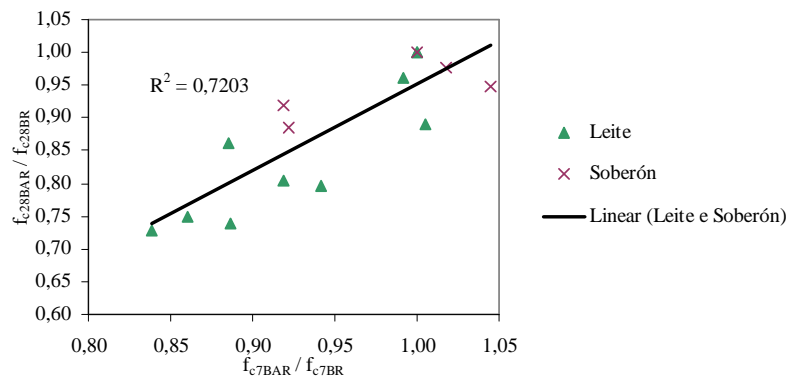


Fig. 3.53 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón

3.4.2 Módulo de elasticidade

Na propriedade módulo de elasticidade do betão, é expectável uma diminuição da mesma propriedade com o aumento da taxa de substituição de AP por AR. Este comportamento justifica-se directamente pelo menor módulo de elasticidade dos AR relativamente aos AP. A maior porosidade dos AR contribui para o aumento das deformações destes agregados e, conseqüentemente, dos betões constituídos por AR relativamente aos constituídos por AP.

Na campanha de Carrijo (2005), foram realizados ensaios para obtenção do módulo de elasticidade do betão aos 28 dias, de acordo com as especificações da norma brasileira NBR 8522. Os valores obtidos para esta propriedade estão representados no Quadro 3.15.

Destacam-se os valores do módulo de elasticidade dos BAR para as classes de densidade mais elevada, que para as várias relações a/c, são superiores aos mesmos valores dos BR. Na sua dissertação, Carrijo (2005) não comenta estes resultados, que contrariam a generalidade das campanhas experimentais, conforme refere Brito (2005).

Quadro 3.15 – Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias (Carrijo, 2005)

BAR por categoria de agregados	Módulo de elasticidade (GPa)		
	a/c = 0,4	a/c = 0,5	a/c = 0,67
C d < 1,9	19,5	-	-
V d < 1,9	20	18,25	16,34
C 1,9 < d < 2,2	24,75	23,91	19,31
V 1,9 < d < 2,2	21,76	21,62	17,4
C 2,2 < d < 2,5	32,52	31,91	27,54
V 2,2 < d < 2,5	35,92	29,1	25,32
C d > 2,5	34,01	32,29	29,35
V d > 2,5	35,56	32,28	30,95
BR	32,42	29,78	27,07

Na Figura 3.54, representam-se as relações entre a taxa de substituição dos AP por AR e o módulo de elasticidade do betão, para os agregados do tipo “cinza” e “vermelho”.

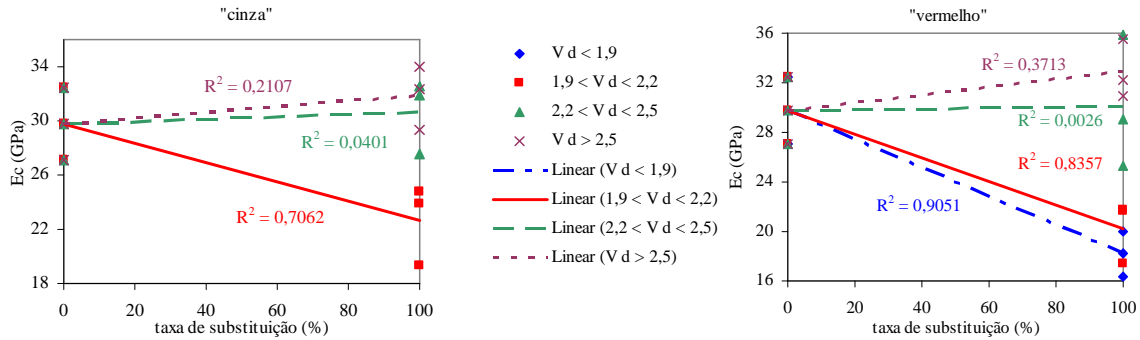


Fig. 3.54 – Variação do módulo de elasticidade aos 28 dias do betão com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” para as várias relações a/c (Carrijo, 2005)

O comportamento expectável do módulo de elasticidade relativamente à substituição dos agregados corresponde às rectas de correlação para as densidades inferiores a 2,2 g/cm³, em que se regista um decréscimo de valor daquela propriedade. No Quadro 3.16, confirma-se a tendência, referida por Brito (2005), de maior redução percentual do módulo de elasticidade em comparação com a resistência à compressão (ainda que de forma menos acentuada do que em outras campanhas experimentais), verificando-se apenas a excepção para os valores do BAR da classe C 1,9 < d < 2,2 (a/c = 0,4). A influência das propriedades dos AR é superior na propriedade módulo de elasticidade dos BAR do que na resistência à compressão destes. Atendendo a que o módulo de elasticidade representa a relação tensão-deformação do betão, a redução constatada traduz-se em maiores deformações dos BAR e, conseqüentemente, maiores efeitos na durabilidade destes betões.

Apesar do carácter anormal de alguns dos resultados, para as categorias de massa volúmica superior a 2,2 g/cm³, é possível afirmar que a redução do módulo de elasticidade está directamente relacionada com o aumento da relação a/c e com a redução da massa volúmica dos AR. Quanto mais elevada for a relação a/c, menor rigidez terá a pasta de cimento.

Quadro 3.16 – Redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do BAR relativamente ao BR para as categorias de agregados inferiores a 2,2 g/cm³ (Carrijo, 2005)

BAR por categoria de agregados	Redução das propriedades do BAR relativamente ao BR					
	Resistência à compressão (%)			Módulo de elasticidade (%)		
	a/c = 0,4	a/c = 0,5	a/c = 0,67	a/c = 0,4	a/c = 0,5	a/c = 0,67
C d < 1,9	37,06	-	-	39,85	-	-
V d < 1,9	38,82	32,41	27,50	38,31	38,72	39,64
C 1,9 < d < 2,2	28,63	18,36	25,13	23,66	19,71	28,67
V 1,9 < d < 2,2	30,02	27,55	30,47	32,88	27,40	35,72

A análise mencionada repete-se na Figura 3.55, onde se representam as variações da relação entre o módulo de elasticidade do BAR e o do BR e a taxa de substituição dos AP por AR, para os AR do tipo “cinza” e “vermelho”.

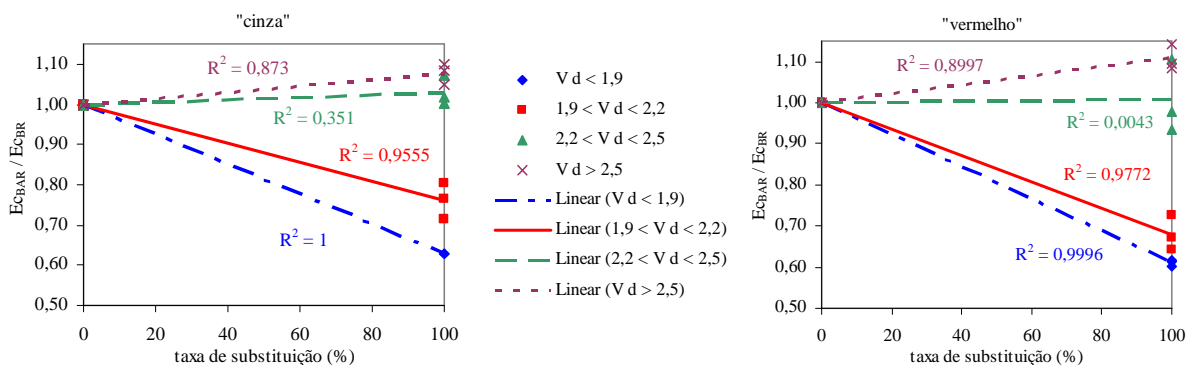


Fig. 3.55 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR “cinza” e “vermelho” (Carrijo, 2005)

Comparando os valores dos BAR com AR tipo “cinza” e “vermelho”, poder-se-á afirmar que a redução do módulo de elasticidade é superior nos segundos devido à menor massa volúmica dos agregados da mistura.

Na campanha de Kou et al (2004), foram obtidos os resultados para o módulo de elasticidade aos 28 e 90 dias, apresentados no Quadro 3.17. Com o aumento da taxa de substituição dos AP por AR, regista-se uma diminuição do módulo de elasticidade. A maior absorção dos AR provoca um aumento da relação a/c , conduzindo a uma redução do módulo de elasticidade. Na Figura 3.56, representam-se as relações entre a taxa de substituição de AP por AR e o módulo de elasticidade para os 28 e 90 dias. O efeito de hidratação do cimento volta a notar-se na comparação entre os dois gráficos da Figura 3.56, com o elevado aumento da relação entre módulos de elasticidade dos BAR *versus* os BR dos 28 para os 90 dias.

Quadro 3.17 – Módulo de elasticidade do betão (Kou et al, 2004)

Betões	Módulo de elasticidade (GPa)			
	cura por imersão em água		cura inicial por vapor	
	28 d	90 d	28 d	90 d
BR _{CV0}	38,7	39,5	32,3	34,3
BAGR20 _{CV0}	29,1	36,5	30,4	34,3
BAGR50 _{CV0}	26,0	33,2	26,6	31,0
BAGR100 _{CV0}	23,4	28,5	22,8	27,6
BR _{CV25}	36,3	34,6	32,0	33,6
BAGR20 _{CV25}	29,3	31,6	28,5	31,9
BAGR50 _{CV25}	27,1	29,1	30,2	30,6
BAGR100 _{CV25}	23,2	26,2	25,5	26,5
BR _{CV35}	31,3	33,9	29,6	32,3
BAGR20 _{CV35}	26,3	30,5	29,8	31,0
BAGR50 _{CV35}	23,2	25,9	23,8	31,6
BAGR100 _{CV35}	23,2	28,9	27,4	29,2

Os gráficos foram realizados apenas para a cura por imersão em água, atendendo à necessidade de uniformização de critérios entre as campanhas experimentais, conforme explicado em 3.4.1.

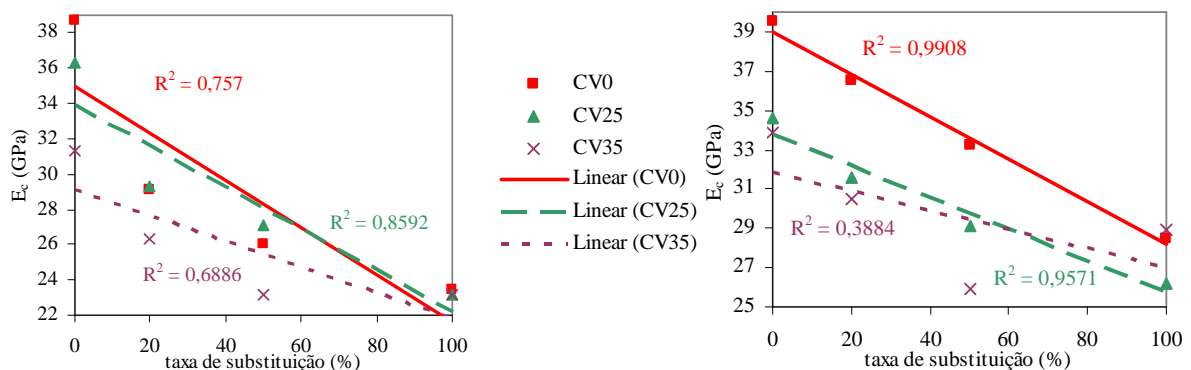


Fig. 3.56 – Variação do módulo de elasticidade do betão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR (Kou et al, 2004)

Os valores dos coeficientes de correlação para os ensaios do módulo de elasticidade são considerados aceitáveis para os 28 dias e bons e muito bom para os 90 dias, à excepção da família com 35% de cinzas volantes. Destaca-se, em especial, a linearidade da variação do comportamento do betão com 0% de cinzas volantes ensaiado aos 90 dias.

Para os valores da variação da relação dos módulos de elasticidade com a taxa de substituição, apresenta-se a Figura 3.57. Os resultados obtidos para os vários coeficientes de correlação mantêm a mesma classificação.

Para a campanha de Leite (2001), foram obtidos os valores do módulo de elasticidade aos 28 dias representados no Quadro 3.18. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma brasileira NBR 8522 (1983).

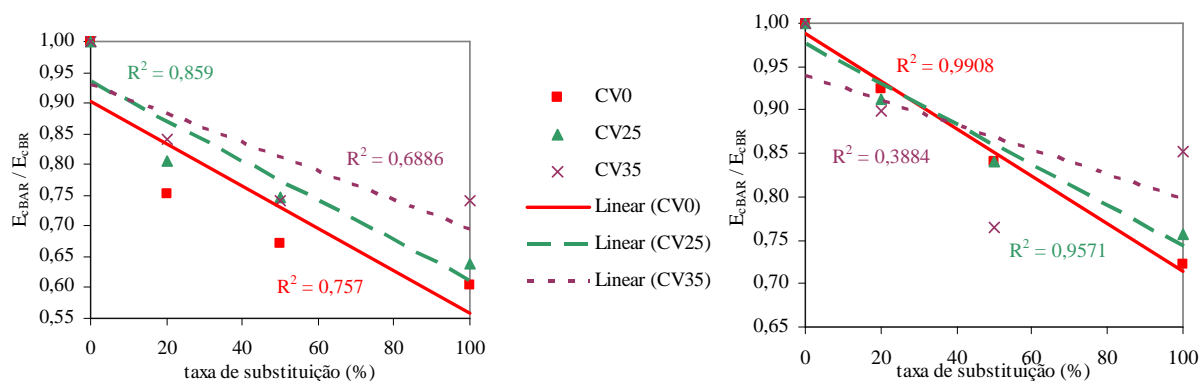


Fig. 3.57 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR (Kou et al, 2004)

Conforme referido, também para esta propriedade os valores a considerar na presente análise são de origem experimental directa (a vermelho no quadro) e de projecção matemática de Leite (a preto no quadro).

Quadro 3.18 – Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias (Leite, 2001)

Betões	a/c	E_c (GPa)
BR		30,70
BAR11,5		26,84
BAR50	0,4	25,20
BAR88,5		21,96
BAR100		20,73
BR		31,40
BAR11,5		23,13
BAR50	0,45	22,34
BAR88,5		16,63
BAR100		17,93

Na Figura 3.58, apresenta-se a relação entre o módulo de elasticidade aos 28 dias e a taxa de substituição de AP por AR.

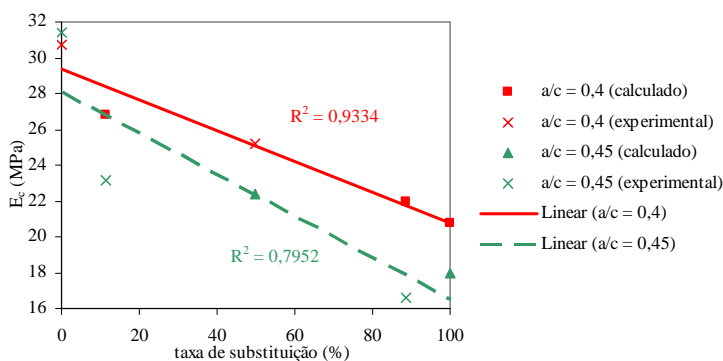


Fig. 3.58 – Variação do módulo de elasticidade do betão aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR (Leite, 2001)

O valor do coeficiente de correlação é considerado bom para a relação $a/c = 0,4$ e aceitável para $a/c = 0,45$. Destaca-se a diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da relação a/c , que poderá ser atribuída ao empobrecimento da mistura em termos de quantidade de cimento adicionada.

Na Figura 3.59, representa-se a variação da relação entre módulos de elasticidade e a taxa de substituição de AP por AR. A variação analisada é coerente com as restantes campanhas e aplicam-se-lhe as justificações então mencionadas. Na campanha de Soberón (2002), obtiveram-se os valores para o módulo de elasticidade aos 7, 28 e 90 dias, apresentados no Quadro 3.19. Os ensaios para obtenção do módulo de elasticidade foram realizados de acordo com a norma UNE-83-316-96.

Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados
Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional

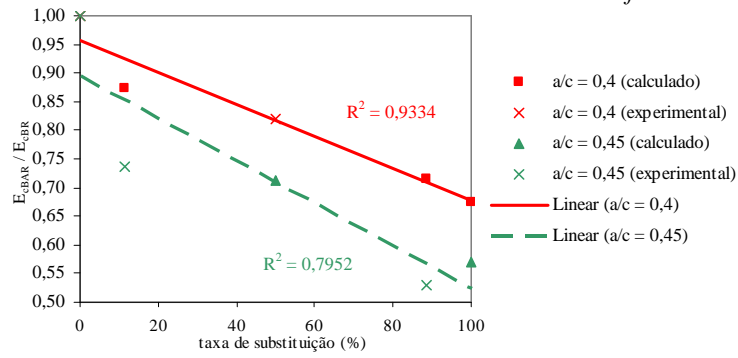


Fig. 3.59 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR (Leite, 2001)

Quadro 3.19 – Módulo de elasticidade do betão aos 7, 28 e 90 dias (Soberón, 2002)

Betões	Módulo de elasticidade (GPa)		
	7 d	28 d	90 d
BR	27,60	29,70	32,40
BAR15	27,20	29,10	30,10
BAR30	26,50	27,80	29,40
BAR60	25,50	26,60	27,60
BAR100	26,90	26,70	26,40

Recorrendo aos valores apresentados, foi realizado o gráfico representado na Figura 3.60 com a relação entre a taxa de substituição e o módulo de elasticidade aos 28 e 90 dias. Nesta representação e nas seguintes, optou-se por apresentar apenas os resultados aos 28 e 90 dias, dada a necessidade de comparação com as restantes campanhas que apresentam resultados com a mesma idade de ensaios. A tendência registada nas restantes campanhas, e referida no início do ponto 3.4.2, confirma-se com os valores de Soberón (2002). Os valores do coeficiente de correlação são considerados bons.

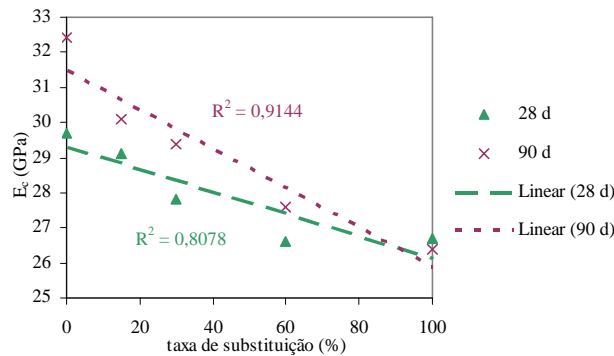


Fig. 3.60 – Variação do módulo de elasticidade do betão aos 28 e 90 dias com a taxa de substituição de AP por AR (Soberón, 2002)

Na Figura 3.61, representa-se a variação da relação entre módulos de elasticidade e a taxa de substituição dos AP por AR.

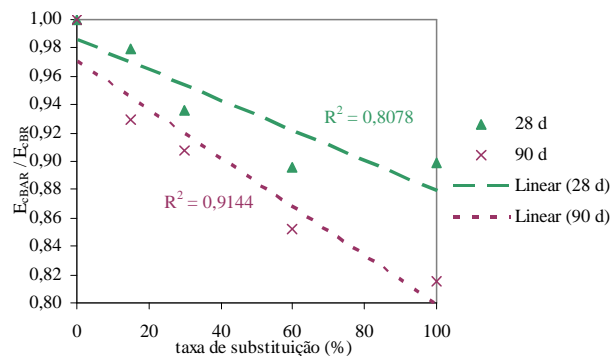


Fig. 3.61 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a taxa de substituição de AP por AR (Soberón, 2002)

Os valores obtidos para o coeficiente de correlação são considerados bons.

Na Figura 3.62, apresentam-se, para a campanha de Carrijo (2005), as variações da relação entre módulos de elasticidade com a relação entre massas volúmicas ponderadas.

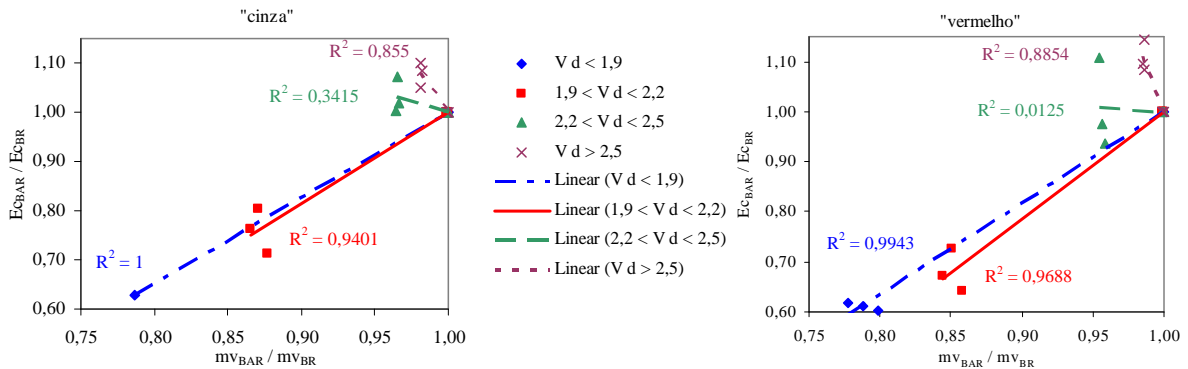


Fig. 3.62 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da classe “cinza” e “vermelho” (Carrijo, 2005)

Ignorando os valores para as categorias de densidade superior a 2,2 g/cm³ e compilando os resultados válidos para um único gráfico, Figura 3.63, poder-se-á registar um comportamento linear da relação entre módulos de elasticidade relativamente à relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura. O valor para o coeficiente de correlação para esta aproximação linear é de 0,9692, sendo considerado muito bom. Esta conclusão é limitada aos poucos resultados considerados válidos na campanha experimental de Carrijo (2005).

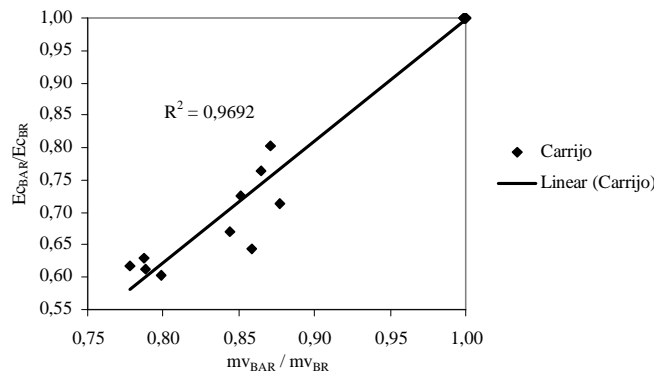


Fig. 3.63 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Carrijo, 2005)

Também na campanha experimental de Kou et al (2004), as massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura foram relacionadas com os módulos de elasticidade na Figura 3.64.

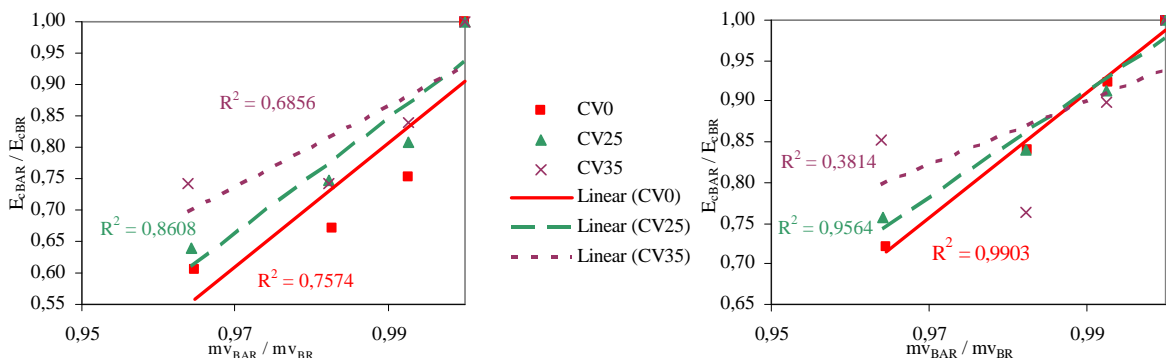


Fig. 3.64 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Novamente, os valores dos coeficientes de correlação foram muito superiores (considerados muito bons) no caso dos ensaios realizados em provetes com 90 dias de idade relativamente aos ensaios aos 28 dias (cujos coeficientes foram considerados apenas aceitáveis e bons), à excepção da família com 35% de cinzas volantes. Na Figura 3.65, reúnem-se os resultados apresentados na Figura 3.64.

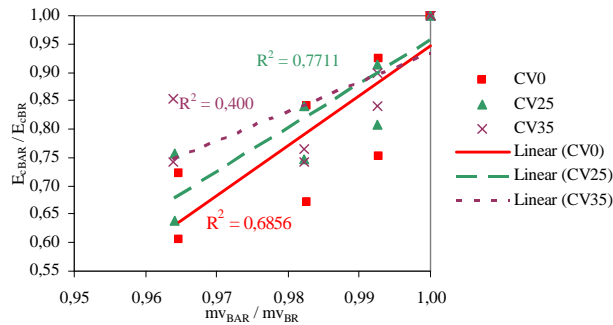


Fig. 3.65 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúnicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Apesar de a curva de regressão linear relativa ao teor de 35% de cinzas volantes indicar um coeficiente de correlação não aceitável, as restantes apresentam valores aceitáveis. Destaca-se também nesta relação a influência da adição de cinzas volantes e a contribuição destas para a redução da variação em análise.

Na Figura 3.66, representa-se o resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre as massas volúnicas ponderadas dos agregados da mistura, sendo o coeficiente de correlação considerado não aceitável, reflectindo a elevada dispersão provocada pelas diversas famílias de teores de cinzas volantes.

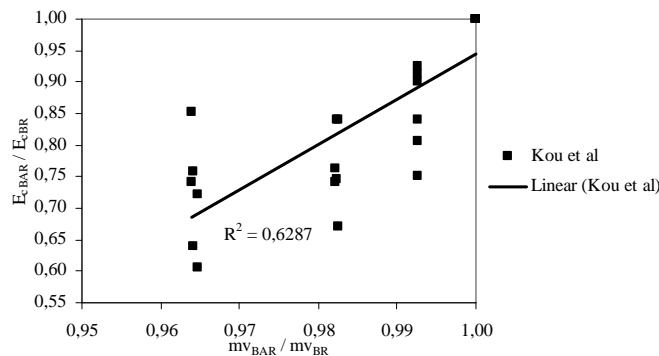


Fig. 3.66 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúnicas ponderadas dos agregados da mistura (Kou et al, 2004)

Para a campanha de Leite (2001), obtiveram-se os resultados representados na Figura 3.67 para a variação entre a relação de módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúnicas ponderadas dos agregados da mistura, tendo-se obtido coeficientes de correlação considerados bom e aceitável, para cada uma das famílias em análise.

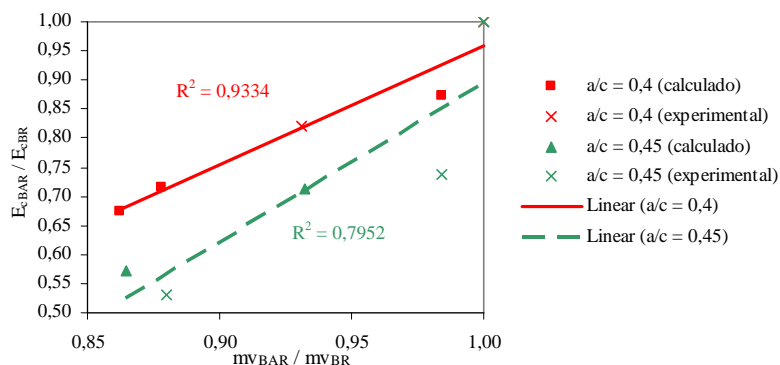


Fig. 3.67 –Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúnicas ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

Capítulo 3 – Campanhas experimentais e resultados

Na Figura 3.68, representa-se o resumo da variação representada para os valores de Leite para os 2 tipos de relação a/c. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado aceitável, reflectindo a dispersão de valores introduzida pela variação da relação a/c.

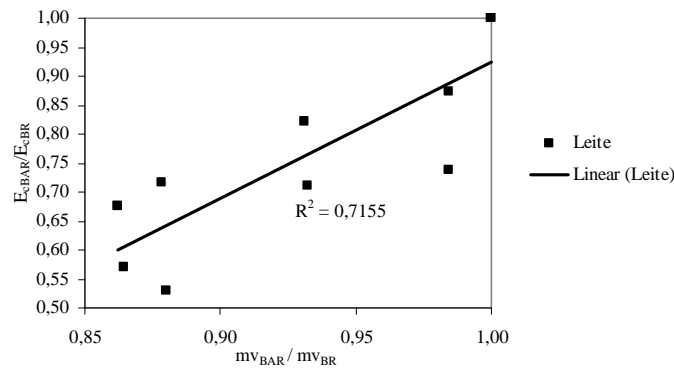


Fig. 3.68 –Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

Para a campanha de Soberón (2002), apresenta-se a Figura 3.69 com a variação em análise. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados bons.

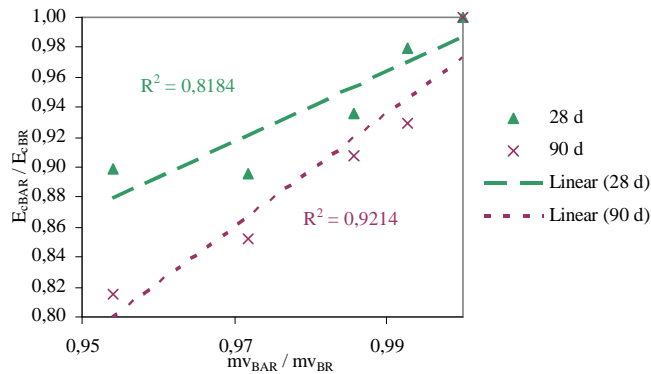


Fig. 3.69 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Soberón, 2002)

O gráfico resumo correspondente aos valores experimentais de Soberón é representado na Figura 3.70. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado aceitável.

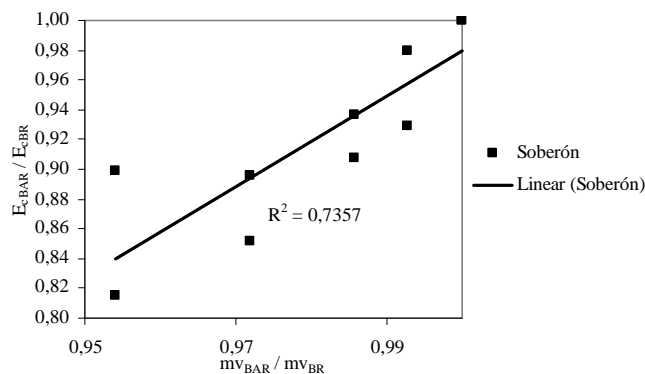


Fig. 3.70 –Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Soberón, 2002)

Na Figura 3.71, representam-se os valores experimentais de Carrijo (aos 28 dias), Leite (aos 28 dias), Soberón (aos 28 e 90 dias) e de Kou et al (aos 28 e 90 dias e para betões sem adição de cinzas volantes), para a variação da relação entre

módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura.

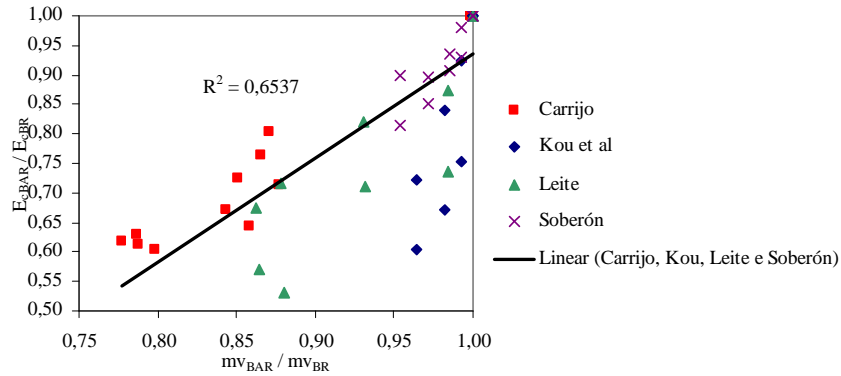


Fig. 3.71 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou et al (0% de cinzas volantes)

O valor do coeficiente de correlação é considerado aceitável.

Se fossem considerados apenas os dados das campanhas de Carrijo (2005), Leite (2001) e Soberón (2002), o coeficiente de correlação seria superior (com o valor de 0,813), sendo classificado como bom, conforme representado na Figura 3.72.

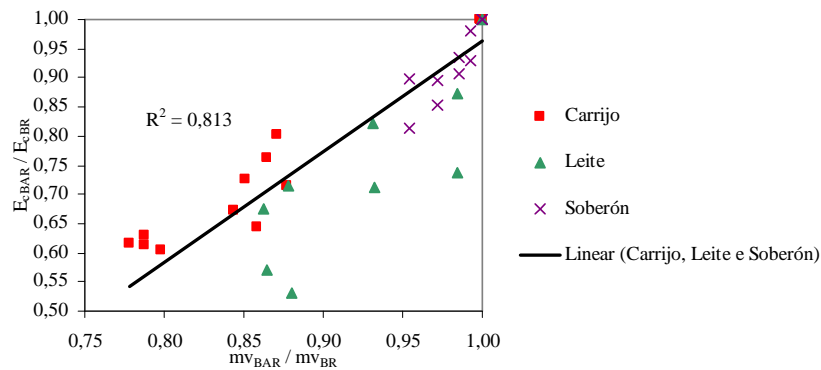


Fig. 3.72 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Carrijo, Leite e Soberón

Na Figura 3.73, representa-se a mesma variação, mas incluindo os valores para todos os betões com diferentes teores de cinzas volantes ensaiados aos 28 dias.

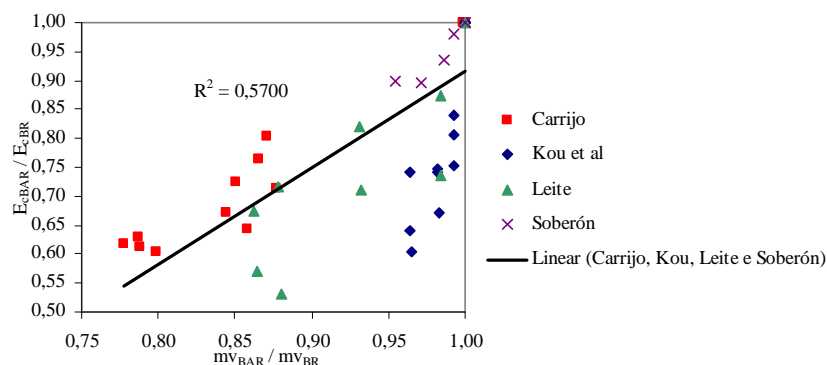


Fig. 3.73 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou et al

O coeficiente de correlação obtido é considerado não aceitável, sobretudo pela dispersão introduzida pela campanha de Kou et al (2004). Caso não fossem considerados esses valores, o coeficiente de correlação seria considerado bom, con-

forme representado na Figura 3.74.

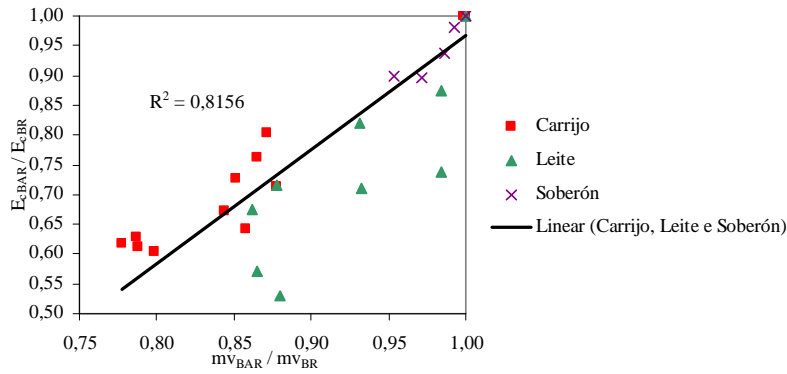


Fig. 3.74 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón

Realizou-se a mesma análise de valores relativos para a propriedade de absorção de água dos agregados da mistura. Na Figura 3.75, representam-se as variações da relação entre módulos de elasticidade do BAR e do BR com a relação entre massas volúmicas ponderadas, calculadas através da equação 3.2, para a campanha de Carrijo (2005).

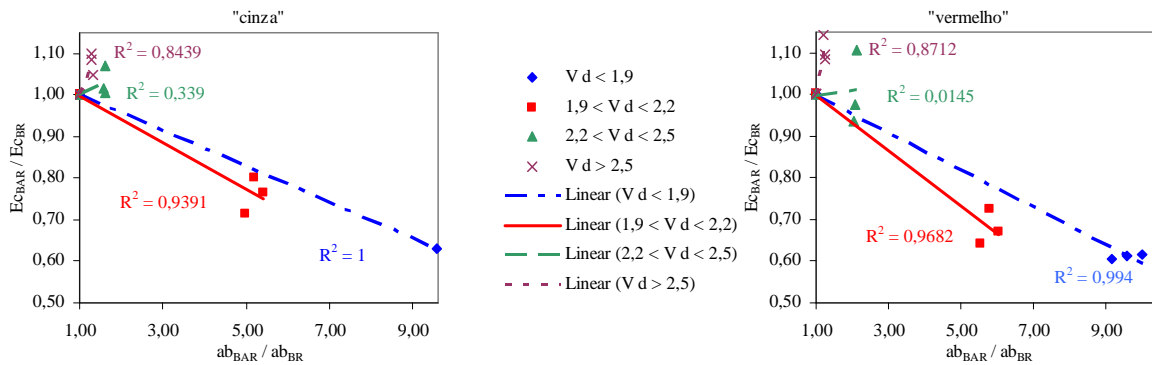


Fig. 3.75 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados da classe “cinza” e “vermelho” (Carrijo, 2005)

A redução da relação entre módulos de elasticidade é tanto maior quanto maior for a relação entre absorções de água da mistura dos agregados. Comparando o comportamento da relação entre módulos de elasticidade dos BAR da classe “cinza” com os da classe “vermelho”, registar-se-á a maior redução dos segundos, pela sua maior capacidade de absorção de água.

A compilação de valores na Figura 3.76 e respectiva recta de correlação linear com coeficiente $R^2 = 0,9301$, considerado bom, indiciam um comportamento linear da relação entre a absorção de água da mistura dos agregados e o módulo de elasticidade do betão.

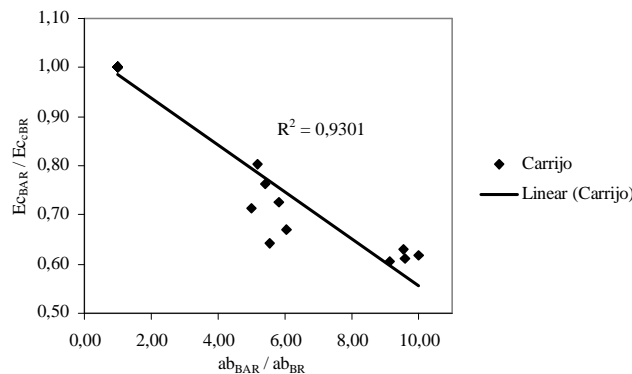


Fig. 3.76 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Carrijo, 2005)

A mesma análise foi realizada para os valores da campanha experimental de Kou et al (2004), tendo sido obtidos os gráficos representados na Figura 3.77.

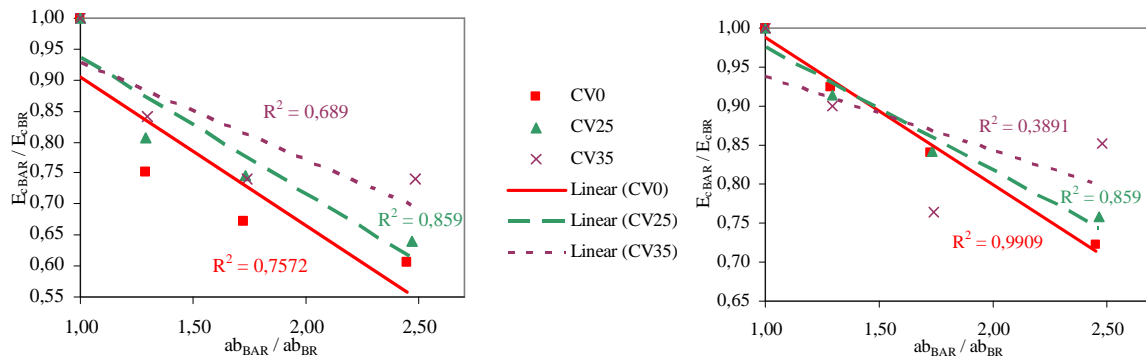


Fig. 3.77 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Kou et al, 2004)

A diminuição da relação entre módulos de elasticidade, com o aumento da relação entre absorções de água, justificar-se-á com a diminuição da rigidez dos agregados com maior absorção de água (logo, maior porosidade). Na campanha experimental de Kou et al (2004), não é especificado se existe algum procedimento de compensação da quantidade de água adicionada na mistura, ou pré-saturação dos AR.

Na Figura 3.78, representa-se num só gráfico as variações referidas na Figura 3.77. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação para as famílias de betões com 0 e 25% de cinzas volantes são considerados aceitável e bom, respectivamente. Novamente, a representação gráfica indicia uma influência da adição de cinzas volantes na variação da relação entre módulos de elasticidade com a relação entre absorções de água dos agregados.

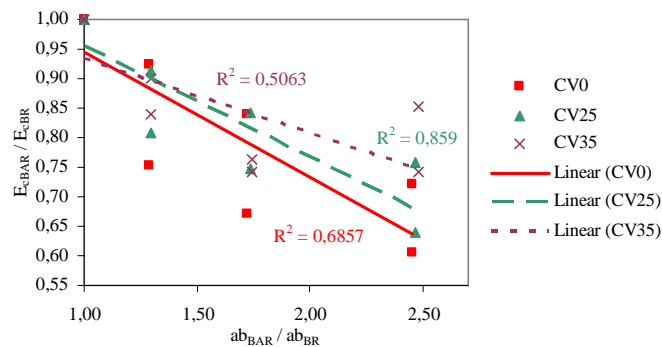


Fig. 3.78 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Na Figura 3.79, representa-se o resumo da variação da relação em análise para a campanha de Kou et al (2004), tendo-se obtido um coeficiente de correlação considerado não aceitável.

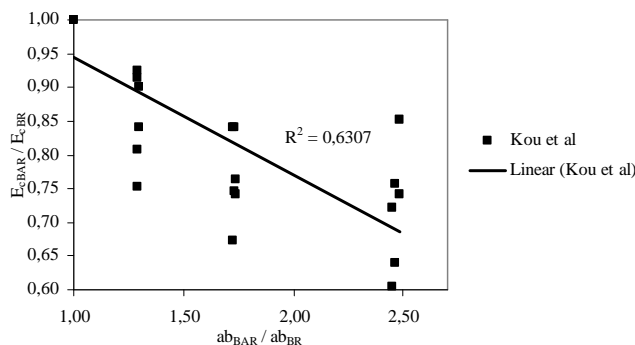


Fig. 3.79 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Kou et al, 2004)

Para a campanha de Leite (2001), representa-se na Figura 3.80 a variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura, com coeficientes de correlação considerados aceitável ou bom.

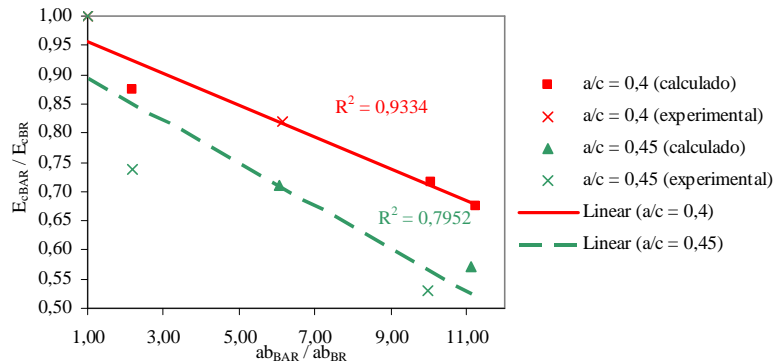


Fig. 3.80 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água da mistura de agregados (Leite, 2001)

O resumo da variação referida é ilustrado na Figura 3.81, juntando os dois valores de relação a/c.

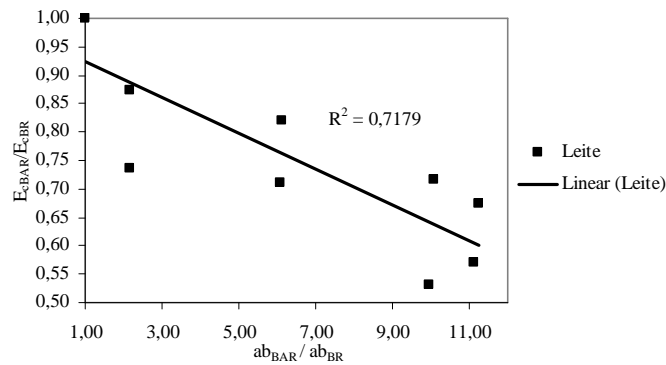


Fig. 3.81 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Leite, 2001)

O valor do coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável, reflectindo a relativa dispersão introduzida por cada uma das famílias.

Para a campanha de Soberón (2004), representa-se a mesma relação na Figura 3.82. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados bons.

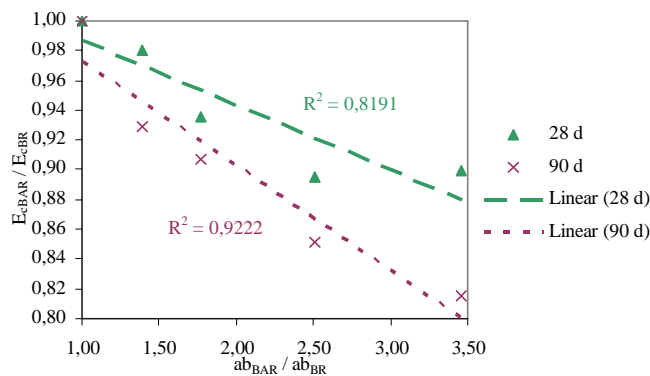


Fig. 3.82 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Soberón, 2004)

A mesma informação é apresentada na Figura 3.83 em forma de gráfico resumo. O valor do coeficiente de correlação é de 0,7363, considerado aceitável.

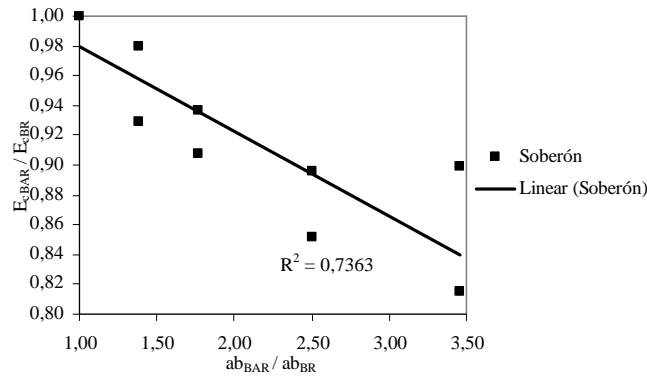


Fig. 3.83 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Soberón, 2004)

Na Figura 3.84, resumem-se as campanhas experimentais de de Carrijo (aos 28 dias), Leite (aos 28 dias), Soberón (aos 28 e 90 dias) e de Kou et al (aos 28 e 90 dias e para betões sem adição de cinzas volantes). O coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável, reflectindo a dispersão de valores entre as campanhas e sobretudo a baixa relação de absorções de água dos agregados da mistura de Kou et al (2004). Se fossem considerados apenas os dados das campanhas de Carrijo (2005), Leite (2001) e Soberón (2002), o coeficiente de correlação seria de 0.8523, sendo classificado como bom, conforme representado na Figura 3.85.

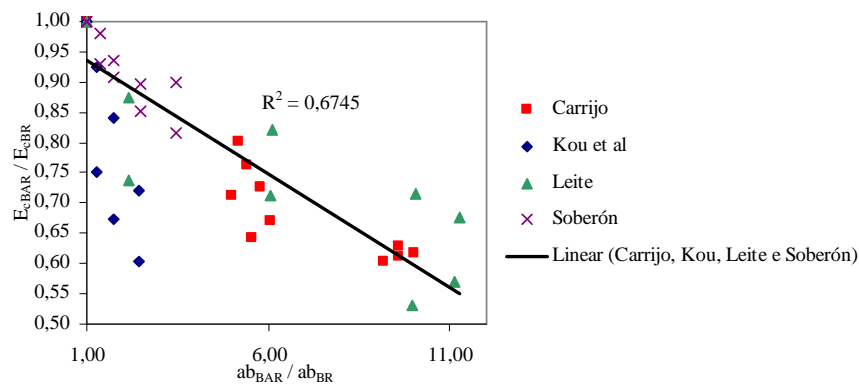


Fig. 3.84 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou et al (0% de cinzas volantes)

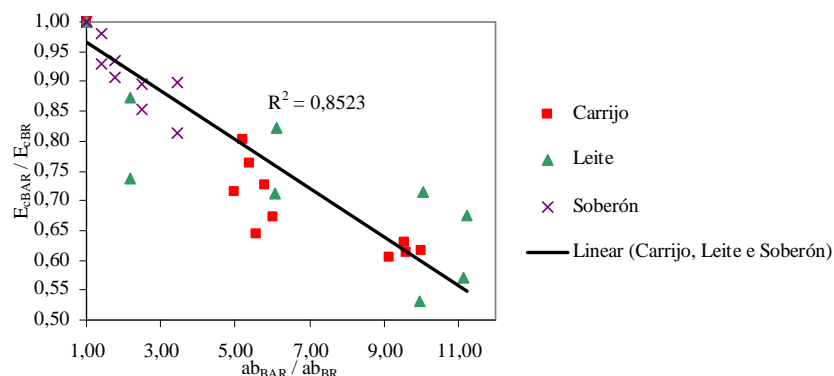


Fig. 3.85 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón

Na Figura 3.86, representa-se a mesma variação, mas apenas para valores experimentais do módulo de elasticidade aos 28 dias, incluindo todas as famílias com adição de cinzas volantes. O coeficiente de correlação piorou, sendo considerado não aceitável.

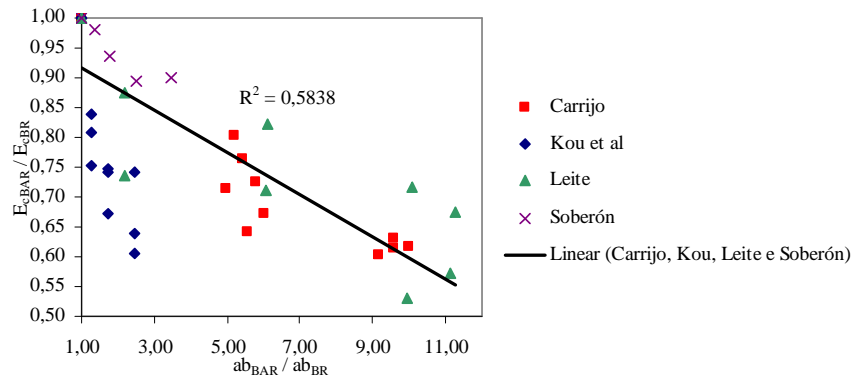


Fig. 3.86 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou et al

Se, na variação representada na Figura 3.86, não fossem considerados os valores experimentais de Kou et al (2004), o coeficiente de correlação seria de 0,8545, considerado bom. O gráfico correspondente é representado na Figura 3.87.

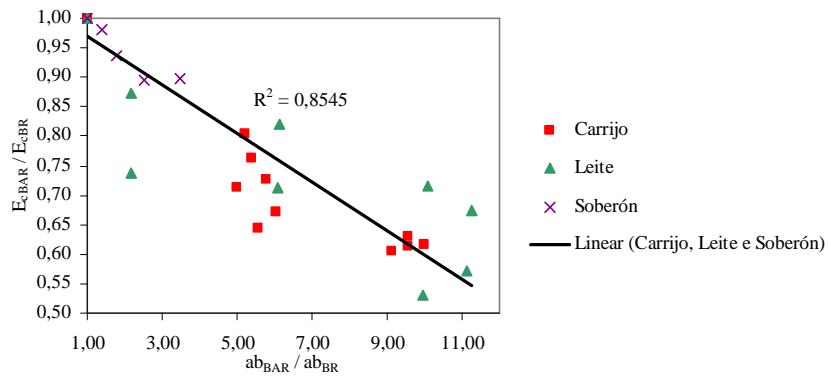


Fig. 3.87 – Resumo da variação da relação dos módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as campanhas de Carrijo, Leite e Soberón

A análise da variação da relação entre módulos de elasticidade com a relação entre resistência à compressão aos 7 dias realizou-se para as campanhas com valores disponíveis. A Figura 3.88 representa esta variação para a campanha de Kou et al (2004), aos 28 e 90 dias. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitáveis, bons e muito bons. Poderá afirmar-se a existência de relação linear entre as propriedades.

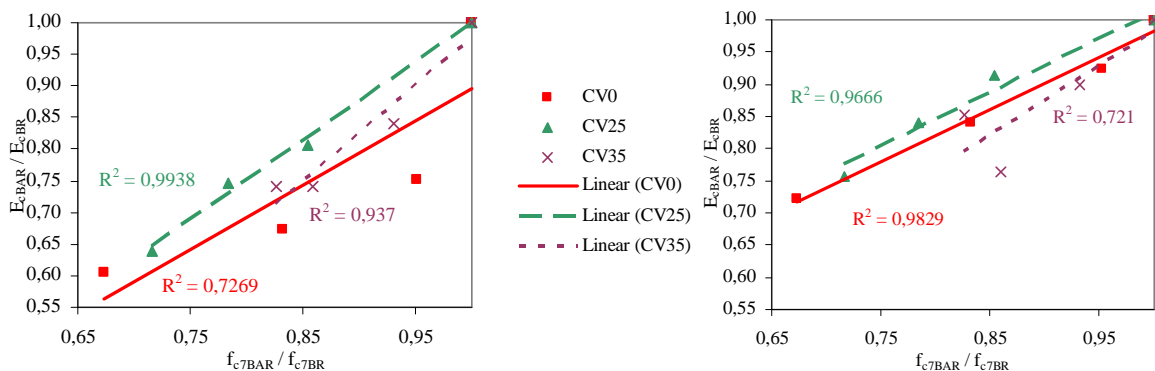


Fig. 3.88 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Na Figura 3.89, representa-se a compilação dos gráficos da Figura 3.88, agrupando os valores experimentais da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias por famílias de adição de cinzas volantes.

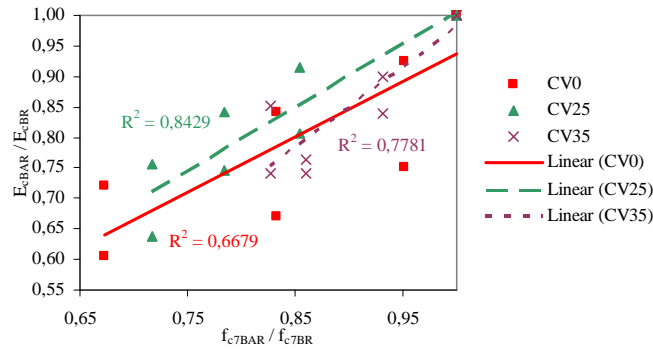


Fig. 3.89 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação para cada uma das famílias de betões são reduzidos, sendo no caso do BAR com 0% cinzas volantes considerado aceitável.

Na Figura 3.90, representa-se o resumo, para a campanha de Kou et al (2004), da variação entre a relação de módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias. Regista-se alguma dispersão de valores, sendo ainda assim possível afirmar que o coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável. A influência das cinzas volantes nesta relação de propriedades é condicionante e, pela dispersão de valores, impede uma maior linearidade no comportamento da curva de regressão linear, visto que dentro de cada família, e cada idade, existe um comportamento tendencialmente linear (Figura 3.88).

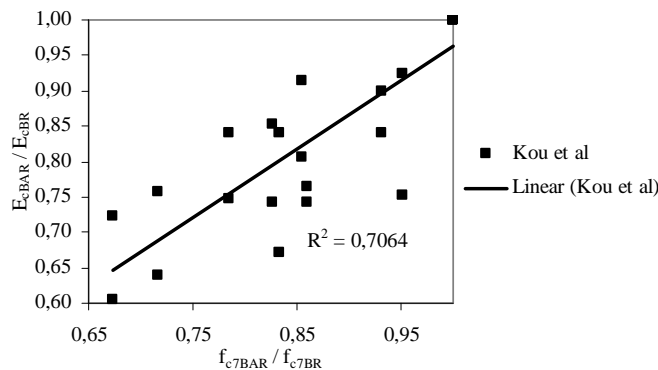


Fig. 3.90 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Para a campanha de Leite (2001), foi igualmente realizado o gráfico representando a variação entre a relação de módulos de elasticidade aos 28 dias e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias, apresentado na Figura 3.91, tendo-se obtido coeficientes de correlação considerados aceitáveis.

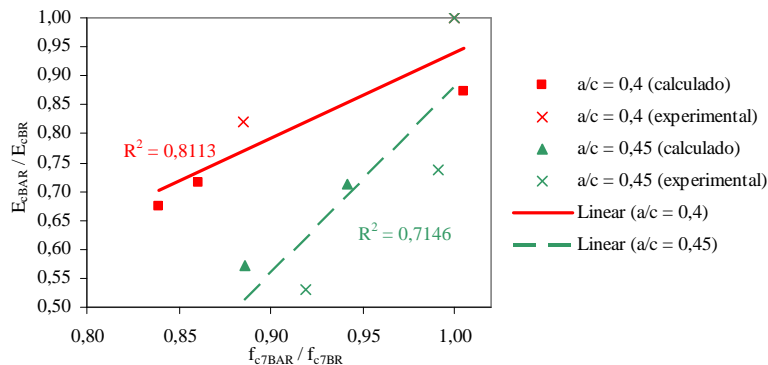


Fig. 3.91 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Leite, 2001)

Capítulo 3 – Campanhas experimentais e resultados

Os valores de Leite (2001) apresentados foram compilados na Figura 3.92, que resume as duas famílias de relação a/c. O coeficiente de correlação obtido é considerado não aceitável e reflecte a dispersão de valores entre os dois tipos de mistura com diferentes relações a/c.

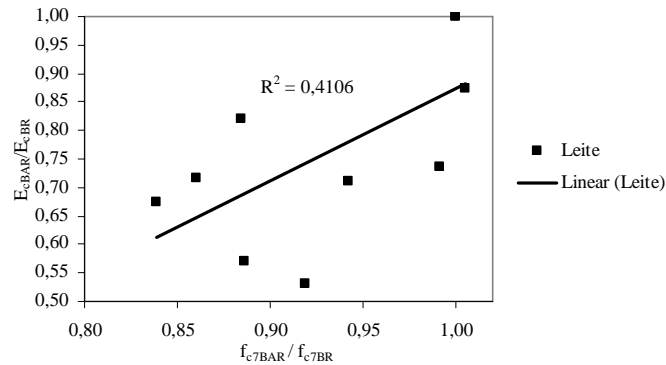


Fig. 3.92 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Leite, 2001)

Para a campanha de Soberón (2002), representa-se na Figura 3.93 a variação em análise.

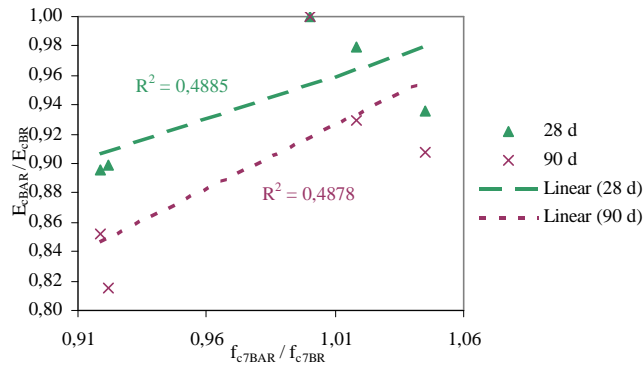


Fig. 3.93 – Variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Soberón, 2002)

Os coeficientes de correlação obtidos são considerados não aceitáveis.

O gráfico resumo, para esta variação da campanha de Soberón (2002) é apresentado na Figura 3.94. O coeficiente de correlação obtido é considerado não aceitável, reflectindo a elevada dispersão de valores.

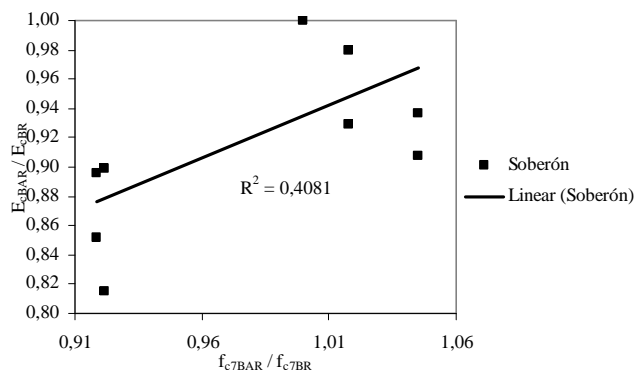


Fig. 3.94 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Soberón, 2002)

Na Figura 3.95, resumem-se as campanhas experimentais de Leite (aos 28 dias), Soberón (aos 28 e 90 dias) e de Kou et al (aos 28 e 90 dias e para betões sem adição de cinzas volantes).

Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados
Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional

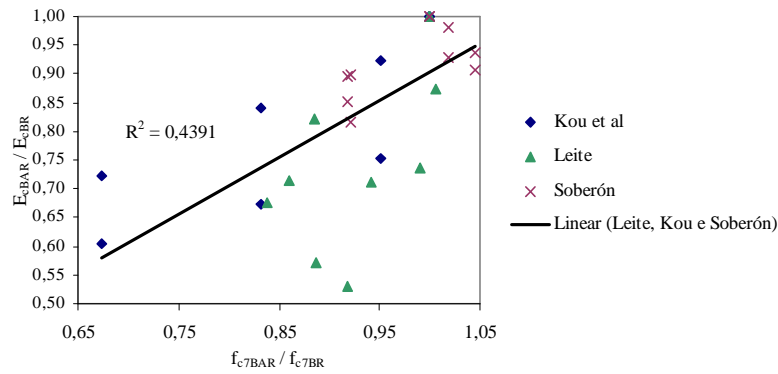


Fig. 3.95 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou et al com 0% de cinzas volantes

O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado não aceitável, reflectindo a elevada dispersão de valores entre as relações.

Se fossem considerados apenas os dados das campanhas de Leite (2001) e Soberón (2002), o coeficiente de correlação seria de 0,4624, sendo igualmente classificado como não aceitável, conforme representado na Figura 3.96.

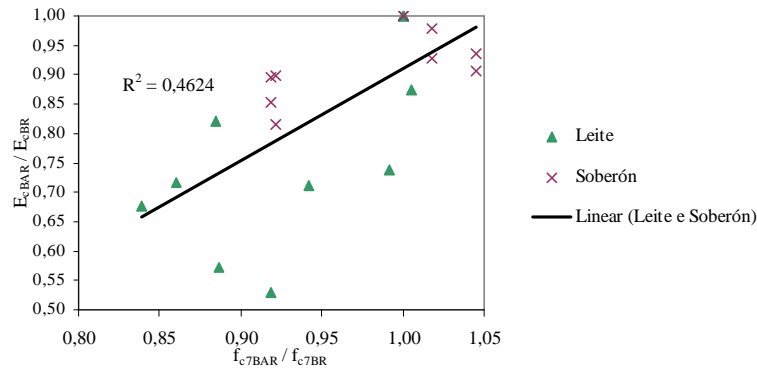


Fig. 3.96 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite e Soberón

Na Figura 3.97, representa-se a compilação de valores obtidos aos 28 dias das mesmas campanhas (incluindo os betões com cinzas volantes de Kou et al), para a variação de relações em análise. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado não aceitável.

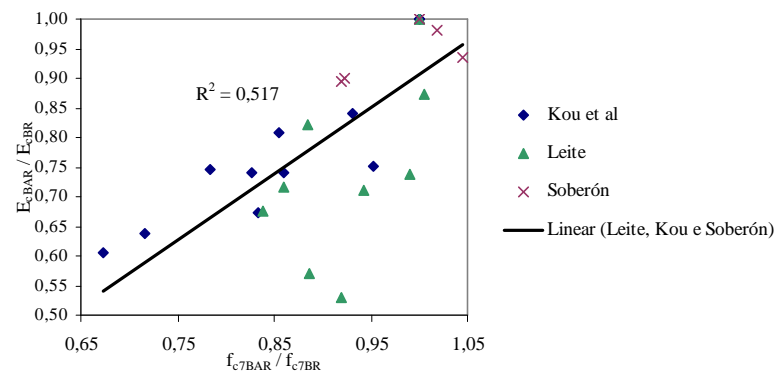


Fig. 3.97 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou et al

Mantendo o modelo de análise das outras propriedades, representa-se na Figura 3.98 a variação anterior excluindo os valores de Kou et al (2004).

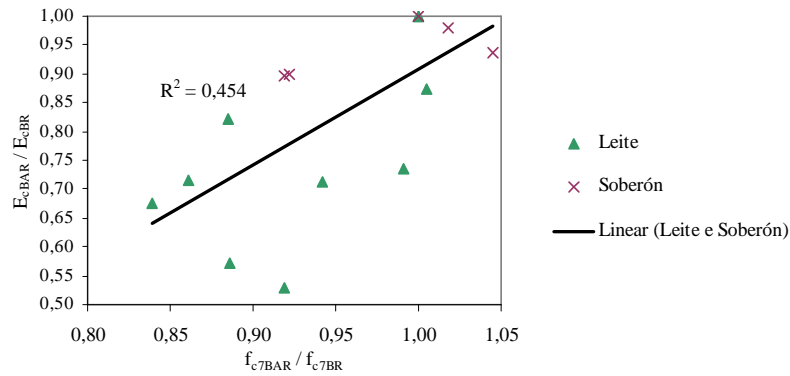


Fig. 3.98 – Resumo da variação da relação módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite e Soberón

O valor do coeficiente de correlação é, novamente, não aceitável. Concluiu-se da inexistência de linearidade entre as relações, para as campanhas analisadas.

No entanto, Xiao et al (2006), através da sobreposição de valores de várias campanhas, realiza a análise da variação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, concluindo da existência de relação tendencialmente linear entre as propriedades, conforme representado na Figura 3.99.

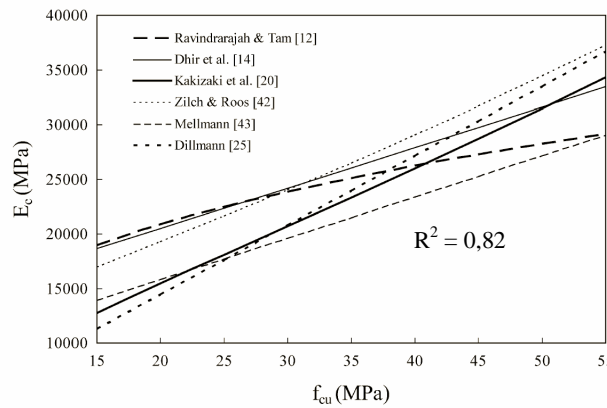


Fig. 3.99 – Variação da relação entre o módulo de elasticidade com a resistência à compressão (adaptado de Xiao et al, 2006)

3.4.3 Resistência à tracção por compressão diametral

Tal como na resistência à compressão, é expectável que a resistência à tracção dos BAR diminua com o aumento da taxa de substituição de AP por AR, atribuindo-se este comportamento à menor resistência à tracção dos segundos, a qual por sua vez se deve à argamassa aderida (nos AR de betão) e aos próprios materiais (nos AR cerâmicos e de argamassa). Apesar da tendência referida, a superfície dos AR, normalmente mais rugosa do que a dos AP, contribui favoravelmente para a resistência à tracção dos BAR. No entanto, o aumento da relação a/c para compensar a perda de tabilidade, tradicionalmente atribuída à maior capacidade de absorção de água dos AR relativamente aos AP, diminui a resistência à tracção, conforme refere Brito (2005).

Na campanha experimental de Kou et al (2004), foram realizados ensaios de resistência à tracção por compressão diametral com corpos de prova cilíndricos, com 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios com idades de cura de 1, 4, 7, 28 e 90 dias. Na Figura 3.100, representa-se a relação entre a idade do betão em que foi realizado o ensaio e a resistência à tracção por compressão diametral, para a família de betões com 0% de cinzas volantes e o processo de cura por imersão.

As curvas de regressão logarítmica apresentam coeficientes de correlação elevados, considerados bons ou muito bons, representando assim uma boa aproximação aos valores pontuais. Regista-se um rápido aumento da resistência à tracção nos primeiros dez dias de idade do betão. Com o aumento da taxa de substituição de AP por AR, existe um decréscimo da resistência de tracção dos betões, com uma redução mais significativa entre o BAGR20 e o BAGR50.

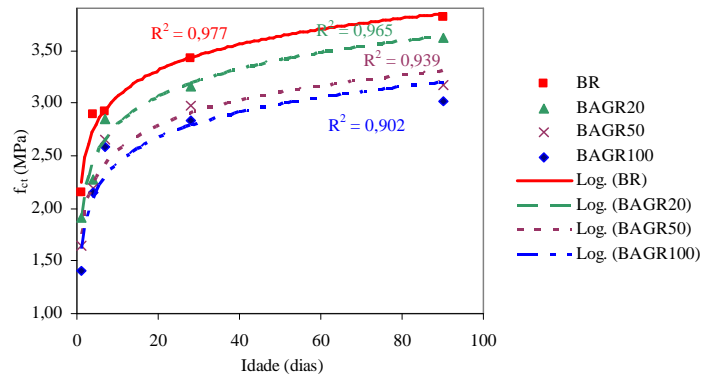


Fig. 3.100 – Relação entre a idade do betão e a resistência à tracção por compressão diametral (Kou et al, 2004)

No Quadro 3.20, indicam-se os valores para a resistência à tracção por compressão diametral para as três famílias de betões em função do teor de cinzas volantes (0, 20 e 35%). Mais uma vez, os valores escolhidos limitaram-se ao procedimento experimental de cura tradicional por imersão em água, conforme justificado em 3.4.1.

Quadro 3.20 – Tracção por compressão diametral para as várias idades ensaiadas e curas (Kou et al, 2004)

Betões	Tracção por compressão diametral (MPa)									
	Cura por imersão em água					Cura inicial por vapor				
	1 d	4 d	7 d	28 d	90 d	1 d	4 d	7 d	28 d	90 d
BR _{CV0}	2,15	2,89	2,92	3,43	3,81	2,28	2,77	2,8	3,06	3,72
BAGR20 _{CV0}	1,91	2,28	2,85	3,16	3,62	2,37	2,65	2,76	3,58	3,96
BAGR50 _{CV0}	1,64	2,19	2,66	2,97	3,17	2,35	2,47	2,67	3,24	3,62
BAGR100 _{CV0}	1,41	2,15	2,59	2,84	3,02	2,13	2,31	2,47	3,08	3,22
BR _{CV25}	1,4	2,06	2,39	3,42	3,5	1,83	2,59	2,82	3,65	4,06
BAGR20 _{CV25}	1,08	1,69	2,05	3,14	3,21	2,18	2,37	2,8	3,35	3,6
BAGR50 _{CV25}	1,03	1,84	2,13	3,1	3,16	2,11	2,14	2,51	3,05	3,84
BAGR100 _{CV25}	0,99	1,75	2,04	2,85	2,99	1,72	1,88	2,16	2,89	3,29
BR _{CV35}	0,95	1,33	1,48	2,3	3,15	1,79	1,96	2,37	2,71	3,24
BAGR20 _{CV35}	0,84	1,29	1,41	2,21	3,02	1,76	1,92	2,24	2,56	3,12
BAGR50 _{CV35}	0,82	1,49	1,35	2,19	2,98	1,73	1,87	2,21	2,46	3,09
BAGR100 _{CV35}	0,79	0,98	1,48	2,19	2,99	1,67	1,85	2,36	2,46	2,99

Na Figura 3.101, representam-se as relações entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias, para o tipo de cura por imersão em água. Confirma-se graficamente a tendência de diminuição da resistência à tracção com o aumento da taxa de substituição, seja qual for a família considerada.

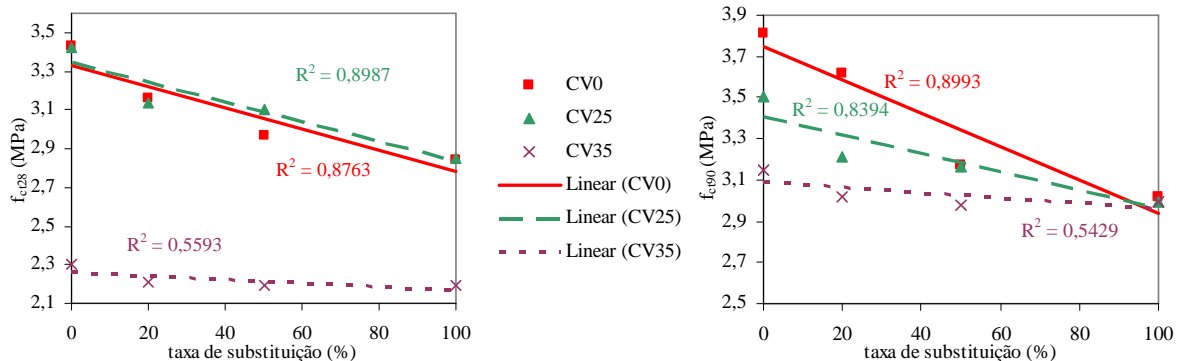


Fig. 3.101 – Relação entre a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) e a taxa de substituição de AP por AR (Kou et al, 2004)

Na Figura 3.102, representam-se as relações entre a taxa de substituição e a resistência à tracção relativa, para as mes-

mas famílias de betões descritas.

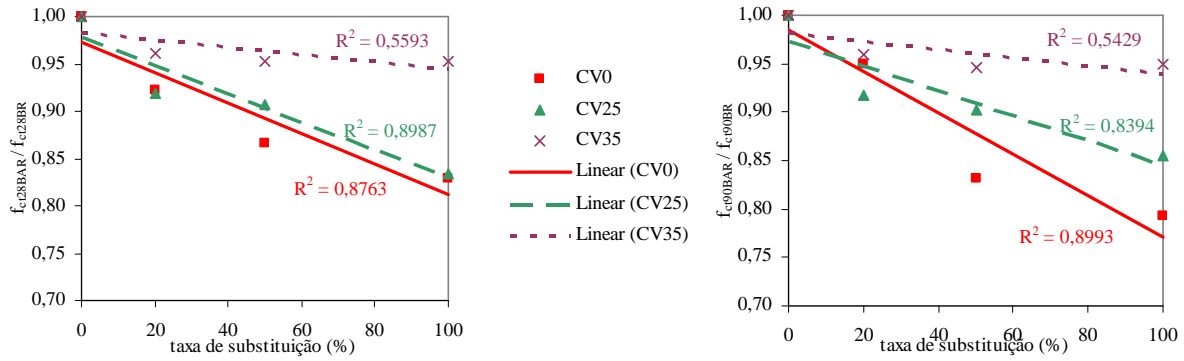


Fig. 3.102 – Variação da relação de resistências à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR (Kou et al, 2004)

O único conjunto de valores que apresenta um coeficiente de correlação não aceitável é o da família de betões com 35% de cinzas volantes, sendo os restantes considerados bons. Numa análise comparativa entre a resistência à compressão e a resistência à tracção por compressão diametral, Quadro 3.21, evidencia-se a menor diminuição da resistência à tracção, com o aumento da taxa de substituição, relativamente à resistência à compressão. Este comportamento justifica-se com o contributo positivo da maior rugosidade dos AR relativamente aos AP para a resistência à tracção dos BAR, conforme refere Brito (2005).

Quadro 3.21 – Comparação entre a variação de resistência à tracção por compressão diametral e a de compressão aos 28 dias (Kou et al, 2004)

Betões	AR (%)	Resistência aos 28 dias (MPa)		Variação relativa ao BR (%)	
		compressão	tracção	compressão	tracção
BR _{CV0}	0	66,8	3,43	0%	0%
BAGR20 _{CV0}	20	62,4	3,16	-7%	-8%
BAGR50 _{CV0}	50	55,8	2,97	-16%	-13%
BAGR100 _{CV0}	100	42	2,84	-37%	-17%
BR _{CV25}	0	54,4	3,42	-0%	0%
BAGR20 _{CV25}	20	49,7	3,14	-9%	-8%
BAGR50 _{CV25}	50	44,3	3,1	-19%	-9%
BAGR100 _{CV25}	100	39,5	2,85	-27%	-17%
BR _{CV35}	0	45,9	2,3	-0%	-0%
BAGR20 _{CV35}	20	43,6	2,21	-5%	-4%
BAGR50 _{CV35}	50	40,4	2,19	-12%	-5%
BAGR100 _{CV35}	100	39,3	2,19	-14%	-5%

Para a campanha de Leite (2001), foram igualmente obtidos valores para a resistência à tracção por compressão diametral, apresentados no Quadro 3.22. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma brasileira NBR 7222 (1994). Como referido no ponto 3.4.1, os valores experimentais representam-se a vermelho e os resultantes da projecção matemática realizada a preto.

Quadro 3.22 – Resistência à tracção por compressão diametral, f_{ct} , aos 28 dias (Leite, 2001)

Betões	a/c	f_{ct} (MPa)
BR	0,4	4,60
BAR11,5		4,96
BAR50		4,60
BAR88,5		4,21
BAR100		4,09
BR	0,45	4,80
BAR11,5		4,20
BAR50		4,01
BAR88,5		3,50
BAR100		3,76

Na Figura 3.103, representa-se a relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitáveis, sendo de 0,7681 e de 0,8049 para as relações $a/c = 0,4$ e $a/c = 0,45$, respectivamente.

Também na resistência à tracção por compressão diametral, o efeito de aumento da relação a/c conduz a uma redução desta propriedade, pelas razões já descritas no ponto referente à resistência à compressão.

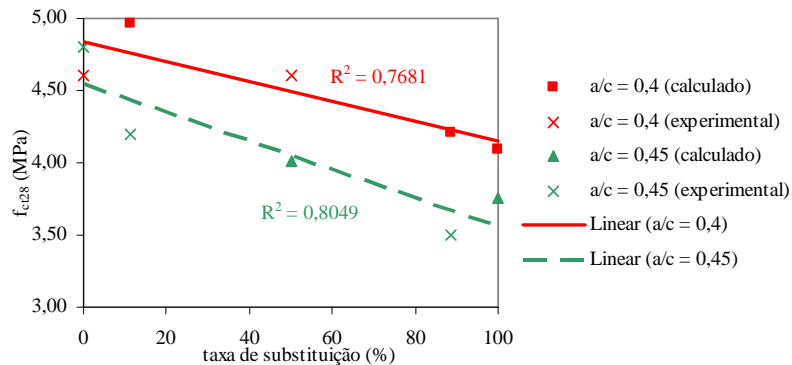


Fig. 3.103 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Leite, 2001)

Na Figura 3.104, representa-se a variação da relação de resistências à tracção por compressão diametral com a taxa de substituição de AP por AR.

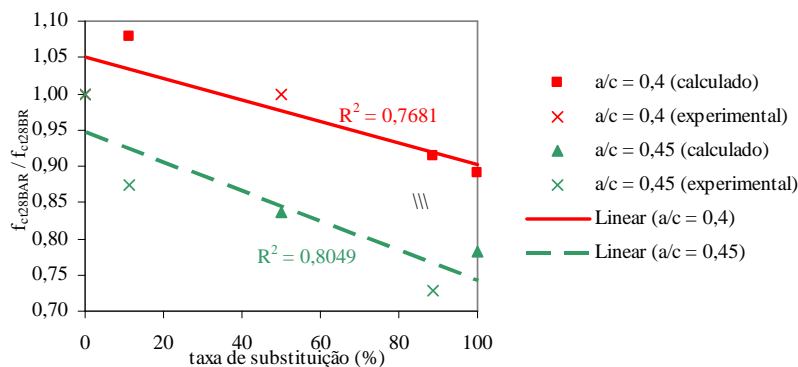


Fig. 3.104 – Variação da relação de resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR (Leite, 2001)

Para a campanha de Soberón (2002), foi realizada análise semelhante com recurso aos valores experimentais representados no Quadro 3.23. Os ensaios da campanha de Soberón foram realizados de acordo com a norma espanhola UNE 83-306-85.

Quadro 3.23 – Resistência à tracção por compressão diametral, f_{ct} (Soberón, 2002)

Betões	Tracção (MPa)		
	7 d	28 d	90 d
BR	3,60	3,70	3,90
BAR15	3,30	3,70	3,90
BAR30	3,30	3,60	3,90
BAR60	3,20	3,40	3,70
BAR100	3,50	3,30	3,60

Na Figura 3.105, representa-se a relação entre a resistência à tracção por compressão diametral e a taxa de substituição de AP por AR, correspondendo cada uma das famílias às idades dos ensaios (28 e 90 dias). Os resultados aos 7 dias não são tratados graficamente, atendendo a que a comparação entre campanhas se realizará apenas para os valores aos 28 e

90 dias.

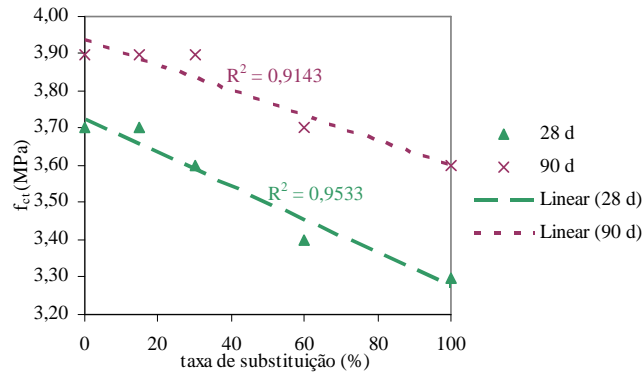


Fig. 3.105– Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias (Soberón, 2002)

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados bom e muito bom para os 28 e 90 dias, respectivamente. Na Figura 3.106, representa-se a variação da relação de resistências de tracção por compressão diametral com a taxa de substituição de AP por AR. Para que seja possível, uma análise comparativa com as restantes campanhas, serão apenas considerados os ensaios aos 28 e 90 dias. O valor dos coeficientes de correlação são considerados bom e muito bom.

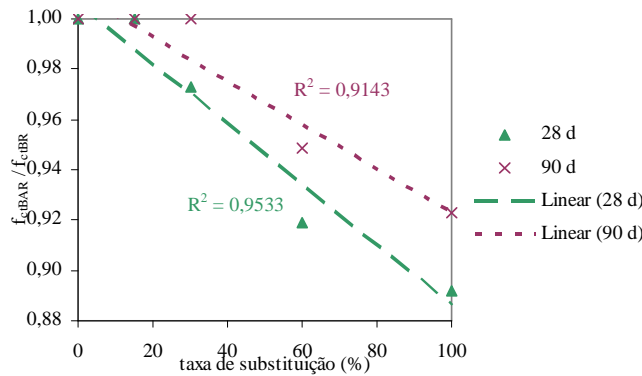


Fig. 3.106– Variação da relação de resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a taxa de substituição de AP por AR (Soberón, 2002)

Seguidamente, e recorrendo ao processo de ponderação manifestado nas equações 3.1 e 3.2, foram calculadas a massa volúmica e absorção de água da mistura de agregados utilizados na produção dos vários betões.

Para a campanha de Kou et al (2004), ilustra-se na Figura 3.107 a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias e a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados, com cura por imersão em água.

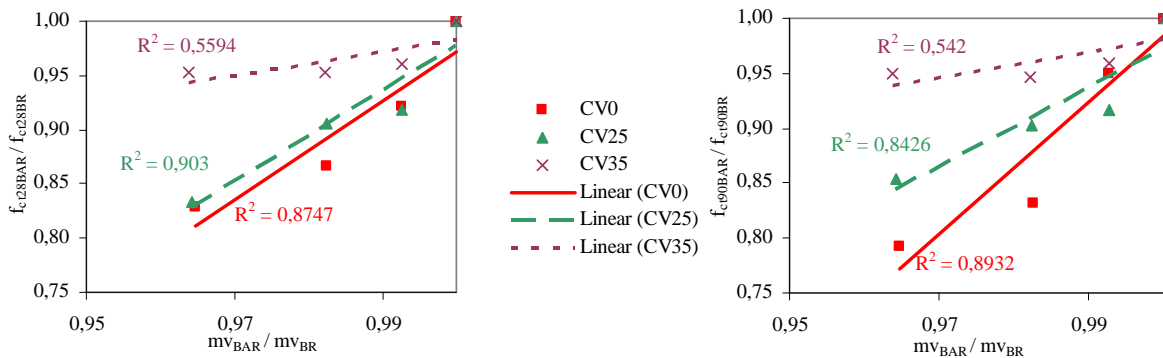


Fig. 3.107 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Os valores experimentais para os betões com 0 e 25% de cinzas volantes indicam coeficientes de correlação considerados aceitáveis ou bons, podendo considerar-se um comportamento tendencialmente linear da relação.

Na Figura 3.108, representam-se os valores da variação da relação entre resistências à tracção aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura.

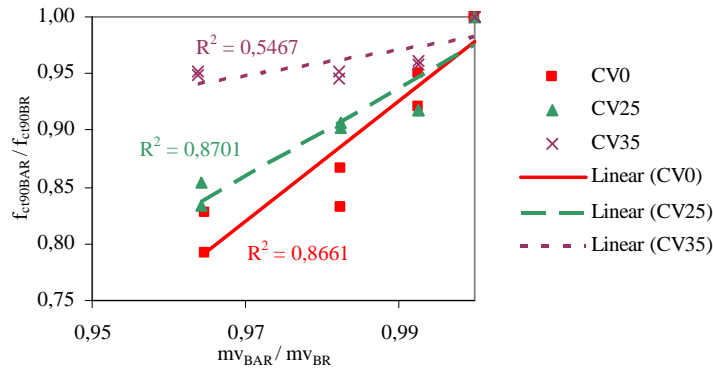


Fig. 3.108 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Os valores dos coeficientes de correlação para as famílias de betões com 0 e 25% de cinzas volantes são considerados bons. É possível concluir a influência da adição de cinzas volantes na relação em análise. Quanto maior o valor de cinzas volantes adicionado, menor será a variação entre as relações.

Na Figura 3.109, representa-se o resumo da variação da relação entre resistências à tracção para os 28 e 90 dias, com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura. O valor obtido para o coeficiente de correlação é reduzido e considerado não aceitável, reflectindo a dispersão de valores induzida pela adição de cinzas volantes.

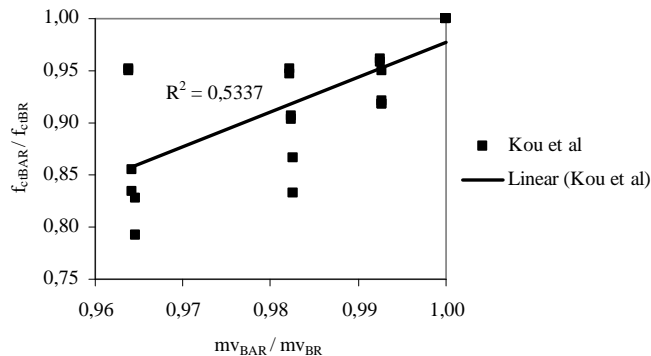


Fig. 3.109 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura (Kou et al, 2004)

Para a campanha de Leite (2001), representa-se na Figura 3.110 a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura. Os coeficientes de correlação obtidos são considerados aceitáveis.

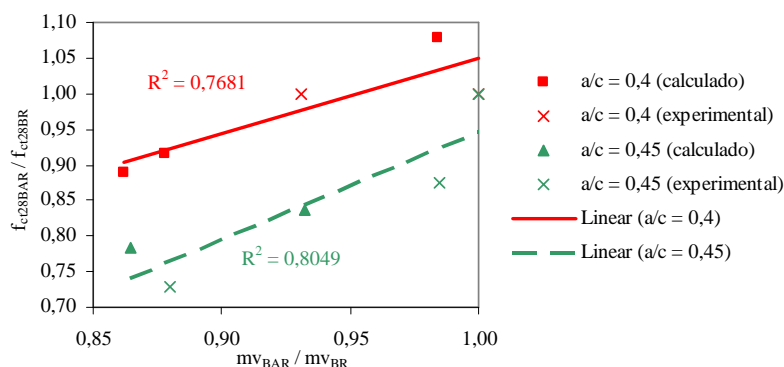


Fig. 3.110 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

O resumo desta variação, para a campanha de Leite (2001), é apresentado na Figura 3.111.

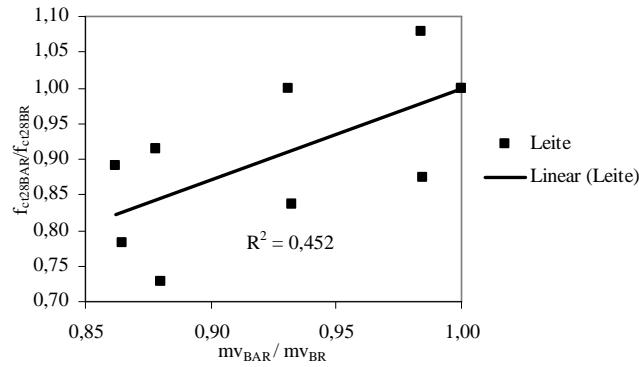


Fig. 3.111 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura (Leite, 2001)

O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado não aceitável. O comportamento da variação em análise na campanha de Leite é coerente com os resultados obtidos nas restantes, sendo a justificação a então apresentada.

Para a campanha de Soberón (2002), apresenta-se a mesma análise na Figura 3.112. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados bom e muito bom.

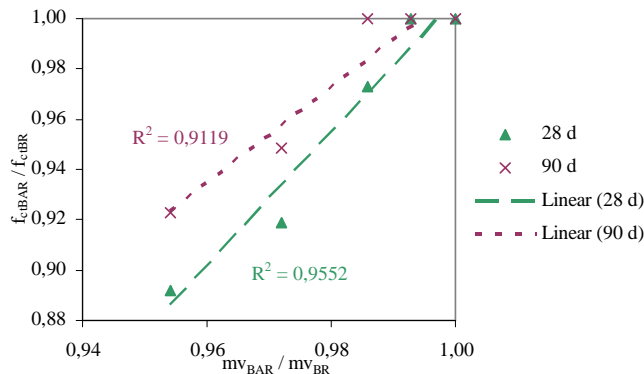


Fig. 3.112 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Soberón, 2002)

O resumo da variação em análise apresentado na Figura 3.113 regista um coeficiente de correlação considerado bom.

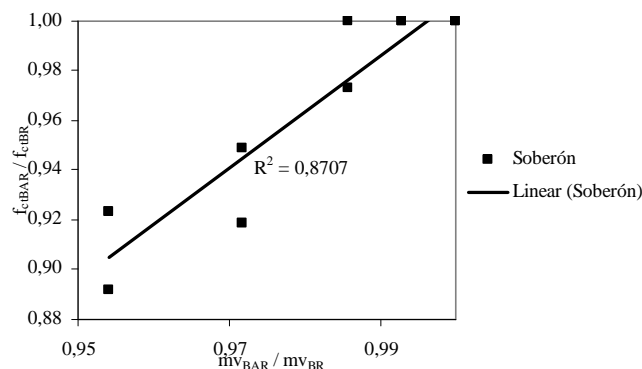


Fig. 3.113 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura (Soberón, 2002)

Na Figura 3.114, sobrepõem-se os valores das campanhas de Leite (aos 28 dias), Soberón (aos 28 e 90 dias) e Kou et al (aos 28 e 90 dias e betões sem adição de cinzas volantes), para a variação em análise. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado não aceitável, reflectindo as grandes diferenças entre as 3 campanhas.

Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados
Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional

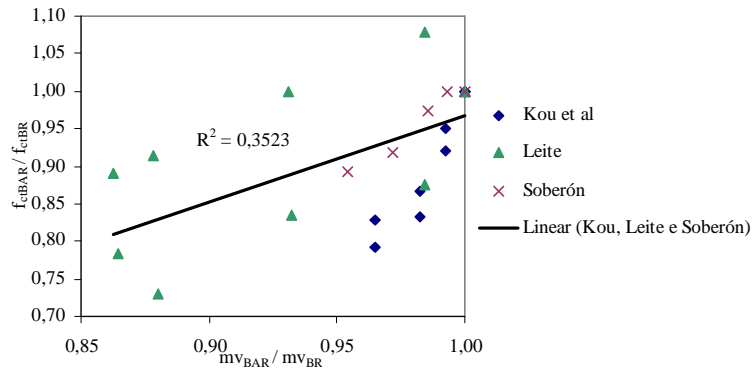


Fig. 3.114 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para Leite, Soberón e Kou et al sem cinzas volantes

Na Figura 3.115, representa-se a mesma variação, mas apenas para os resultados aos 28 dias, incluindo os betões com adição de cinzas volantes na campanha de Kou et al (2004). O coeficiente de correlação é considerado não aceitável.

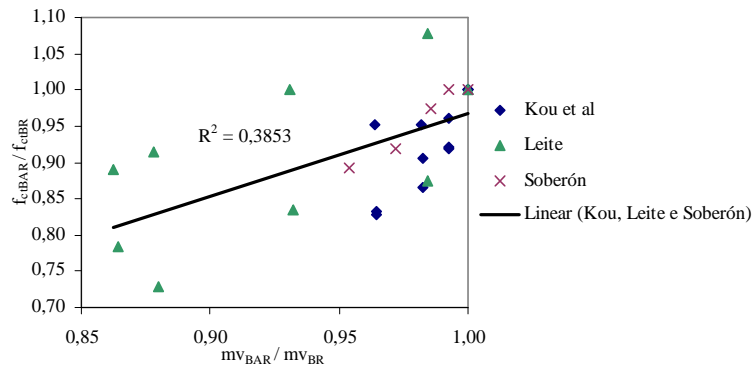


Fig. 3.115 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para Leite, Soberón e Kou et al

Na Figura 3.116, representa-se a mesma variação mas apenas para os valores experimentais de Leite (2001) e Soberón (2002).

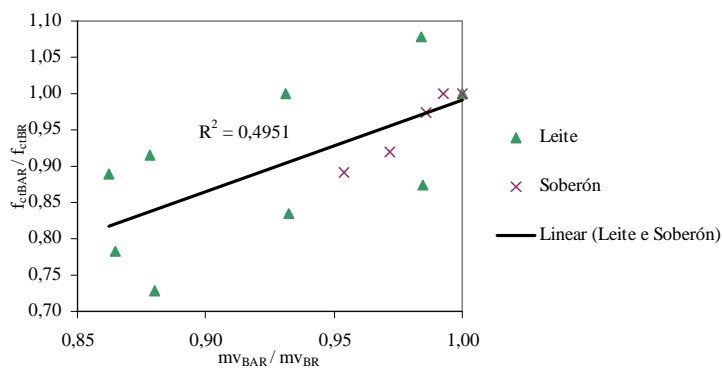
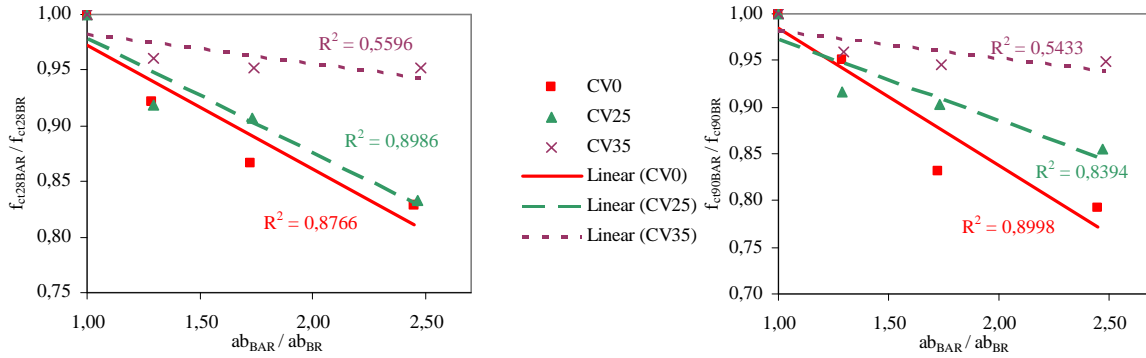


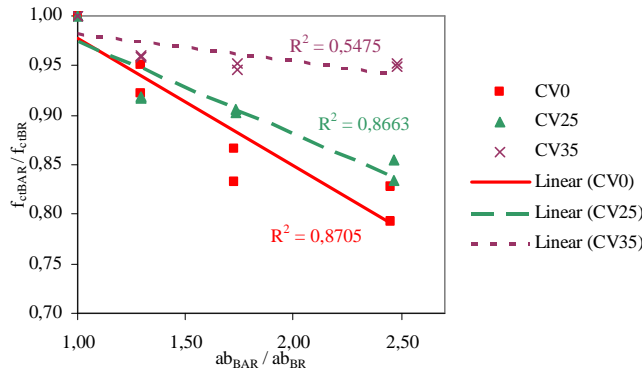
Fig. 3.116– Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para Leite e Soberón

Regista-se um ligeiro incremento no valor do coeficiente de correlação, ainda assim considerado não aceitável.

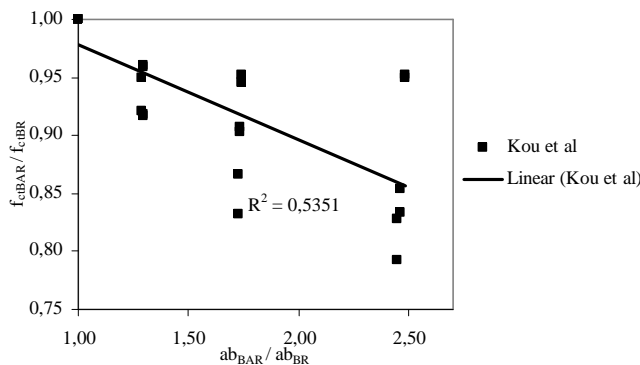
De modo a ilustrar a influência da relação entre absorções de água da mistura dos agregados presentes na composição do betão na resistência à tracção, para a campanha de Kou et al (2004), apresenta-se a Figura 3.117. Novamente, as famílias de betões com 0 e 25% de cinzas volantes apresentam coeficientes de correlação aceitáveis e bons para as respectivas rectas de regressão linear.



A diminuição da relação entre resistências à tracção com o aumento da relação entre absorções de água atribuiu-se à maior quantidade de pasta de cimento aderida aos AR, que tem uma resistência à tracção menor do que a dos AP, funcionando como o elemento mais fraco da composição. A pasta de cimento aderida aos AR é responsável pela maior absorção de água destes agregados. Na Figura 3.118, representa-se a compilação dos gráficos da Figura 3.119.



Os valores dos coeficientes de correlação dentro de cada família mantêm-se aceitáveis. As rectas de regressão indiciam que a adição de cinzas volantes influi na variação analisada. Esta tendência poderá relacionar-se com a diminuição da classe de resistência do BR provocada pela substituição parcial de cimento por cinzas volantes, conforme referido. Na Figura 3.119, representa-se a variação entre a compilação de valores da relação entre resistências à tracção e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura para os 28 e 90 dias.



O coeficiente de correlação obtido para os valores da campanha experimental de Kou et al (2004) é baixo e considerado não aceitável, facto atribuído, novamente, à dispersão de valores provocada pelos diferentes teores de cinzas volantes.

Para a campanha de Leite (2001), obtiveram-se os valores representados na Figura 3.120, para a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral e a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados presentes na mistura do betão.

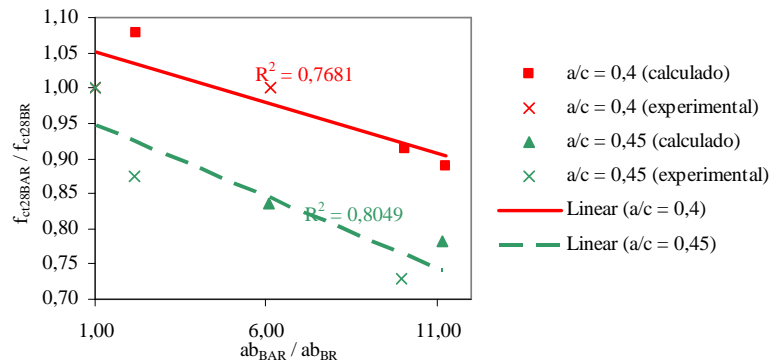


Fig. 3.120 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

O efeito da relação entre absorções de água ponderadas na resistência à tracção é coerente com o observado na campanha de Kou et al (2004). De novo, o efeito do incremento da relação a/c reduz a variação em análise, conforme justificado relativamente a outras propriedades.

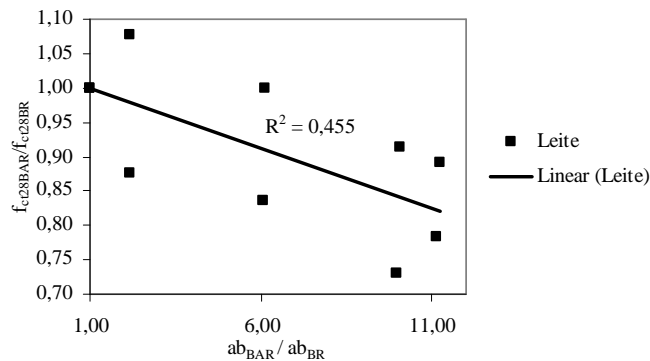


Fig. 3.121 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Leite, 2001)

O gráfico resumo para a campanha de Leite (2001), é apresentado na Figura 3.121. O coeficiente de correlação obtido é considerado não aceitável.

Para a campanha de Soberón (2002), apresenta-se a Figura 3.122 com a variação entre as relações em análise. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação de 0,955 e de 0,9114, são considerados bom e muito bom, para as famílias de BAR ensaiados aos 28 e 90 dias, respectivamente.

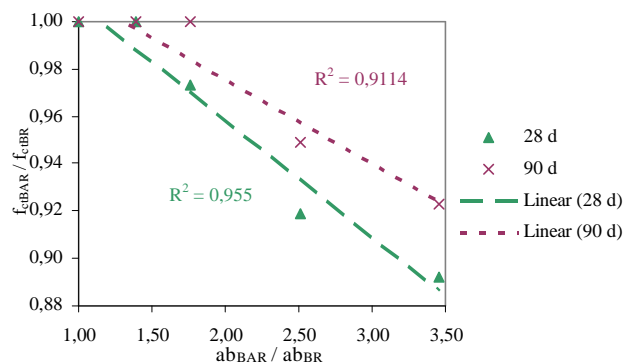


Fig. 3.122 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água da mistura dos agregados (Soberón, 2002)

O resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral com a relação entre absorções de água ponderadas da mistura dos agregados, para a campanha de Soberón (2002), é apresentado na Figura 3.123. O valor obtido para o coeficiente de correlação é 0,8704, considerado bom, reflecte uma relação tendencialmente linear da variação em análise.

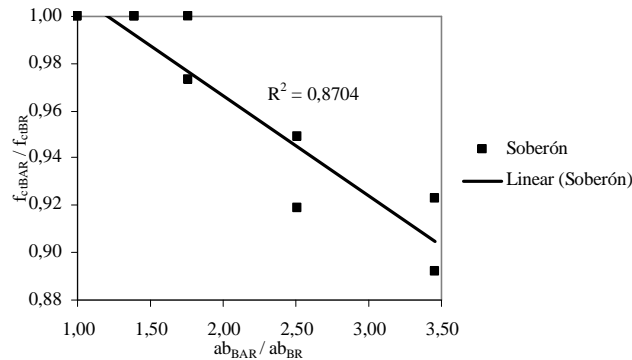


Fig. 3.123 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Soberón, 2002)

A sobreposição de valores das campanhas experimentais de Kou et al (aos 28 e 90 dias e para betões sem adição de cinzas volantes), Leite (aos 28 dias) e Soberón (aos 28 e 90 dias) é apresentada na Figura 3.124.

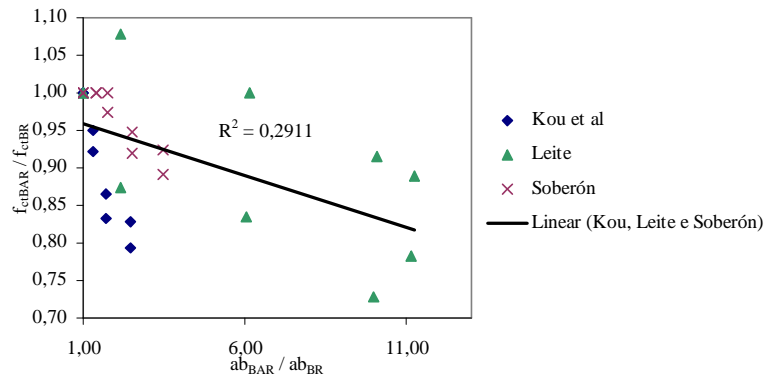


Fig. 3.124 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Leite, Soberón e Kou (sem cinzas volantes)

O valor do coeficiente de correlação para o resultado da sobreposição das 3 campanhas é reduzido e considerado não aceitável, representando a elevada dispersão de valores provocada pela grande diferença de relações entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura.

Na Figura 3.125, representa-se a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura, mas apenas para os valores experimentais obtidos aos 28 dias (incluindo os betões com adição de cinzas volantes de Kou et al). O valor obtido para o coeficiente de correlação é novamente muito reduzido e considerado não aceitável.

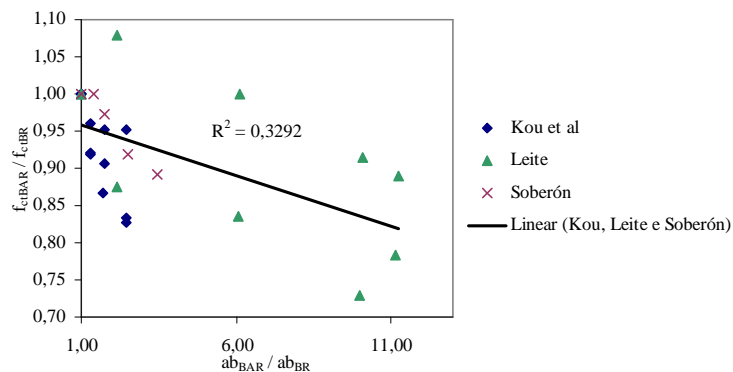


Fig. 3.125 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Leite, Soberón e Kou et al

A mesma variação é representada na Figura 3.126, sendo os valores experimentais de Kou et al (2004) excluídos. O valor do coeficiente de correlação aumentou ligeiramente, embora seja ainda considerado não aceitável.

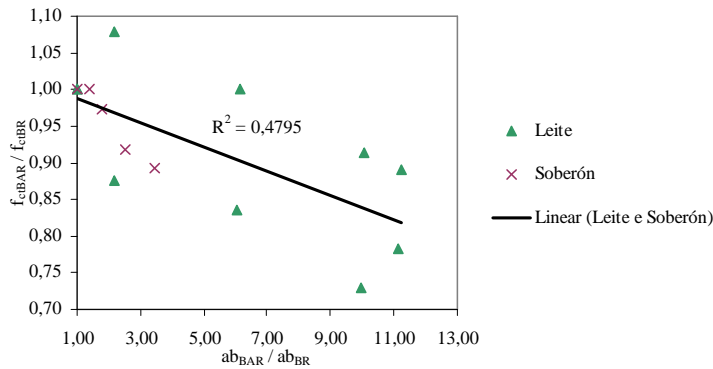


Fig. 3.126 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura das campanhas de Leite e Soberón

Na Figura 3.127, representam-se as relações entre resistências à tracção e resistências à compressão aos 7 dias.

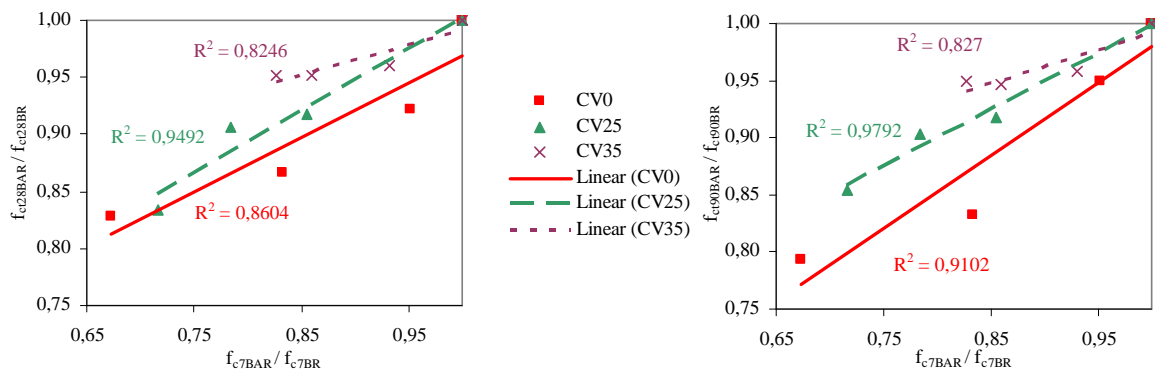


Fig. 3.127 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Os ensaios realizados aos 28 e aos 90 dias permitiram a obtenção de valores de coeficientes de correlação considerados bons ou muito bons, podendo considerar-se existir linearidade entre estas duas propriedades do betão endurecido.

Na Figura 3.128, representa-se a combinação de valores da Figura 3.127, ou seja, a mesma relação para ensaios de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias.

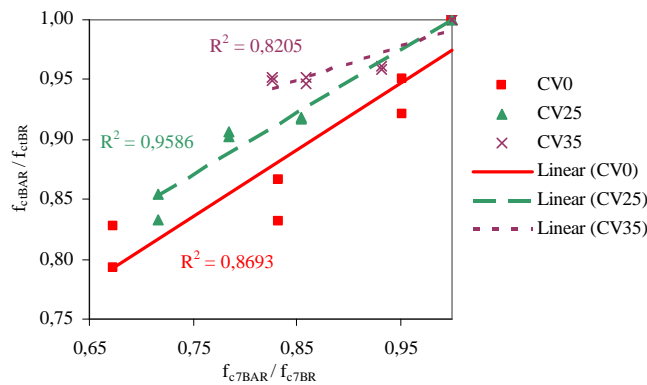


Fig. 3.128 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação mantêm-se elevados (considerados bons ou muito bons), justificando uma relação linear entre as relações em análise. Novamente, é possível identificar a influência da adição de cin-

zas volantes na preparação dos betões. Quanto maior a adição de cinzas volantes, menor é a variação da relação entre resistências à tracção com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias.

Na Figura 3.129, representa-se o resumo da variação entre a relação de resistências à tracção e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias, para os ensaios de tracção aos 28 e 90 dias. O valor de 0,80 para o coeficiente de correlação do resumo apresentado na Figura 3.129 é considerado bom.

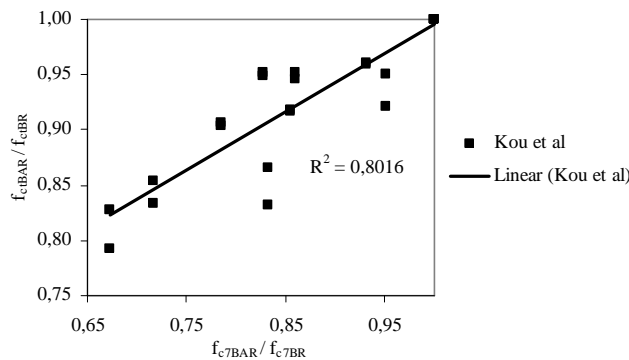


Fig. 3.129 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Para a campanha de Leite (2001), representa-se na Figura 3.130 a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitáveis.

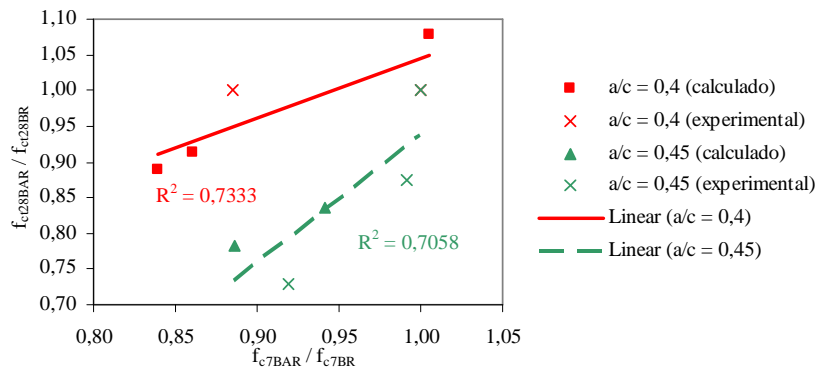


Fig. 3.130 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Leite, 2001)

Na Figura 3.131, representa-se o resumo da variação entre a relação de resistências à tracção por compressão diametral e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias, para os resultados de Leite (2001).

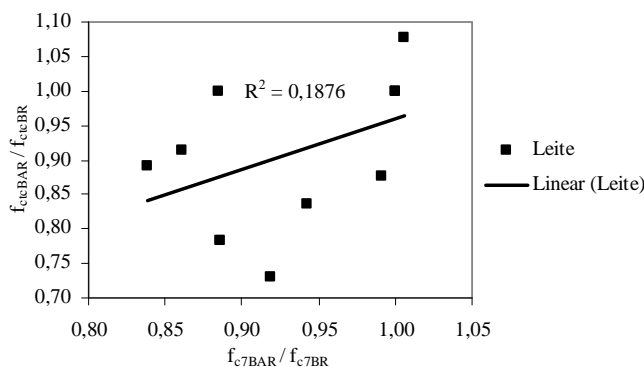


Fig. 3.131 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Leite, 2001)

O coeficiente de correlação obtido no resumo apresentado na Figura 3.131 é reduzido e considerado não aceitável.

Para a campanha de Soberón (2002), representa-se na Figura 3.132 a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral com a resistência à compressão aos 7 dias. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação aos 28 e 90 dias são considerados aceitável e bom, respectivamente.

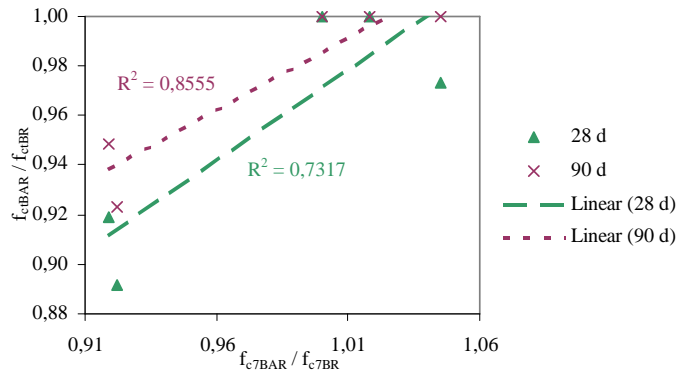


Fig. 3.132 – Variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Soberón, 2002)

Na Figura 3.133, representa-se o resumo desta variação para os resultados de Soberón (2002). O valor do coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável.

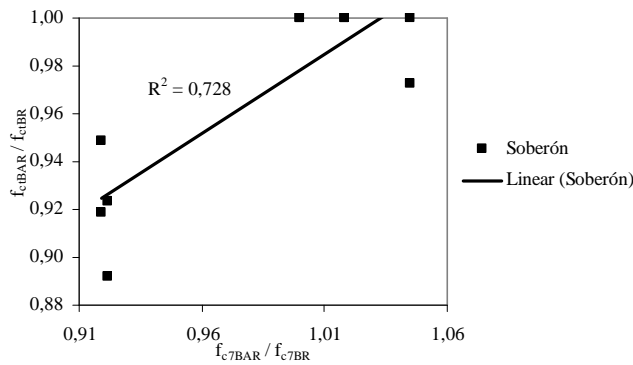


Fig. 3.133 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Soberón, 2002)

A compilação de valores das campanhas de Leite (aos 28 dias), Soberón (aos 28 e 90 dias) e Kou et al (aos 28 e 90 dias e betões sem adição de cinzas volantes), é representada na Figura 3.134.

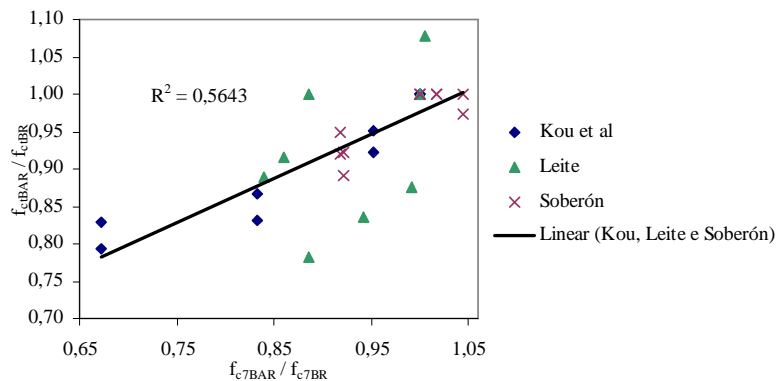


Fig. 3.134 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou et al sem cinzas volantes

O coeficiente de correlação de 0,5643, considerado não aceitável, reflecte a grande dispersão de valores, em especial entre as famílias da campanha de Leite. A família de $a/c = 0,45$ na campanha de Leite (2001) provoca uma elevada

dispersão de valores. Se fosse eliminada o coeficiente de correlação aumentaria para 0,759.

Na Figura 3.135, representa-se a variação em análise, mas considerando apenas os valores experimentais aos 28 dias (incluindo os betões com adição de cinzas volantes da campanha de Kou et al).

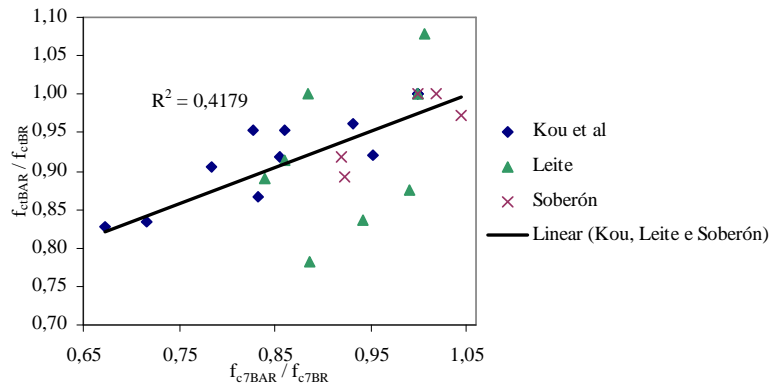


Fig. 3.135 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite, Soberón e Kou et al

O valor obtido para o coeficiente de correlação é muito reduzido, de 0,4179, e considerado não aceitável.

Na Figura 3.136, representa-se a mesma variação mas sem os valores experimentais de Kou et al (2004). O valor do coeficiente de correlação é ainda mais reduzido e, por isso, também considerado não aceitável.

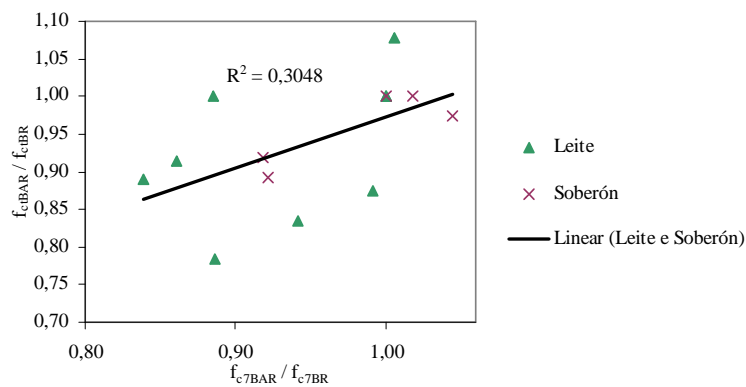


Fig. 3.136 – Resumo da variação da relação resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias para as campanhas de Leite e Soberón

Apesar de os resultados apresentados não indicarem a existência de correlação tendencial da variação, Xiao et al (2006) apresentou um valor de coeficiente de correlação entre várias campanhas de 0,85 para a relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tracção por compressão diametral, conforme representado na Figura 3.137.

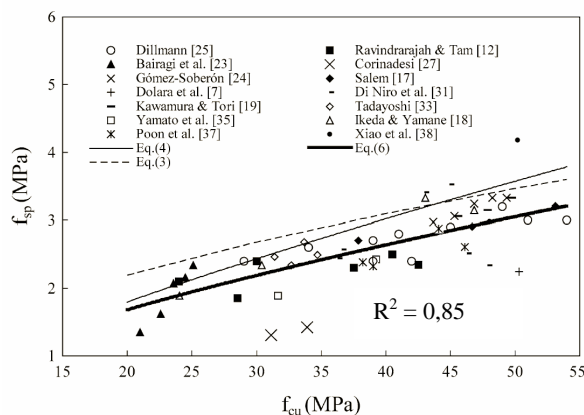


Fig. 3.137– Variação entre a resistência à tracção por compressão diametral e a resistência à compressão (adaptado de Xiao et al, 2006)

3.4.4 Resistência à tracção por flexão

A resistência à tracção por flexão foi igualmente analisada, sendo no entanto expectável que apresente um comportamento análogo ao da resistência à tracção por compressão diametral.

Na campanha experimental de Leite (2001), foram realizados ensaios de resistência à tracção por flexão, de acordo com a norma brasileira NBR 12142 (1994). Os resultados obtidos estão representados no Quadro 3.24, tendo sido mantido o mesmo critério de representação dos valores experimentais (a vermelho) e os projectados matematicamente (a preto).

Quadro 3.24 – Resistência à tracção por flexão, f_{ft} , aos 28 dias (Leite, 2001)

Betões	a/c	f_{ft} (MPa)
BR		6,73
BAR11,5		6,01
BAR50	0,40	4,70
BAR88,5		4,31
BAR100		4,06
BR		6,77
BAR11,5		6,77
BAR50	0,45	4,75
BAR88,5		5,33
BAR100		3,93

Na Figura 3.138, representa-se a relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por flexão. Os valores obtidos são superiores aos valores da resistência à tracção por compressão diametral, como aliás seria de esperar.

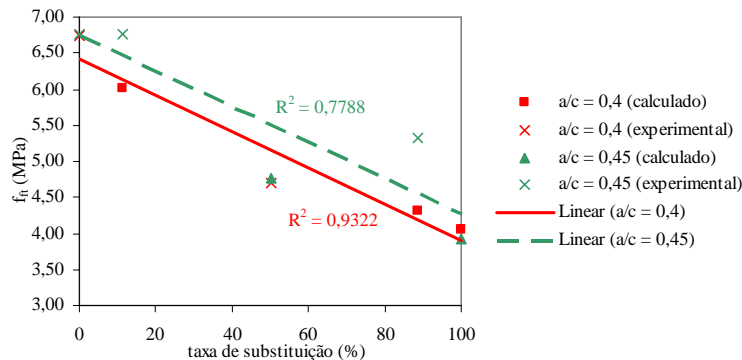


Fig. 3.138 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a resistência à tracção por flexão aos 28 dias (Leite, 2001)

Na Figura 3.139, representa-se a variação da relação entre resistências à tracção por flexão e a taxa de substituição de AP por AR. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitáveis ou bons. O comportamento é semelhante ao apresentado para a resistência à tracção por compressão diametral, em 3.4.3.

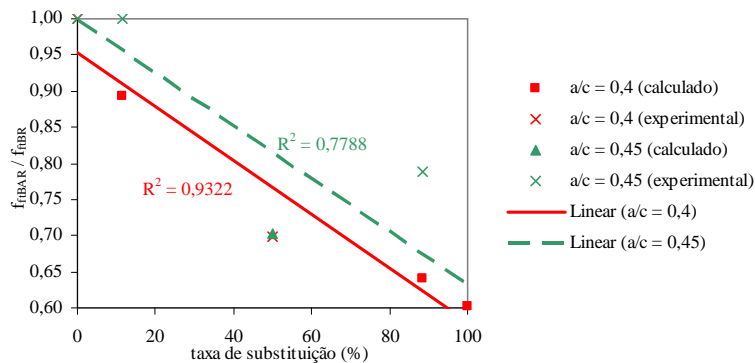


Fig. 3.139 – Variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a taxa de substituição de AP por AR (Leite, 2001)

Na Figura 3.140, representa-se a variação da relação entre resistências à tracção por flexão com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura,

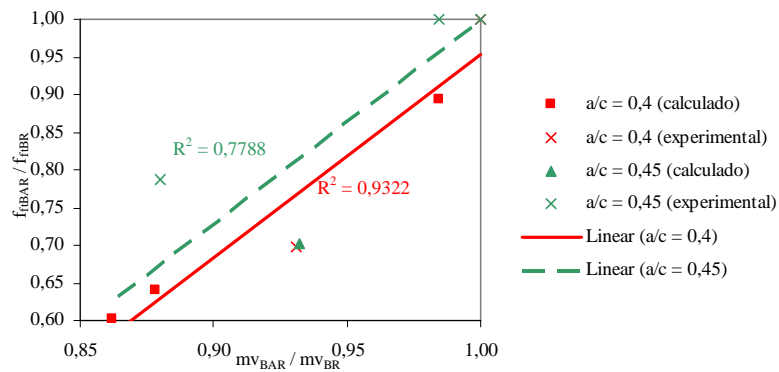


Fig. 3.140 – Variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

O gráfico resumo apresentado na Figura 3.141, evidencia a grande proximidade de valores para as duas famílias de BAR com diferentes valores de a/c. O coeficiente de correlação é, por essa razão, considerado aceitável.

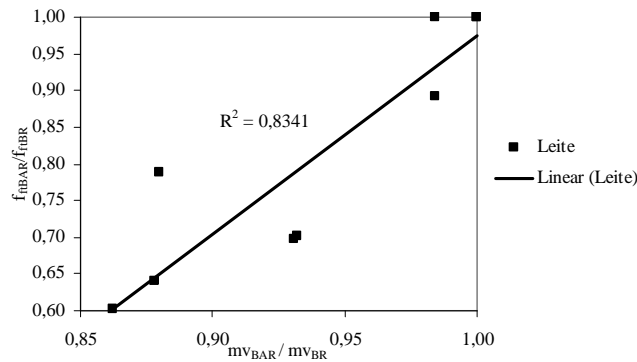


Fig. 3.141 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

Para a variação da relação entre resistências à tracção por flexão com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura, elaborou-se a Figura 3.142.

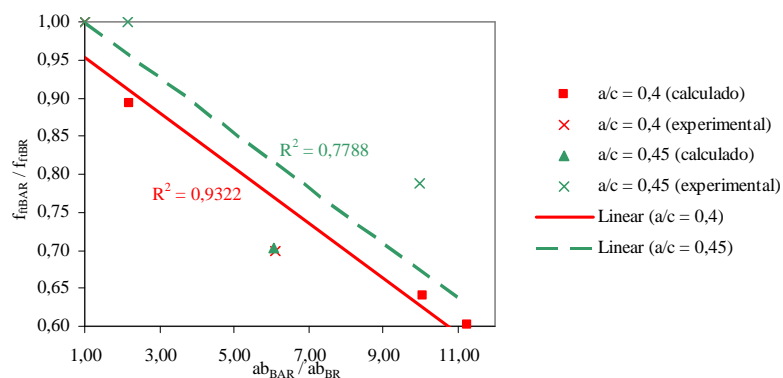


Fig. 3.142 – Variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação foram considerados aceitável e bom para as famílias de relação $a/c = 0,4$ e $a/c = 0,45$, respectivamente.

Na Figura 3.143, representa-se o resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura para as duas famílias de BAR com relações a/c distintas. O coeficiente de correlação obtido é de 0,8333, sendo considerado bom.

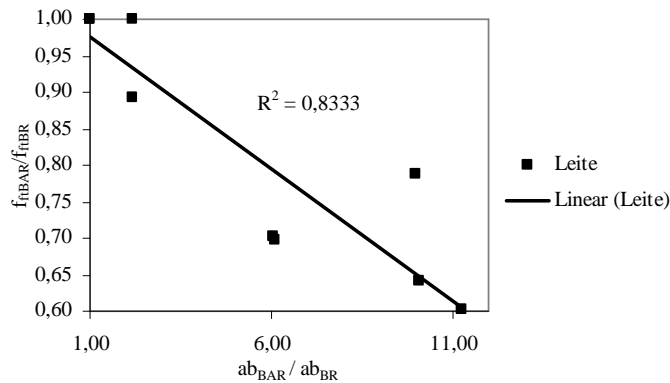


Fig. 3.143 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados (Leite, 2001)

Para a representação da variação da relação entre resistências à tracção por flexão com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias, elaboraram-se as Figuras 3.144 e 3.145, sendo a segunda um resumo da primeira. O coeficiente de correlação é considerado bom para todas as curvas de correlação linear apresentadas.

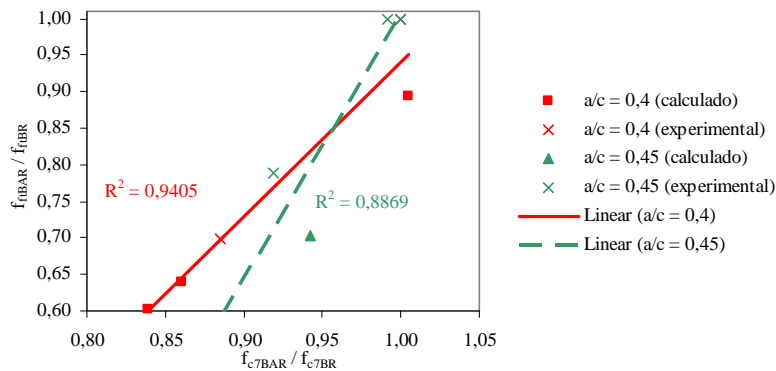


Fig. 3.144 – Variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Leite, 2001)

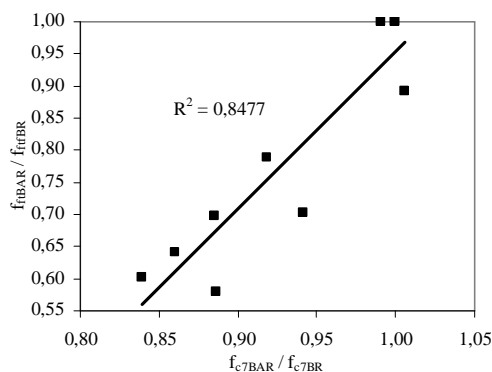


Fig. 3.145 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Leite, 2001)

A relação linear tendencial entre a resistência à compressão e a resistência à tracção foi demonstrada por Xiao et al (2006), recorrendo à compilação de valores de várias campanhas experimentais, conforme Figura 3.146.

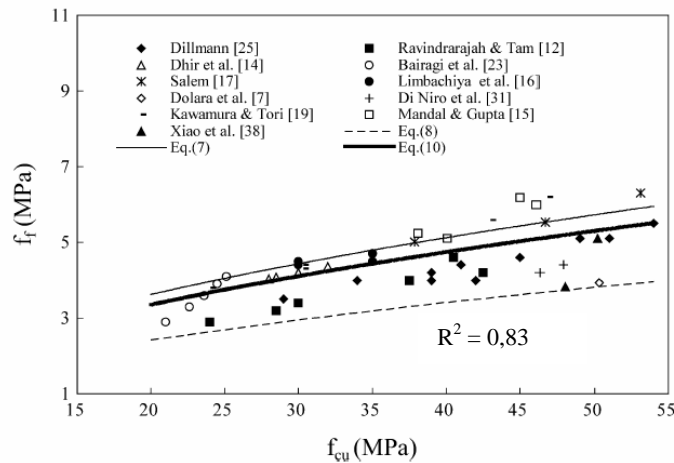


Fig. 3.146 – Variação entre a resistência à tracção por flexão e a resistência à compressão (adaptado de Xiao et al, 2006)

3.4.5 Penetração de cloretos

É expectável que, com o aumento da taxa de substituição, a quantidade de carga eléctrica também aumente, correspondendo a uma menor resistência dos BAR à penetração de cloretos. Esta tendência justificar-se-á pela maior permeabilidade do BAR relativamente ao BR, que aumenta com a taxa de substituição. A maior permeabilidade dos BAR atribuiu-se à elevada porosidade da pasta de cimento aderida, como nos AR de betão, ou pelas próprias características dos materiais, como no caso dos AR de origem cerâmica e de argamassas. Quanto maior for a permeabilidade, maior será a facilidade de penetração de agentes agressivos exteriores, como os cloretos. Esta propriedade do betão endurecido constitui um importante indicador da durabilidade deste material.

A resistência do betão à penetração de cloretos foi ensaiada na campanha experimental de Kou et al (2004), através do ensaio definido pela norma ASTM C1202-94. Esta norma define o procedimento do ensaio e estabelece a relação entre a resistência do betão à penetração de cloretos e a quantidade de carga eléctrica, medida em Coulomb, que atravessa os provetes num determinado período de tempo. Quanto maior a quantidade de carga eléctrica registada, menor será a resistência à penetração de cloretos do respectivo betão. Os ensaios foram realizados para betões com 28 e 90 dias.

No Quadro 3.25, apresentam-se os valores experimentais de Kou et al (2004), para a carga eléctrica medida no atravessamento dos provetes.

Quadro 3.25 – Carga eléctrica medida no atravessamento de betões (Kou et al, 2004)

Betões	Carga eléctrica (Coulomb)			
	cura por imersão em água		cura inicial por vapor	
	28 d	90 d	28 d	90 d
BR _{CV0}	3239	2427	2680	1485
BAGR20 _{CV0}	3643	2528	2956	1600
BAGR50 _{CV0}	4620	2609	3276	1740
BAGR100 _{CV0}	4957	3562	3940	2807
BR _{CV25}	2599	715	1552	317
BAGR20 _{CV25}	3038	937	1865	479
BAGR50 _{CV25}	3263	1275	1838	548
BAGR100 _{CV25}	3818	1759	2047	978
BR _{CV35}	2500	1109	971	510
BAGR20 _{CV35}	2981	1456	918	530
BAGR50 _{CV35}	3795	1066	1483	430
BAGR100 _{CV35}	3969	1789	1488	539

Na Figura 3.147, representam-se as variações da quantidade de carga eléctrica com a taxa de substituição de AP por

AR, para betões com 28 e 90 dias de cura tradicional por imersão.

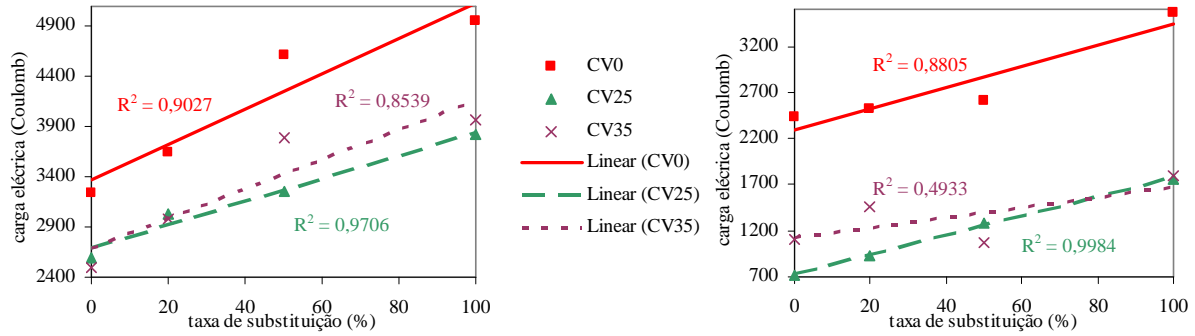


Fig. 3.147 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a carga eléctrica que atravessa o betão aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) (Kou et al, 2004)

Obtiveram-se os gráficos da Figura 3.148, como representação da variação da relação entre quantidades de carga eléctrica com a taxa de substituição dos AP por AR, aos 28 e 90 dias. Apesar da elevada linearidade dos resultados dos ensaios aos 90 dias da família de BAR com 25% de cinzas volantes, os mesmos deverão ser considerados como anómalos atendendo ao comportamento expectável desta propriedade (como é constatável nas restantes famílias). Com o aumento da idade ocorre, normalmente, um decréscimo da relação entre cargas eléctricas e, conseqüentemente, um aumento da resistência à penetração de cloretos. No caso referido, o aumento significativo dos valores entre os 28 e os 90 dias conduz à eliminação dos resultados desta última idade na análise gráfica em curso.

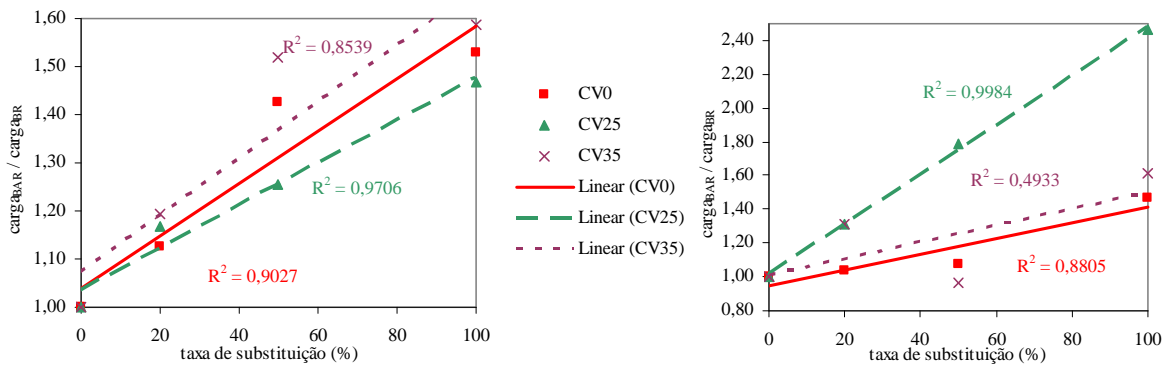


Fig. 3.148 – Variação da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a taxa de substituição de AP por AR (Kou et al, 2004)

A variação da relação entre as cargas eléctricas, medida aos 28 e 90 dias, com a relação entre as massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura é representada na Figura 3.149.

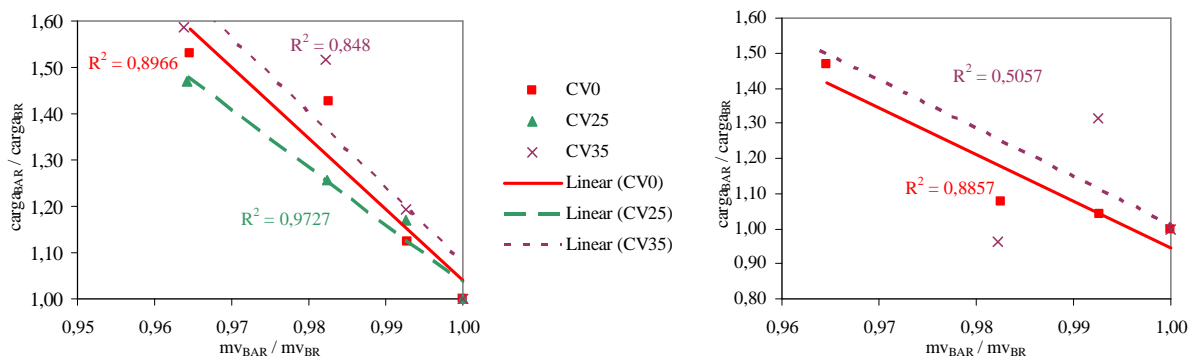


Fig. 3.149 – Variação da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre as massas volúmicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Capítulo 3 – Campanhas experimentais e resultados

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados muito bom (para a família com 0% de cinzas volantes aos 28 dias) e bons e apenas na família com 35% de cinzas volantes aos 90 dias o valor é considerado não aceitável. A diminuição das cargas eléctricas medidas com o aumento das massas volúmicas dos AR, justificar-se-á com o aumento da pasta de cimento aderida dos AR e, conseqüentemente, uma maior porosidade que facilita a penetração dos cloretos. Segundo o Grupo de Trabajo “Hórmigon reciclado” (2002), a penetração dos cloretos ocorre através da zona de nova pasta endurecida, da zona de transição entre esta pasta e os AR e da zona de antiga pasta endurecida agarrada aos AR.

Na Figura 3.150, representa-se a compilação da informação da Figura 3.149, com as idades de ensaios aos 28 e 90 dias.

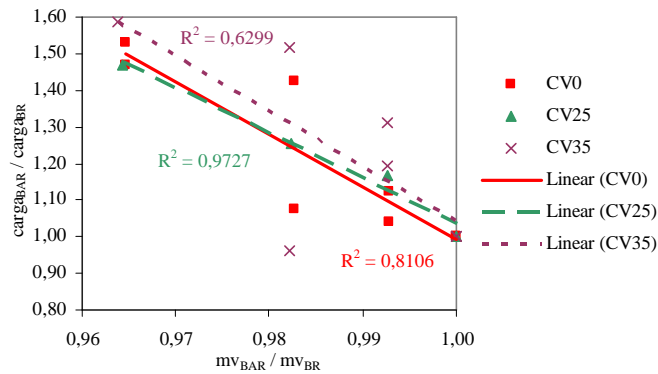


Fig. 3.150 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura (Kou et al, 2004)

Destaca-se uma dispersão de valores entre os 28 e os 90 dias para os betões com adição de cinzas volantes, conduzindo a coeficientes de correlação inferiores aos obtidos individualmente para cada uma das idades (considerados bom, muito bom e não aceitável).

Na Figura 3.151, representa-se a variação de todos os valores de cargas eléctricas, da campanha de Kou et al (2004) para a cura por imersão com idades de 28 e 90 dias, com a massa volúmica ponderada dos agregados da mistura. No resumo apresentado, obteve-se um coeficiente de correlação considerado aceitável.

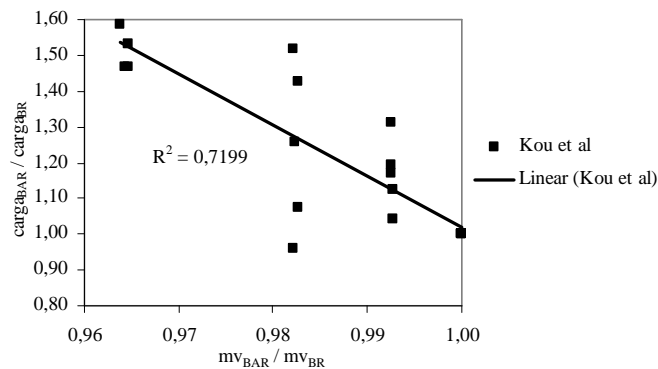


Fig. 3.151 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

Na Figura 3.152, representam-se as variações da relação entre as cargas eléctricas com a relação entre absorções de água da mistura dos agregados aos 28 e 90 dias. Para as famílias de betões com 0 e 25% de cinzas volantes, obtiveram-se valores considerados bons ou muito bons para os coeficientes de correlação das curvas de regressão linear.

O aumento da relação da absorção de água dos BAR relativamente ao BR representa a maior porosidade da pasta aderida dos AR. Esta porosidade contribui para a maior facilidade de penetração dos cloretos nos BAR, representada nestes ensaios pelo aumento das cargas eléctricas medidas.

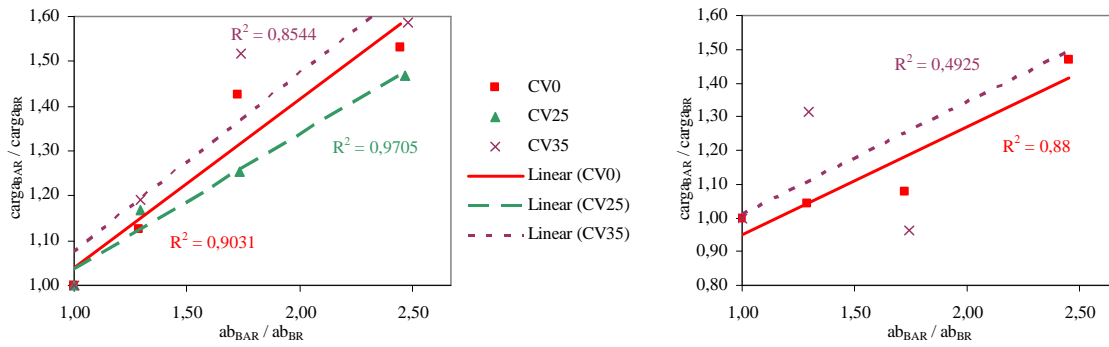


Fig. 3.152 – Variação da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água da mistura dos agregados (Kou et al, 2004)

Na Figura 3.153, representa-se a compilação dos gráficos da Figura 3.152, para as idades de ensaios de 28 e 90 dias, mantendo o critério de famílias segundo o teor de cinzas volantes adicionadas.

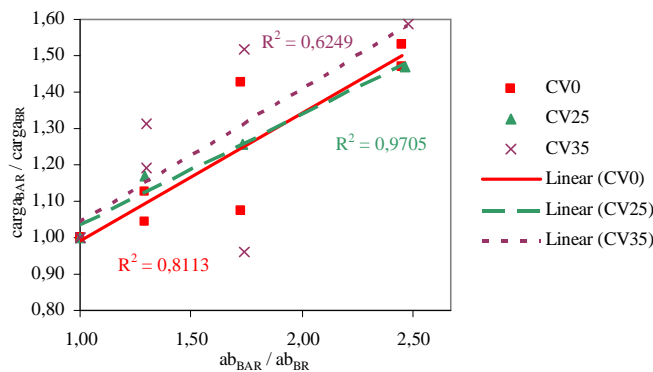


Fig. 3.153 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Kou et al, 2004)

Novamente, os ensaios de betões com adição de cinzas volantes conduziram a uma significativa dispersão de valores da relação de cargas eléctricas entre as duas idades consideradas (28 e 90 dias). Apenas o valor do coeficiente de correlação para os BAR com adição de 35% cinzas volantes é considerado não aceitável, sendo os restantes classificados como bom e muito bom para os BAR com teores de cinzas volantes de 0 e 25%, respectivamente.

Na Figura 3.154, resumem-se os mesmos valores experimentais de Kou et al, sendo realizada apenas uma curva de regressão linear englobando todas as famílias e todas as idades. O valor do coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável, sendo possível concluir sobre a existência de relação linear entre as variáveis em análise.

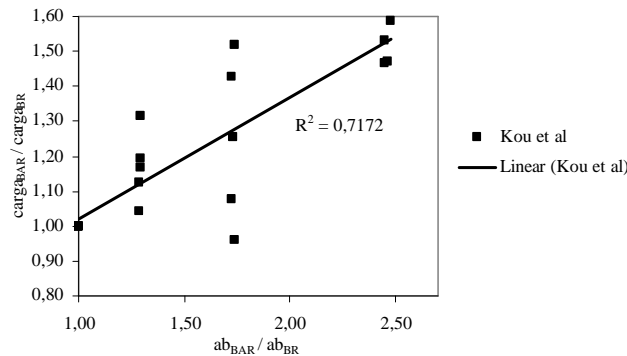


Fig. 3.154 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados (Kou et al, 2004)

As variações da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias e a resistência à compressão do betão aos 7 dias, são representadas na Figura 3.155.

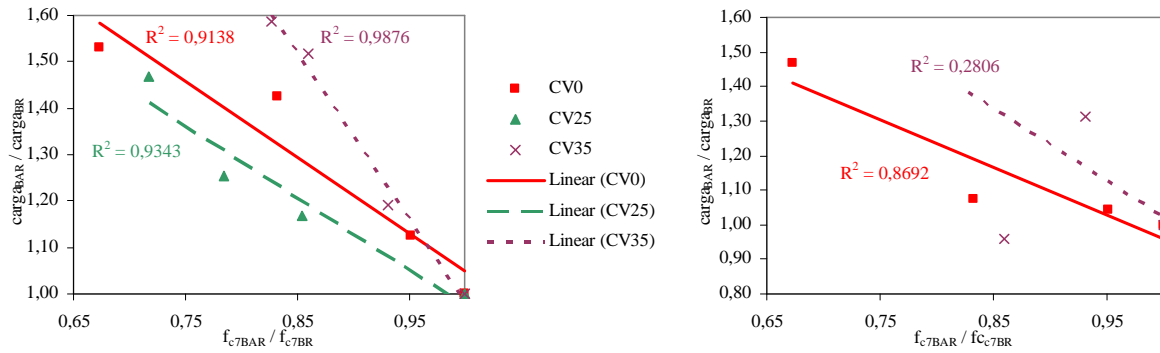


Fig. 3.155 – Variação da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 (à esquerda) e 90 dias (à direita) com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Tanto para os resultados aos 28 como aos 90 dias, foi possível obter coeficientes de correlação considerados bons e muito bons, à excepção do betão com 35% de cinzas volantes aos 90 dias. Com um aumento da relação entre as resistências à compressão aos 7 dias, registou-se uma diminuição da carga eléctrica. A variação das resistências à compressão aos 7 dias está associada às características dos AR abordadas, nomeadamente à menor resistência à compressão pela presença da pasta de cimento aderida (nos AR de betão) e aos próprios materiais (nos AR cerâmicos e argamassas). Esta pasta de cimento aderida dos AR contribui, conforme referido, para a diminuição da resistência à penetração de cloretos, reflectida graficamente no aumento da relação entre as cargas eléctricas.

Na Figura 3.156, representa-se o resumo da Figura 3.155, englobando ambas as idades de ensaios e mantendo as curvas de regressão linear relativas a cada família de betão. As famílias de betões sem adição de cinzas volantes e com 25% destas apresentam coeficientes de correlação considerados bons. A restante família, resultado da dispersão obtida entre as diferentes idades de ensaio, apresenta um coeficiente baixo e considerado não aceitável.

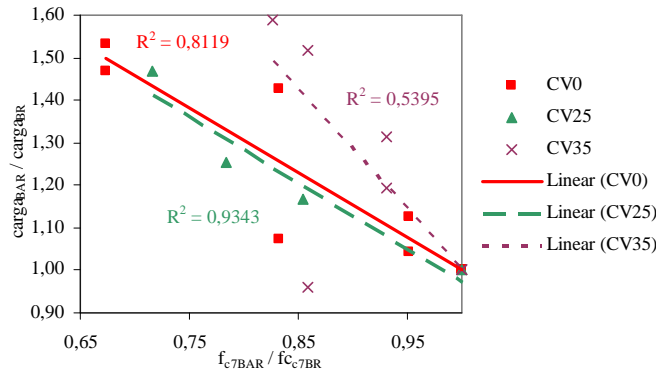


Fig. 3.156 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Kou et al, 2004)

Na Figura 3.157, representa-se o resumo de valores da relação entre as cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão, para a cura por imersão.

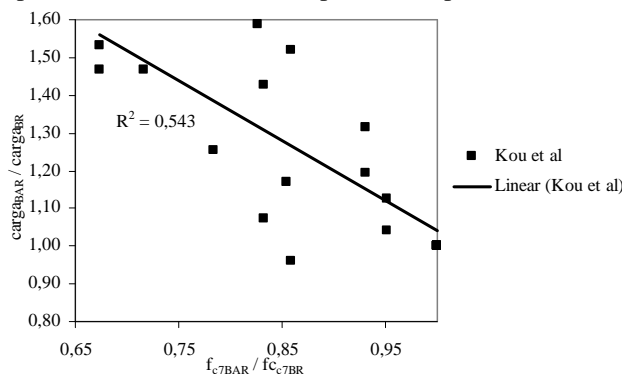


Fig. 3.157 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas medidas aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão (Kou et al, 2004)

O valor do coeficiente de correlação para a regressão linear é de 0,543, sendo um valor considerado não aceitável, resultado da dispersão referida.

3.4.6 Retracção

O fenómeno da retracção do betão após a presa representa a diminuição dimensional da peça em causa e pode implicar a perda de desempenho ao nível da resistência mecânica e de durabilidade. Este comportamento deverá ser controlado através do processo de produção do betão e das condições de cura.

É expectável que a substituição de AP por AR conduza a um aumento da retracção do betão endurecido. Este comportamento justifica-se pelo menor módulo de elasticidade dos AR relativamente aos AP, atendendo a que os primeiros, pela maior quantidade de pasta de cimento endurecida (nos AR de betão) ou pelas próprias características dos materiais (nos AR cerâmicos e de argamassas), têm uma menor rigidez e consequentemente menor capacidade de oposição ao fenómeno de retracção. Desta forma, quanto maior a taxa de substituição maior será a retracção registada. O aumento do teor em água da amassadura contribui igualmente para o incremento do fenómeno da retracção, conforme refere Brito (2005). Quanto maior for a capacidade de absorção de água dos AR, maior será a necessidade de aumento da quantidade de água assumindo a manutenção da trabalhabilidade e, consequentemente, o fenómeno da retracção aumentará.

Para a análise relativa à retracção do betão no estado endurecido, foi tratada a campanha experimental de Cervantes et al (2007). O ensaio à retracção foi realizado de acordo com a norma ASTM C157, tendo os corpos de prova as dimensões prismáticas 75 x 75 x 285 (mm). Nesta campanha, não se realiza a análise comparativa da variação da relação entre retracções com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias dado que os valores obtidos para esta propriedade mecânica não são consistentes com as tendências antes observadas.

Os valores obtidos para a retracção são apresentados no Quadro 3.25, e representam a deformação aos 28 dias relativamente ao estado inicial do corpo de prova.

Quadro 3.25 – Valores experimentais obtidos na retracção por secagem aos 28 dias (Cervantes et al, 2007)

Betões	Fibras sintéticas (%)	Retracção (x 10 ⁻⁶ m/m)
BR		505
BAGR50	0	518
BAGR100		645
BR		523
BAGR50	0,2	535
BAGR100		608

Na Figura 3.158, representa-se a relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a retracção aos 28 dias. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitável e bom.

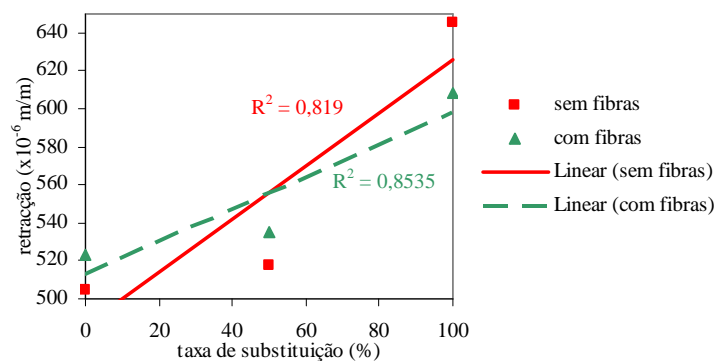


Fig. 3.158 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a retracção aos 28 dias (Cervantes et al, 2007)

Na Figura 3.159, representa-se a mesma variação para a relação entre retracções. Os coeficientes de correlação mantêm-se e a tendência de comportamento é a expectável e descrita no início do presente ponto.

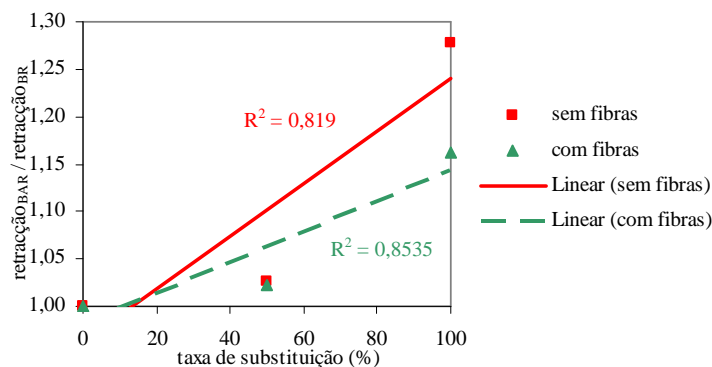


Fig. 3.159 – Variação da relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a relação entre retrações aos 28 dias (Cervantes et al, 2007)

Regista-se uma diminuição da relação entre retrações na família de betões com adição de fibras. Como referido, não pertence ao âmbito desta dissertação a análise do efeito da adição de fibras, embora a tendência registada fosse expectável.

Na campanha de Soberón (2002), foi também analisado o fenómeno da retração por secagem aos 90 dias. No Quadro 3.26, representam-se os valores obtidos. Da leitura dos valores confirma-se que a tendência enunciada no início do presente ponto se mantém, apesar de o valor de retração do BAR30 ser considerado anómalo, atendendo ao decréscimo da retração em relação ao valor correspondente ao BR, pelo que será eliminado e não constará na restante análise de resultados.

Quadro 3.26 – Valores experimentais obtidos na retração por secagem aos 90 dias (Soberón, 2002)

Betões	Retracção (x 10 ⁻⁶ m/m)
BR	374,0
BAR15	376,3
BAR30	352,4
BAR60	410,4
BAR100	402,9

Na Figura 3.160, representa-se a relação entre a retração e a taxa de substituição de AP por AR, conforme resultados do Quadro 3.26 e eliminação do valor referido.

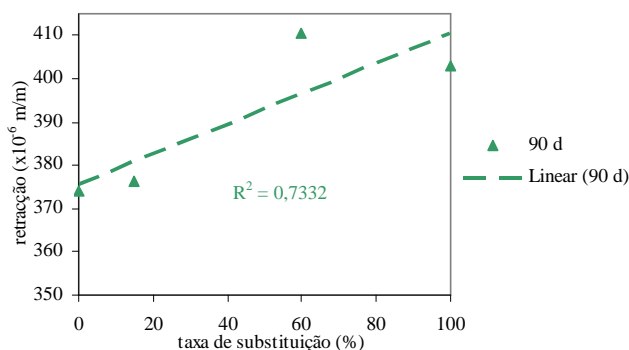


Fig. 3.160 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a retração aos 90 dias (Soberón, 2002)

O valor do coeficiente de correlação obtido é de 0,7332 e considerado aceitável. Este valor permite concluir sobre a existência de relação tendencialmente linear na variação em análise.

Na Figura 3.161, representa-se a variação da relação entre retrações aos 90 dias e a taxa de substituição de AP por AR. O valor do coeficiente de correlação volta a ser considerado aceitável.

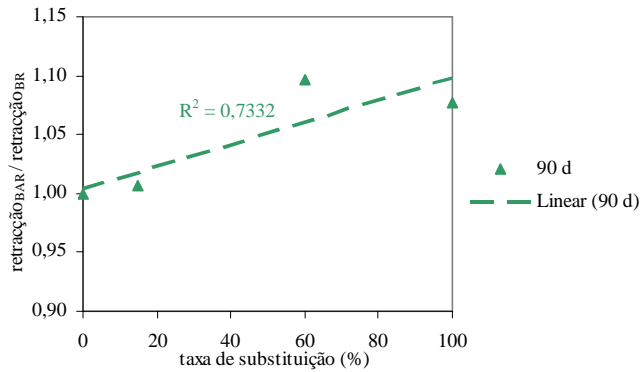


Fig. 3.161 – Variação da relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a relação entre retrações aos 90 dias (Soberón, 2002)

Na Figura 3.162, representa-se a variação da relação entre retrações com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados para a campanha de Cervantes et al (2007).

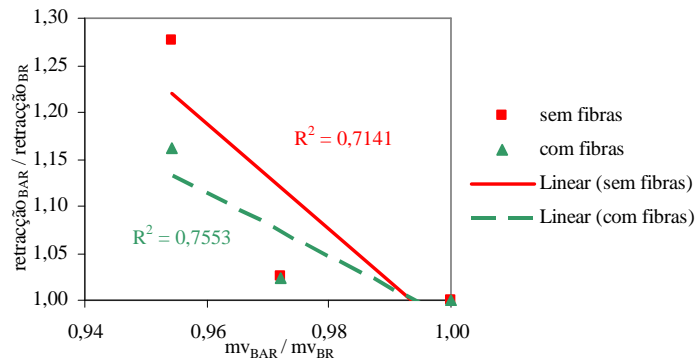


Fig. 3.162– Variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre retrações aos 28 dias (Cervantes et al, 2007)

O cálculo da massa volúmica ponderada foi executado através da equação 3.1. Os valores obtidos para o coeficiente de correlação são considerados aceitáveis.

Na Figura 3.163, representa-se o resumo da variação anterior entre as duas famílias de betões. Apesar da dispersão de valores, o coeficiente de correlação obtido de 0,6552 é considerado aceitável.

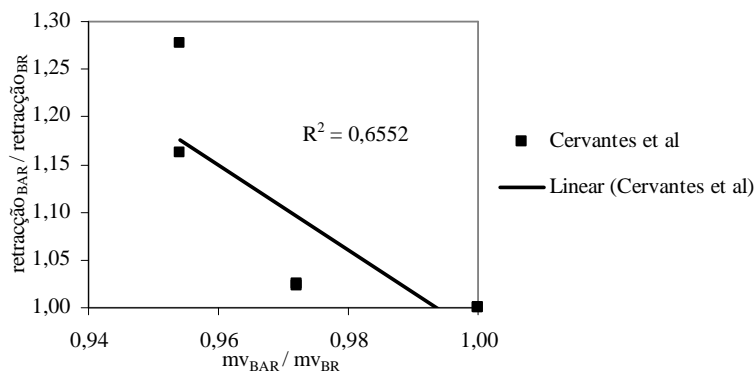


Fig. 3.163 – Resumo da variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre retrações aos 28 dias (Cervantes et al, 2007)

Recorrendo ao mesmo tipo de análise e para a campanha de Soberón (2002), obteve-se o gráfico representado na Figura 3.164. O coeficiente de correlação é considerado aceitável.

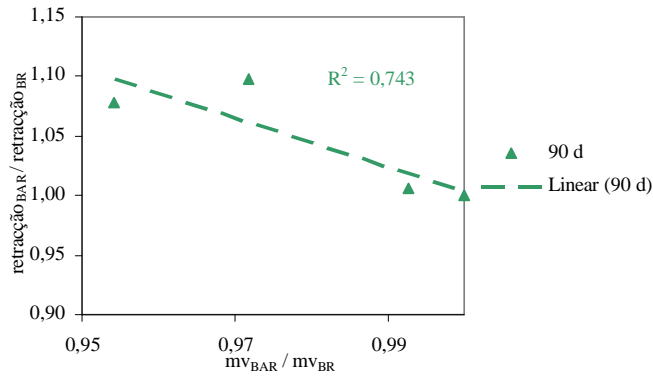


Fig. 3.164 – Variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre retrações aos 90 dias (Soberón, 2002)

A sobreposição das duas campanhas (Soberón e Cervantes et al), com a representação da variação da relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura com a relação entre retrações aos 28 e 90 dias, resulta na Figura 3.165. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado não aceitável, não sendo possível afirmar da existência de relação tendencialmente linear da variação.

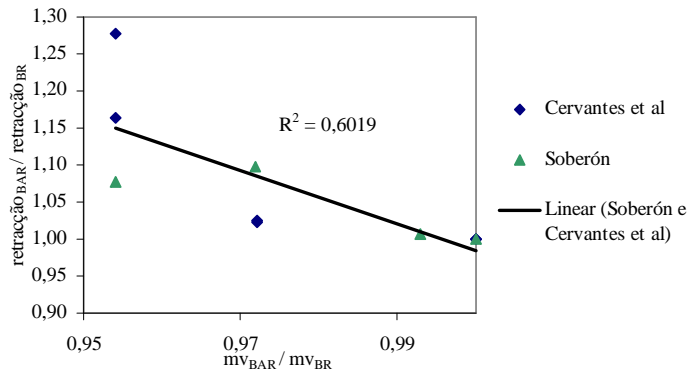


Fig. 3.165 – Resumo da variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre retrações aos 28 e 90 dias para as campanhas de Soberón e Cervantes

Nas Figuras 3.166 e 3.167, representa-se a variação da relação entre retrações com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura e o respectivo resumo entre as famílias.

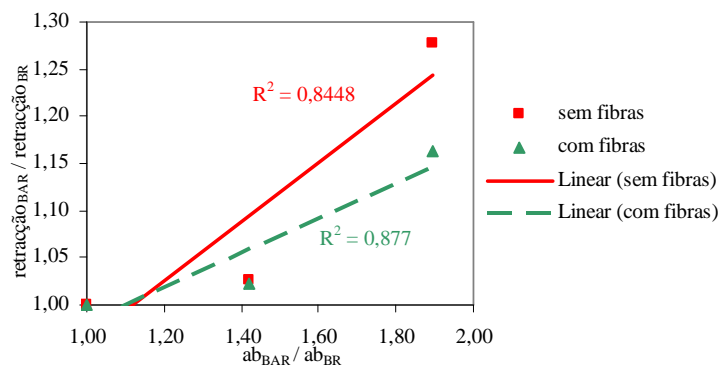


Fig. 3.166 – Variação da relação entre absorções de água ponderadas com a relação entre retrações aos 28 dias (Cervantes et al, 2007)

Na Figura 3.166, os coeficientes de correlação são considerados bons e na Figura 3.167 é considerado aceitável, indicando uma tendência linear na variação entre relações.

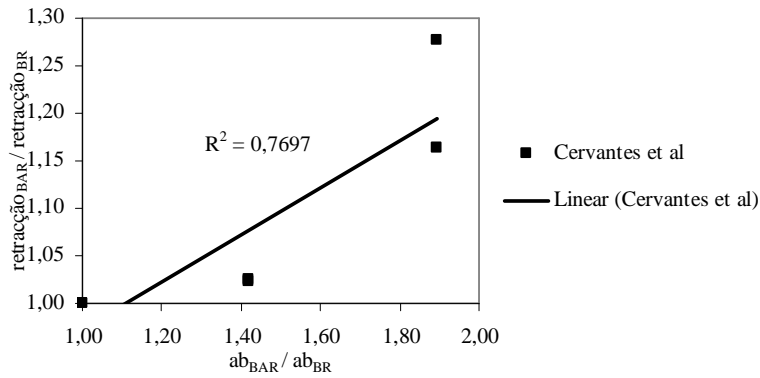


Fig. 3.167 – Resumo da variação da relação entre absorções de água ponderadas com a relação entre retracções aos 28 dias (Cervantes et al, 2007)

Na Figura 3.168, representa-se a variação da relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura com a relação entre retracções aos 90 dias para a campanha de Soberón (2002). O valor obtido para o coeficiente de correlação é de 0,7434 e, novamente, considerado aceitável.

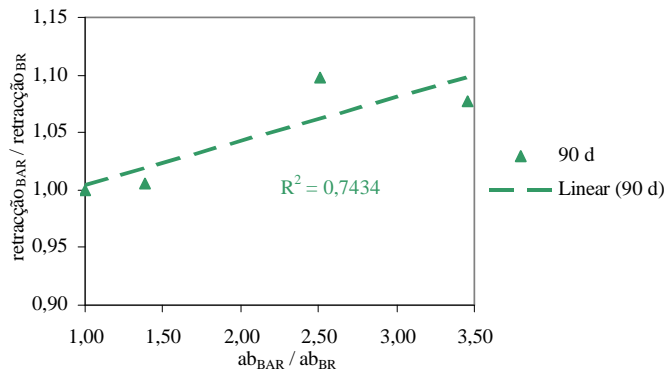


Fig. 3.168 – Variação da relação entre absorções de água ponderadas com a relação entre retracções aos 90 dias (Soberón, 2002)

O resumo da variação da relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura com a relação entre retracções aos 28 e 90 dias para as duas campanhas em análise é representado na Figura 3.169. O coeficiente de correlação obtido é de 0,4018, sendo considerado não aceitável.

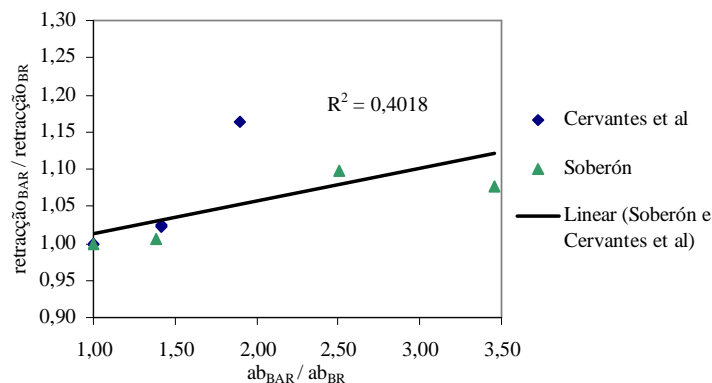


Fig. 3.169 – Resumo da variação da relação entre absorções de água ponderadas com a relação entre retracções aos 28 e 90 dias para as campanhas de Soberón e Cervantes

Como referido, apenas na campanha de Soberón (2002) a variação da relação entre retracções foi analisada com a resistência à compressão aos 7 dias. Na Figura 3.170, representa-se esta variação. O valor obtido para o coeficiente de corre-

lação é considerado bom, evidenciando uma variação tendencialmente linear entre as relações.

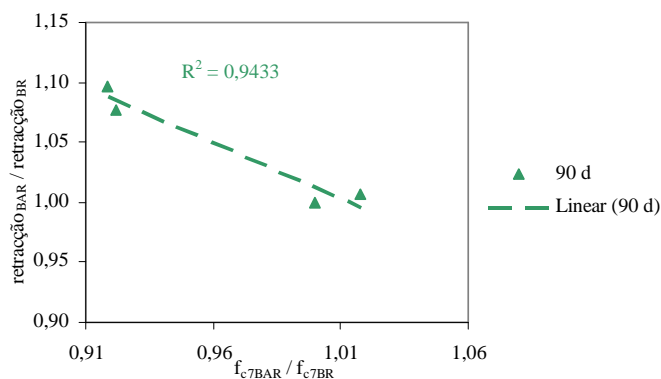


Fig. 3.170 – Variação da relação entre resistências à compressão com a relação entre retrações aos 90 dias (Soberón, 2002)

3.4.7 Absorção de água

A capacidade de absorção de água do betão no estado endurecido é uma propriedade relevante no estudo de durabilidade do mesmo, atendendo a que avalia a maior ou menor dificuldade de penetração de agentes agressivos que contribuem para a deterioração do betão. É expectável que a substituição de AP por AR produza um incremento da absorção de água do betão. Este efeito justifica-se com a maior porosidade dos AR, atribuída à pasta de cimento aderida (nos AR de betão) ou pelas próprias características dos materiais (nos AR cerâmicos e de argamassa), e será tanto maior quanto maior for a taxa de substituição. Também nesta propriedade, a variação da relação a/c assume um papel importante. Nesse sentido, a manutenção da trabalhabilidade dos BAR, afectada pela maior absorção de água dos AR relativamente aos AP, deve ser realizada com recurso a adjuvantes, ou se necessário pelo aumento da quantidade de água mantendo a relação a/c constante, de acordo com Brito (2005). O procedimento de pré-humidificação dos AR no processo de amasadura, comum à maioria das campanhas experimentais, é, pela razão exposta, muito importante.

Para análise desta propriedade, foram utilizados os valores da campanha de Soberón (2002). Os ensaios foram realizados de acordo com a norma espanhola UNE 83-310-90. Os resultados obtidos por Soberón (2002) para a absorção aos 28 dias do betão no estado endurecido são apresentados no Quadro 3.27.

Quadro 3.27 – Valores experimentais obtidos para a absorção de água aos 28 dias (Soberón, 2002)

Betões	Absorção (%)
BR	8,4
BAR15	8,6
BAR30	8,6
BAR60	9,0
BAR100	9,6

Na Figura 3.171, representa-se a relação entre a absorção de água, em percentagem, e a taxa de substituição de AP por AR. O coeficiente de correlação é considerado muito bom.

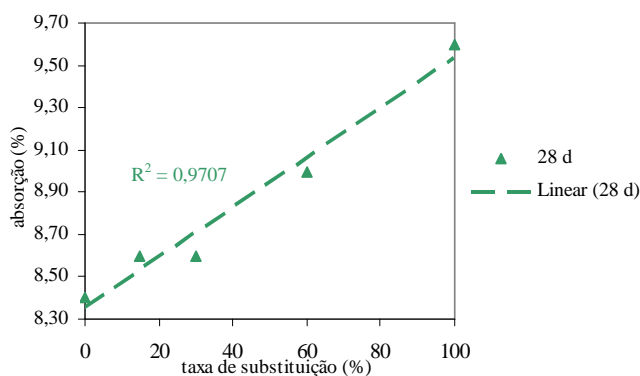


Fig. 3.171 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a absorção de água aos 28 dias (Soberón, 2002)

A representação da variação da relação entre absorções e a taxa de substituição é realizada na Figura 3.172. O coeficien-

te de correlação é idêntico ao anterior.

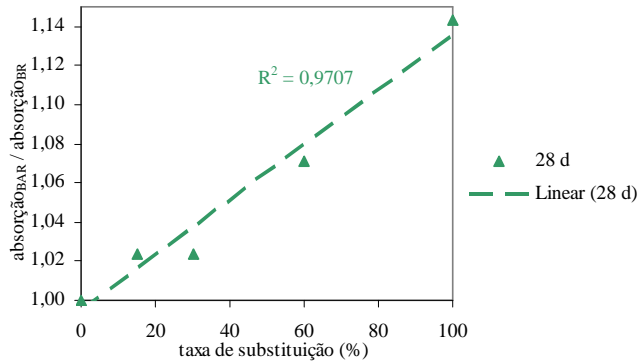


Fig. 3.172 – Variação da relação entre absorções de água aos 28 dias e a taxa de substituição de AP por AR (Soberón, 2002)

Na Figura 3.173, representa-se a variação da relação entre absorções e a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura.

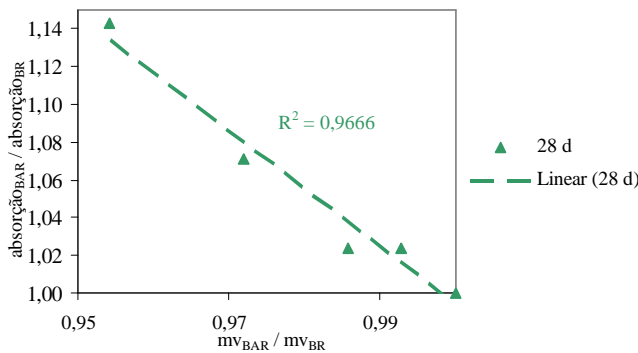


Fig. 3.173 – Variação da relação entre absorções de água aos 28 dias do betão com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura (Soberón, 2002)

Regista-se um elevado coeficiente de correlação, sendo considerado muito bom. A diminuição da relação entre massas volúmicas ponderadas conduz a um aumento da relação entre absorções. A menor massa volúmica dos AR relativamente aos AP, justificada pela maior percentagem de pasta de cimento aderida, justifica este efeito, conforme referido no início do presente ponto.

Na Figura 3.174, representa-se a variação da relação entre absorções do betão com a relação entre absorções ponderadas dos agregados da mistura.

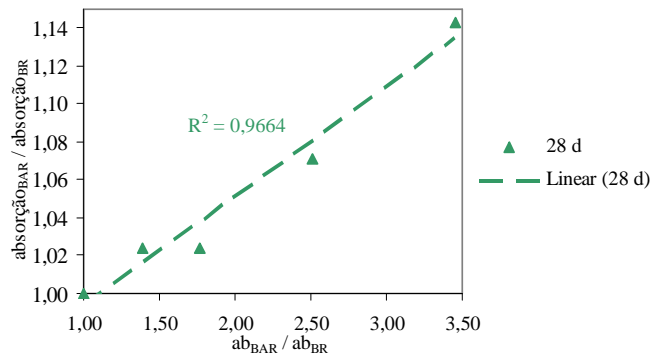


Fig. 3.174 – Variação da relação entre absorções de água aos 28 dias do betão com a relação entre absorções ponderadas dos agregados da mistura (Soberón, 2002)

O valor obtido para o coeficiente de correlação é elevado, sendo considerado muito bom e evidenciando uma relação

linear da variação entre relações. Também neste comportamento identifica-se a influência da pasta de cimento aderida dos AR que, por possuir maior porosidade e, conseqüentemente, maior absorção, conduz a uma maior absorção do betão endurecido.

Na Figura 3.175, representa-se a variação da relação entre absorções do betão com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias.

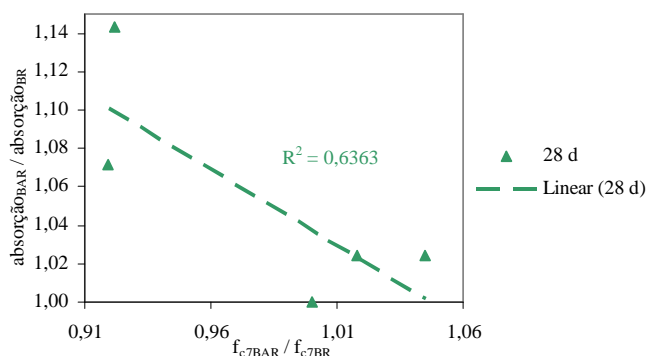


Fig. 3.175 – Variação da relação entre absorções de água aos 28 dias do betão com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Soberón, 2002)

O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado não aceitável, reflectindo a dispersão de valores já verificada para os ensaios de resistência à compressão aos 7 dias.

3.4.8 Fluência

O efeito da fluência, representado pela deformação do betão quando submetido a carga durante um determinado período de tempo, deve ser controlado pois pode interferir significativamente no desempenho em serviço do betão, caso a deformação seja excessiva.

De acordo com Brito (2005), a maior rugosidade normalmente registada nos AR, relativamente aos AP, pode contribuir positivamente para uma melhor aderência entre estes e a pasta de cimento e, conseqüentemente, para uma redução da fluência. No entanto, a redução do módulo de elasticidade dos AR relativamente aos AP, pelas razões já expostas, prevalece como efeito negativo na fluência, aumentando-a. Também o incremento da quantidade de água na amassadura, normalmente atribuída à maior absorção de água dos AR, contribui para um aumento do fenómeno da fluência. É, portanto, expectável que a fluência aumente com o incremento da taxa de substituição de AP por AR, justificando-se este comportamento com o menor módulo de elasticidade dos últimos.

A campanha experimental de Soberón (2002) tratou o comportamento dos BAR relativamente à fluência. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 45 cm de altura. A carga aplicada nos ensaios de fluência correspondeu a 35% da resistência à compressão aos 28 dias.

Os valores obtidos por Soberón aos 90 dias para o coeficiente de fluência são representados no Quadro 3.28.

Quadro 3.28 – Valores experimentais obtidos para o coeficiente de fluência aos 90 dias (Soberón, 2002)

Betões	Coefficiente de fluência
BR	2,90
BAR15	3,55
BAR30	3,65
BAR60	3,85
BAR100	4,04

Na Figura 3.176, representa-se a relação entre o coeficiente de fluência aos 90 dias e a taxa de substituição de AP por AR. O valor obtido para o coeficiente de correlação foi de 0,7625, sendo considerado aceitável. Na análise desta variação, regista-se um aumento do coeficiente de fluência com o incremento da taxa de substituição de AP por AR, sendo este o comportamento expectável para esta propriedade e justificável pelas razões apresentadas no início do presente ponto.

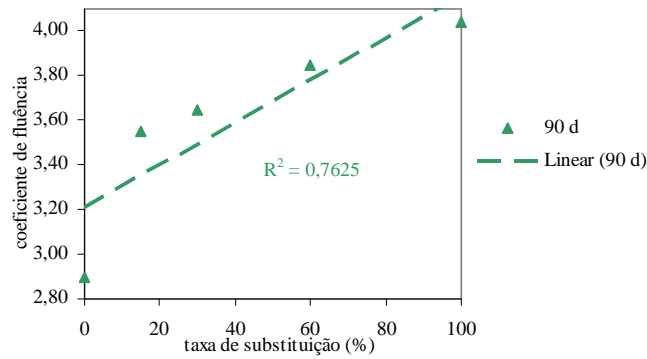


Fig. 3.176 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e o coeficiente de fluência aos 90 dias (Soberón, 2002)

Na Figura 3.177, representa-se a variação da relação entre os coeficientes de fluência e a taxa de substituição de AP por AR. O coeficiente de correlação é igual ao anterior, dada a manutenção da relação entre as ordenadas e as abcissas.

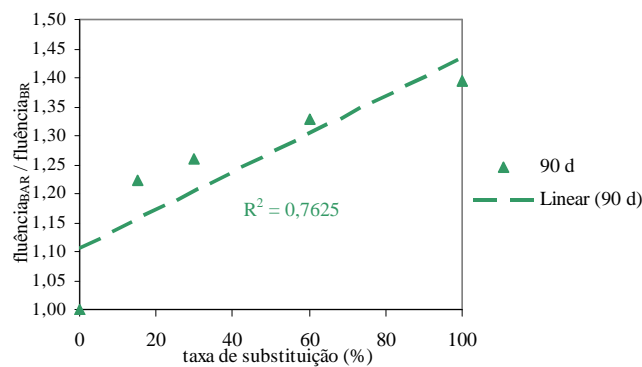


Fig. 3.177 – Variação da relação entre coeficientes de fluência aos 90 dias e a taxa de substituição de AP por AR (Soberón, 2002)

Analisando os gráficos das Figuras 3.176 e 3.177, em particular a linearidade entre os pontos correspondentes a todos os BAR, conclui-se que o valor correspondente ao BR não poderá estar correcto, podendo tratar-se de um erro na publicação do artigo ou, com maior probabilidade, do processo experimental desenvolvido por Soberón (2002). Assim, e de forma a evitar um desvio dos resultados e respeitando a linearidade observada nos restantes valores dos BAR, na análise dos restantes gráficos será considerado o valor de 3,47 para o coeficiente de fluência correspondente ao BR. Este valor expectável foi estimado com recurso à recta de regressão linear aplicada aos vários pontos dos BAR mas retirando o valor que se considera estar incorrecto na Figura 3.176.

A variação da relação entre coeficientes de fluência com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura é representada na Figura 3.178. O coeficiente de correlação obtido é considerado muito bom.

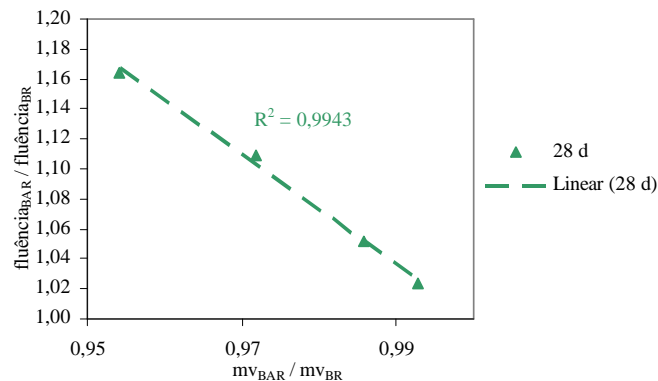


Fig. 3.178 – Variação da relação entre coeficientes de fluência aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura (Soberón, 2002)

O aumento da relação entre os coeficientes de fluência é justificado, conforme referido no início do presente ponto, pelo reduzido módulo de elasticidade dos AR, aqui evidenciado pela diminuição da relação entre massas volúmicas. À diminuição da relação entre massas volúmicas corresponde também um aumento da porosidade, atribuída à maior percentagem de pasta de cimento aderida.

Na Figura 3.179, representa-se a variação da relação entre coeficientes de fluência com a relação entre absorções ponderadas dos agregados da mistura. O coeficiente de correlação obtido é considerado, novamente, muito bom. Também neste comportamento, o aumento da relação entre absorções de água, atribuída à pasta de cimento aderida (nos AR de betão) ou pelas próprias características dos materiais (nos AR cerâmicos e de argamassas), conduz a uma redução do módulo de elasticidade e a um aumento da fluência.

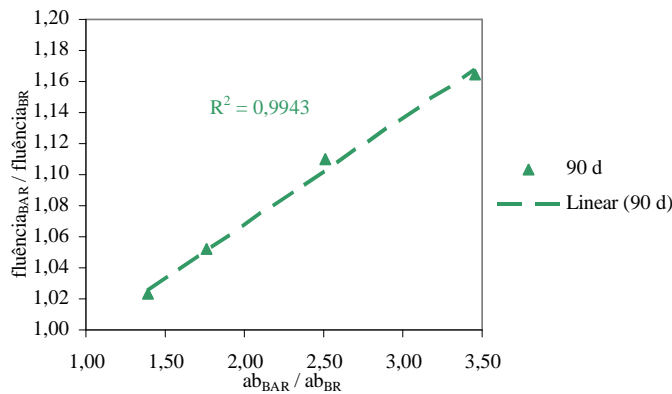


Fig. 3.179 – Variação da relação entre coeficientes de fluência aos 90 dias com a relação entre absorções ponderadas dos agregados da mistura (Soberón, 2002)

Na Figura 3.180, representa-se a variação da relação entre coeficiente de fluência com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias.

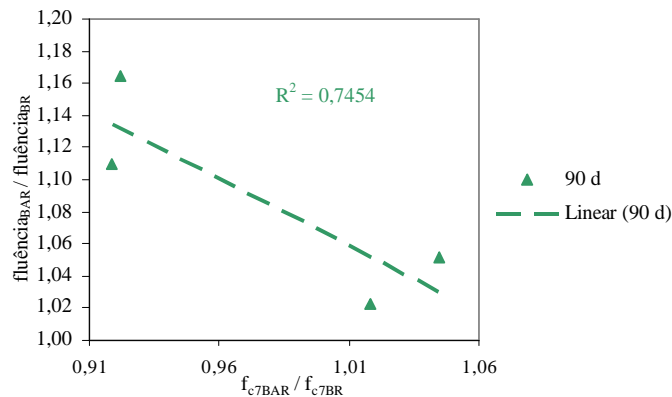


Fig. 3.180 – Variação da relação entre coeficientes de fluência aos 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Soberón, 2002)

O coeficiente de correlação obtido é inferior aos obtidos nas outras relações entre propriedades, mas ainda assim considerado aceitável.

3.4.9 Carbonatação

A capacidade de resistência à carbonatação, tal como a de penetração aos cloretos, é outra das propriedades fundamentais no controlo da durabilidade do betão no estado endurecido. O processo de controlo da resistência à carbonatação é semelhante ao da penetração de cloretos.

A substituição de AP por AR, expectavelmente, conduz a uma diminuição da resistência à carbonatação, evidenciada pelo aumento da profundidade deste fenómeno. Este comportamento justifica-se fundamentalmente pela maior porosidade, dos AR relativamente aos AP, facilitando a penetração de agentes exteriores no interior do betão.

O incremento da quantidade de água de amassadura, de forma a compensar a maior absorção dos AR, contribui igualmente para uma redução da resistência à carbonatação, atendendo à maior porosidade que introduz no betão no estado endurecido.

O efeito da carbonatação no betão no estado endurecido foi alvo de estudo na campanha experimental de Katz (2003). Os corpos de prova foram ensaiados aos 6 meses de idade, tendo sido obtidos os resultados de profundidade de carbonatação nesta idade e após uma exposição inicial de 3 e 7 dias em câmara de carbonatação (com temperatura constante de 30 °C, 60% de humidade relativa e 5% de CO₂). Os resultados utilizados referem-se à exposição inicial de 7 dias.

Conforme descrito, a campanha considerou apenas taxas de substituição de 0 e 100%, reduzindo o potencial de análise da presente dissertação na propriedade resistência à carbonatação. No entanto, numa perspectiva de alargamento do número de resultados utilizáveis, foram consideradas as 2 famílias de BAR (com cimento portland tradicional e branco), assim como os valores experimentais da profundidade de carbonatação, em milímetros, nas várias faces dos corpos de prova (topo, fundo e laterais), conforme descrito no Quadro 3.29, correspondente aos resultados experimentais de Katz (2003).

Quadro 3.29 – Valores experimentais obtidos para a profundidade de carbonatação (Katz, 2003)

Betões	Cimento	Carbonatação aos 7 dias ^{a)} (mm)		
		topo	fundo	laterais
BR	tradicional	13,80	10,80	12,80
BAR100		17,00	17,00	16,30
BR	branco	7,40	5,90	7,30
BAR100		13,30	10,10	11,90

a) Carbonatação acelerada aos 6 meses de idade

Na Figura 3.181, representa-se a relação entre a taxa de substituição e a profundidade de carbonatação nas diversas faces ensaiadas. Os coeficientes de correlação são considerados bons, em ambas as famílias. A análise comparativa entre o comportamento do cimento branco e o tradicional, não se insere no âmbito desta dissertação, refere-se no entanto que o cimento branco utilizado é de classe de resistência superior ao cimento tradicional, o que explica a tendência registada.

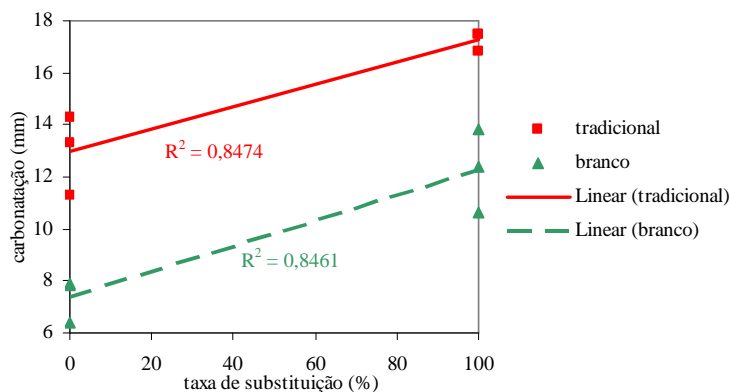


Fig. 3.181 – Relação entre a taxa de substituição de AP por AR e a profundidade de carbonatação aos 7 dias (Katz, 2003)

Na Figura 3.182, representa-se a variação da relação entre profundidades de carbonatação e a taxa de substituição de AP por AR. Os coeficientes de correlação mantêm-se elevados e são considerados aceitável e muito bom para a família de cimento tradicional e de cimento branco, respectivamente. Constata-se uma inversão das famílias, sendo, agora, a relação de profundidades de carbonatação do BAR com cimento branco superior à da do BAR com cimento tradicional. Este comportamento justifica-se com os valores significativamente mais baixos do BR com cimento branco, podendo afirmar-se que, neste caso, a substituição de AP por AR tem uma influência maior.

Como verificado no ponto 3.4.1, dedicado à análise da resistência à compressão axial do betão, também na presente propriedade, quanto maior for a classe de resistência do BAR maior será o decréscimo provocado pelo substituição de AP por AR.

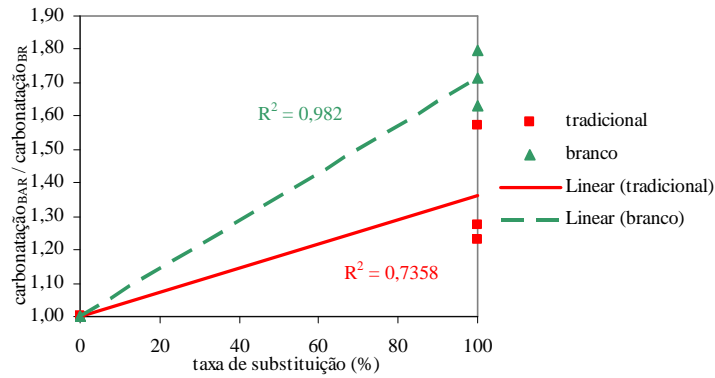


Fig. 3.182 – Variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias e a taxa de substituição de AP por AR (Katz, 2003)

Na Figura 3.183, representa-se a variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura, calculadas através da equação 3.1.

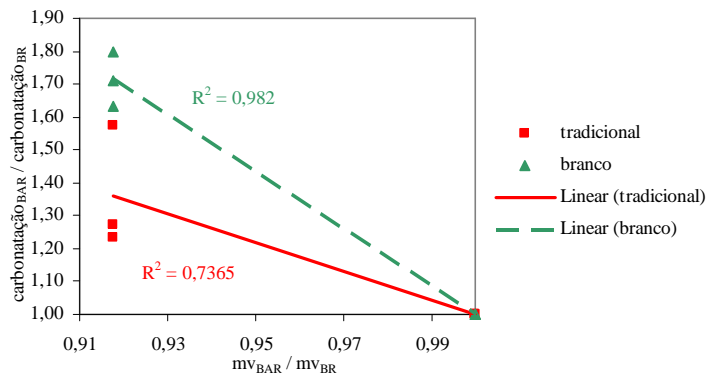


Fig. 3.183 – Variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura (Katz, 2003)

Na variação em análise, os resultados obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitável para o BAR com cimento tradicional e muito bom para o BAR com cimento branco. Na Figura 3.184, representa-se o resumo da correlação de valores apresentados na Figura 3.183 para a variação em análise. O coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável, indiciando uma relação linear entre as relações.

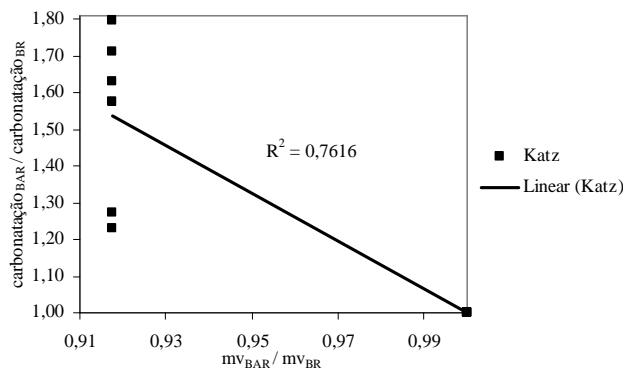


Fig. 3.184 – Resumo da variação da relação entre massas volúmicas ponderadas com a relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias (Katz, 2003)

Na Figura 3.185, representa-se a variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre absorções de água ponderadas da mistura dos agregados, calculadas através da equação 3.2. Os coeficientes de correlação obtidos são considerados como aceitável e muito bom para a família para o BAR com cimento tradicional e para o BAR com cimento branco, respectivamente.

Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados
Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional

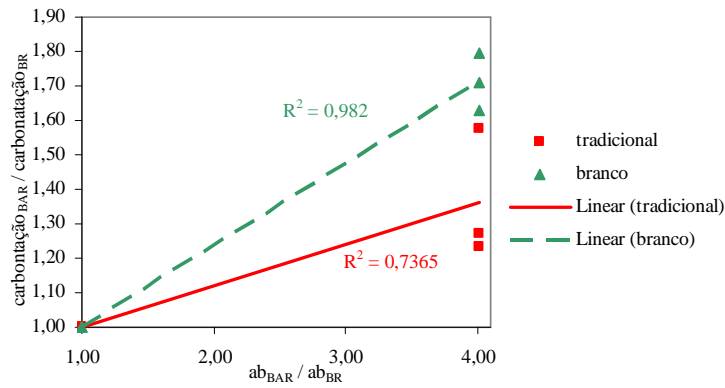


Fig. 3.185 – Variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Katz, 2003)

O resumo da variação da relação entre profundidades de carbonatação com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura é representado na Figura 3.186. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado aceitável.

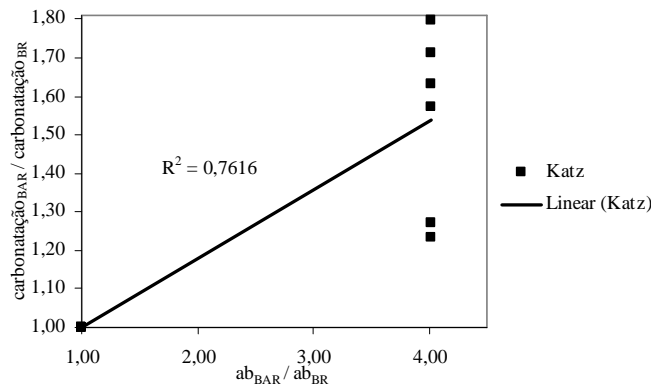


Fig. 3.186 – Resumo da variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura (Katz, 2003)

A variação da relação entre profundidades de carbonatação com a resistência à compressão aos 7 dias é representada na Figura 3.187.

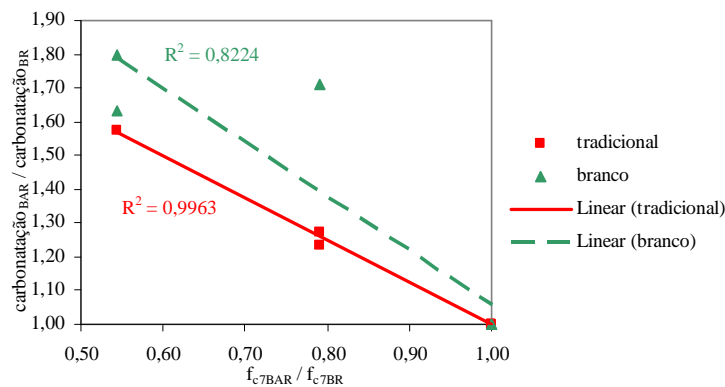


Fig. 3.187 – Variação da relação entre profundidades de carbonatação com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Katz, 2003)

Os coeficientes de correlação obtidos são considerados aceitável e muito bom para a família de BAR com cimento branco e tradicional, respectivamente.

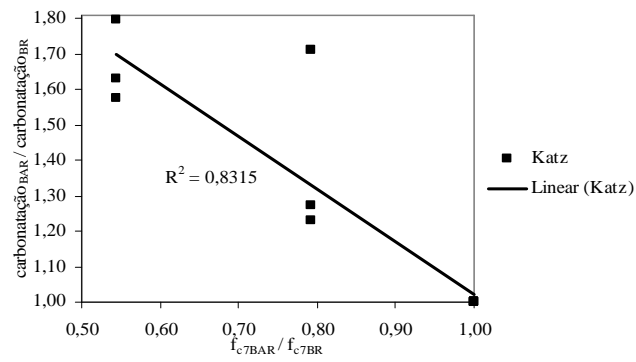


Fig. 3.188 – Resumo da variação da relação entre profundidades de carbonatação aos 7 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias (Katz)

Na Figura 3.188, representa-se o gráfico resumo relativo à variação representada na Figura 3.187. O valor do coeficiente de correlação obtido é considerado bom, indiciando uma relação linear da variação.

4. Conclusões

4.1 Considerações finais

A sobrecarga da exploração dos recursos naturais induzida pela actividade humana, e em especial pelo sector da construção, é muito elevada e tende a esgotá-los com rapidez. Por outro lado, a necessidade de depósito e tratamento dos resíduos, produzidos nos variados processos de construção e demolição, é uma realidade com fortes implicações ambientais e económicas.

Torna-se, então, imprescindível a procura de soluções que viabilizem o reaproveitamento e a reciclagem dos produtos originados pela actividade de construção e demolição. Uma das formas de contribuir para esta solução é a utilização de agregados reciclados na produção de betões. Este tipo de reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição deverá ser realizado, preferencialmente, através da produção de betões estruturais, maximizando as potencialidades dos materiais e evitando o comum processo de “*downcycling*” na reciclagem de resíduos.

O desenvolvimento de trabalhos de investigação, que permitam o aprofundamento do conhecimento técnico na temática da utilização de agregados reciclados na produção de betões com fins estruturais, tem permitido um incremento na aplicação desta tecnologia no sector da construção de vários países. No entanto, continua a existir uma elevada resistência dos actores deste sector à mudança que conduz ao aproveitamento destes recursos.

Nesse sentido, a presente dissertação revelou-se interessante e contributiva para o desenvolvimento de métodos que permitam agilizar a utilização dos agregados reciclados na produção de betões estruturais. Permitiu também perceber a elevada heterogeneidade de procedimentos adoptados pelos investigadores a nível internacional, sendo que em alguns casos essa variância origina dificuldades aos estudos comparativos, como o presente. Constatou-se também que a exposição dos resultados das campanhas experimentais, mesmo em publicações de referência a nível internacional, nem sempre adopta critérios que permitam uma análise aprofundada dos mesmos pela falta de informação disponibilizada.

Apesar das barreiras encontradas, a presente dissertação conseguiu abordar algumas das propriedades mais importantes do betão no estado fresco e endurecido e desenvolver o conceito inicialmente traçado de encontrar correlações na variação dessas propriedades do betão com a relação entre massas volúmicas e absorções de água ponderadas da mistura dos agregados e resistências à compressão axial aos 7 dias do betão. O objectivo fundamental foi alcançado, sendo assim possível desenvolvê-lo, através da análise de outras campanhas experimentais, e consolidar este procedimento inovador de antecipação das propriedades dos BAR com base nas propriedades dos AR e da resistência à compressão aos 7 dias. O carácter inovador desta metodologia, alvo de patenteamento nacional (patente n.º PT103756 – “Metodologia de estimativa de betões com agregados reciclados”), consiste na forma expedita e económica de recolha de informação (massa volúmica e absorção de água dos AR e resistência à compressão aos 7 dias do BAR), por parte dos agentes do sector da construção, que poderá conduzir a uma antecipação das propriedades dos BAR com uma determinada taxa de substituição de AR por AP. Um exemplo prático desta aplicação, após o desenvolvimento da mesma, consiste na hipótese de um promotor, proprietário de um edifício que será alvo de demolição e posterior construção, decidir sobre a aplicação dos resíduos provenientes dessa demolição na nova estrutura, informando para isso o projectista sobre o decréscimo de propriedades do betão a utilizar. Com essa informação, o projectista ajustará o dimensionamento do projecto de betão armado, permitindo uma economia considerável em todo o processo e um contributo para uma efectiva sustentabilidade ecológica do sector.

4.2 Conclusões gerais

O levantamento das campanhas experimentais realizadas internacionalmente revelou grandes diferenças a nível de procedimentos e de organização / apresentação da informação. No processo de pesquisa, foram abandonadas várias campanhas por indisponibilidade de dados. Esta indisponibilidade ocorre pela não apresentação dos resultados obtidos ou, simplesmente, porque os investigadores não abordaram a informação em causa. Exemplos relevantes deste tipo de limitação foram a ausência de dados sobre as propriedades dos agregados, tanto dos AR como dos AP, ou sobre a composição dos betões sujeitos a ensaio. A inexistência de dados como os referidos inviabilizou a utilização das respectivas campanhas no presente estudo.

Outra das dificuldades na recolha da informação foi a variabilidade de factores introduzidos em cada campanha experimental. De modo a permitir uma comparação cientificamente válida, as campanhas analisadas deverão assem-

Ihar-se no maior número de factores de produção dos betões. Em cada uma das campanhas analisadas, a relação *a/c* foi uma das características inalteradas entre os BR e os vários BAR. Nem sempre é referida a importante distinção entre a relação *a/c* efectiva e a aparente. Para que a comparação seja bem sucedida, destacam-se as seguintes características que deveriam ser mantidas inalteradas, como as mais relevantes para o estudo em causa:

- o relação *a/c* efectiva (diferenciando a quantidade de água total introduzida na produção do betão e a que efectivamente contribui para a hidratação do betão);
- o trabalhabilidade (a manutenção desta propriedade deve ser obtida com recurso a adjuvantes ou aumentando a quantidade de água mantendo no entanto constante a relação *a/c* efectiva, o que é conseguido através de um processo de pré-saturação);
- o curva granulométrica dos agregados (a substituição de AP por AR deve ser realizada mantendo estritamente idêntica a curva granulométrica).

A variabilidade destes critérios entre campanhas é corroborada pela maior linearidade, e respectivos coeficientes de correlação, de resultados nas campanhas experimentais isoladamente do que na análise comparativa com sobreposição de valores das várias campanhas. O processo de comparação entre as campanhas é, assim, dificultado, proporcionando uma variabilidade artificial dos resultados, que não ocorreria caso as condições acima referidas fossem garantidas.

Ainda assim, a presente dissertação permitiu a análise de várias propriedades do betão, no estado fresco e endurecido.

Relativamente ao betão no estado fresco, foram analisadas a trabalhabilidade e a massa volúmica.

Registou-se que a massa volúmica do betão no estado fresco diminui proporcionalmente com o aumento da taxa de substituição de AR por AP. Este comportamento atribui-se à menor massa volúmica dos AR relativamente aos AP e ao facto de a massa volúmica do betão ser a soma desta propriedade dos vários componentes.

O aumento da taxa de substituição de AP por AR conduz a uma diminuição da trabalhabilidade, que é tradicionalmente medida pela redução do abaixamento no ensaio do cone de Abrams, sobretudo atribuída à maior absorção dos primeiros. A maior rugosidade e forma mais irregular das partículas dos AR relativamente aos AP contribuem igualmente para a redução da trabalhabilidade.

Relativamente ao betão no estado endurecido, foram ensaiadas propriedades mecânicas e de durabilidade. Tendencialmente, na maioria das propriedades, regista-se uma diminuição de capacidade com o aumento da taxa de substituição de AP por AR.

Para efeitos da análise das conclusões gerais, sobre a variação das propriedades do betão no estado endurecido e as várias relações (de massas volúmicas e de absorções de água ponderadas da mistura dos agregados e de resistências à compressão aos 7 dias), a abordagem gráfica do capítulo 3 foi agora condicionada à utilização dos dados experimentais de Kou et al (2004) com 0% de cinzas volantes e obtidos após cura por imersão. Nas restantes campanhas, mantiveram-se os critérios já adoptados e justificados no capítulo anterior. Este procedimento teve como objectivo uma comparação final de resultados experimentais com a maior proximidade possível, eliminando procedimentos “desviantes” das campanhas como os mencionados.

As curvas de regressão linear apresentadas nesta análise gráfica final foram “corrigidas” para garantir a sua passagem no ponto correspondente aos valores relativos do BR, ou seja, o ponto com coordenadas (1;1). O objectivo deste ajuste visa a obtenção de um resultado que se aproxime fisicamente do comportamento real da variação, embora contribua desfavoravelmente para o coeficiente de correlação, piorando-o, visto que a folha de cálculo utilizada maximiza o valor do R^2 (quando não realizada a correcção da recta). Apenas por razões de operacionalidade da folha de cálculo, para permitir o ajuste da recta de correlação, o eixo das ordenadas é sujeito a reajuste nalguns dos gráficos.

A resistência à compressão axial é a propriedade mais ensaiada e, por isso, a que dispõe de mais resultados neste estudo. A variação da relação entre resistências à compressão e a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura apresentou resultados satisfatórios e bons do coeficiente de correlação, ou seja, regista-se um comportamento tendencialmente linear entre as relações. Quanto maior for a proximidade de valor da massa volúmica dos AR relativamente aos AP, menor será a diminuição de resistência à compressão do BAR relativamente ao BR.

Na Figura 4.1, representa-se a variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias e a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as várias campanhas analisadas. Pelas razões expostas no capítulo 3, apresenta-se também a mesma variação sem os valores de Kou et al (2004).

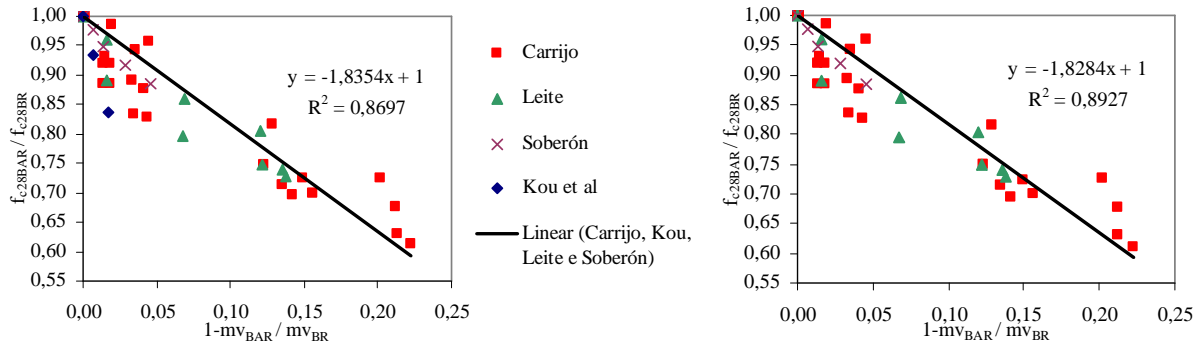


Fig. 4.1 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Na Figura 4.2, são apresentados os gráficos com a mesma relação da Figura 4.1 mas para os ensaios aos 90 dias. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitável e bom.

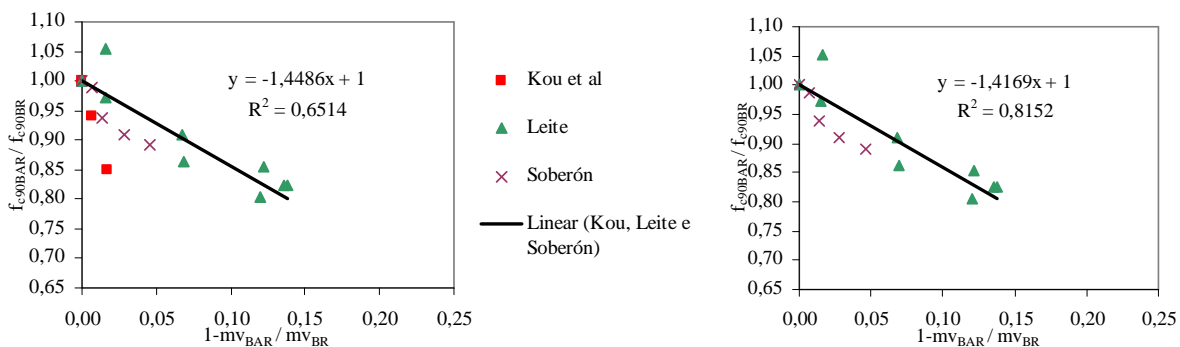


Fig. 4.2 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Na Figura 4.3, representam-se os gráficos resumo para os valores obtidos nos ensaios aos 28 e 90 dias para as campanhas referidas. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são, em ambos os casos, considerados bons.

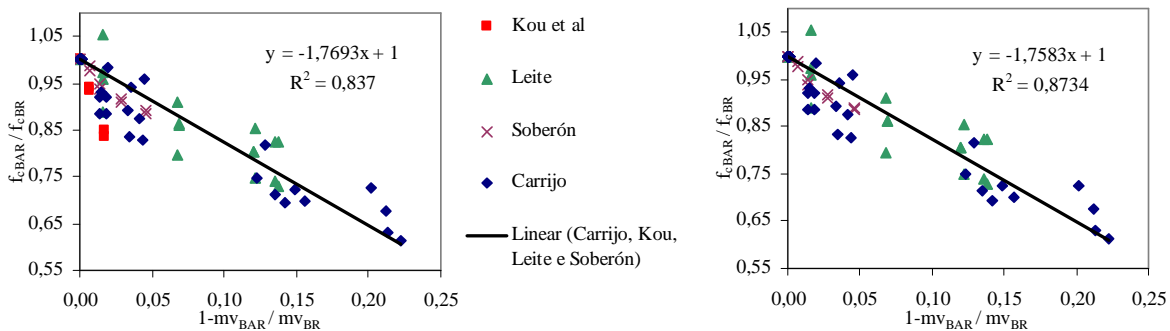


Fig. 4.3 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Os resultados disponíveis não permitiram uma conclusão tão vincadamente generalizada para a variação com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura, no caso da sobreposição de campanhas. No entanto, quando estas são analisadas isoladamente os coeficientes de correlação revelaram-se aceitáveis ou bons.

Na Figura 4.4, representa-se a variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias e a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura para as várias campanhas analisadas. Novamente, apresenta-se também a mesma variação sem os valores de Kou et al (2004).

Capítulo 4 – Conclusões

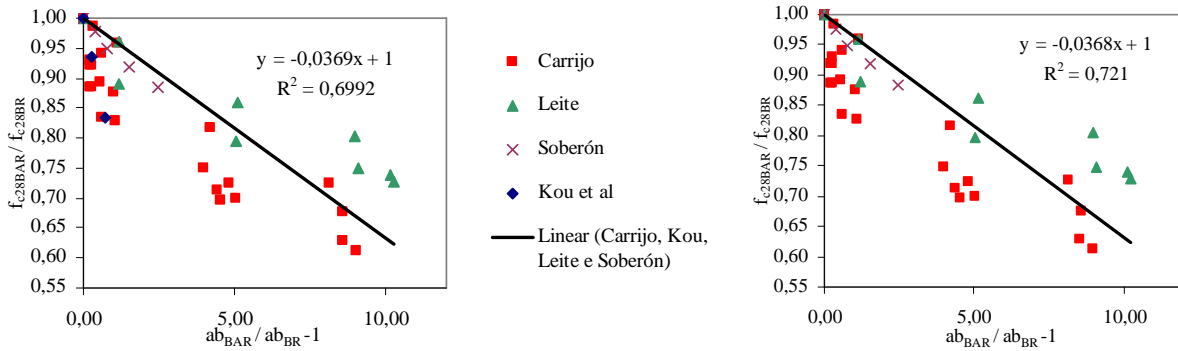


Fig. 4.4 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Na Figura 4.5, representa-se a mesma variação mas para os valores obtidos nos ensaios realizados aos 90 dias. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados não aceitável e aceitável para a sobreposição de todas as campanhas e sem Kou et al (2004), respectivamente.

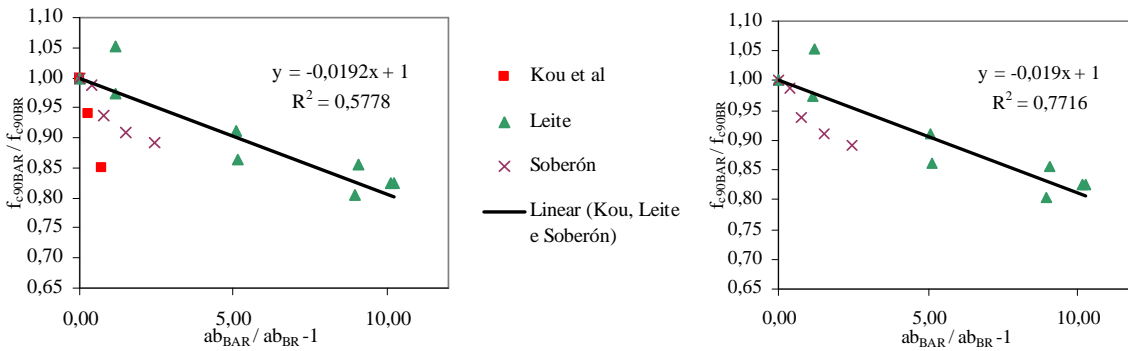


Fig. 4.5 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Na Figura 4.6, representam-se os gráficos resumo para a variação em causa, com a sobreposição dos ensaios aos 28 e 90 dias.

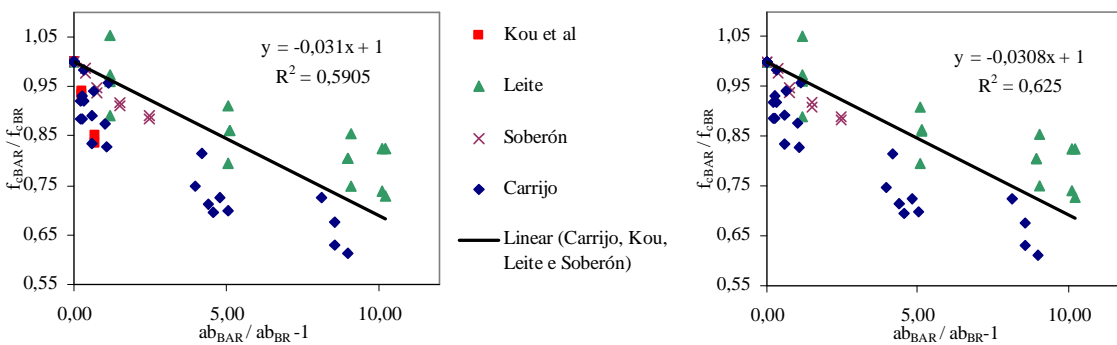


Fig. 4.6 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são, em ambos os casos, considerados não aceitáveis. Obteve-se conclusão semelhante com a variação da relação entre resistências à compressão com a relação entre resistências à compressão do betão aos 7 dias, sendo os resultados da análise isolada das campanhas manifestamente melhores do que os da sobreposição das campanhas.

Na Figura 4.7, representa-se a variação referida para as várias campanhas analisadas. O coeficiente de correlação é considerado não aceitável.

Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados
Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional

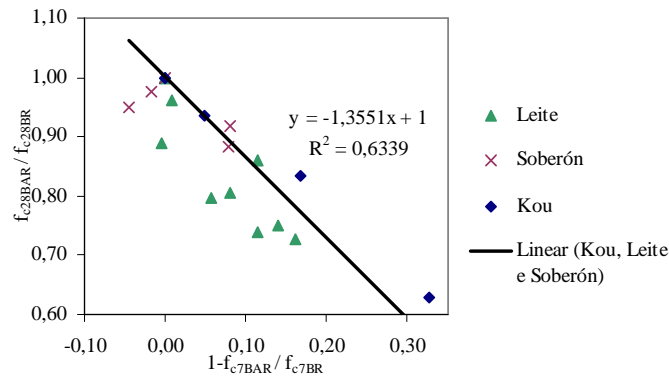


Fig. 4.7 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Leite, Soberón e Kou

Na Figura 4.8, representa-se a mesma variação mas para os valores experimentais obtidos aos 90 dias. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado aceitável.

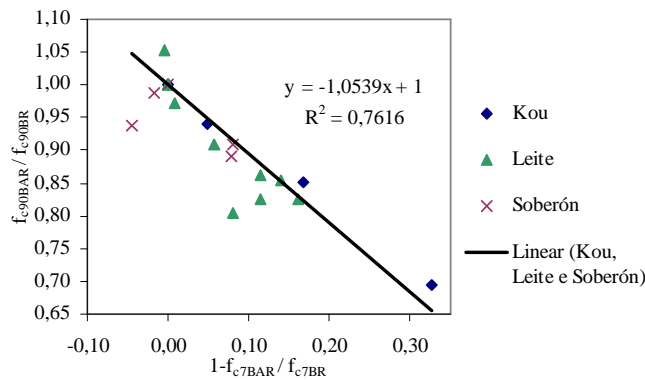


Fig. 4.8 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Leite, Soberón e Kou

Na Figura 4.9, representa-se o gráfico resumo com a sobreposição de valores para a variação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão. O coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável.

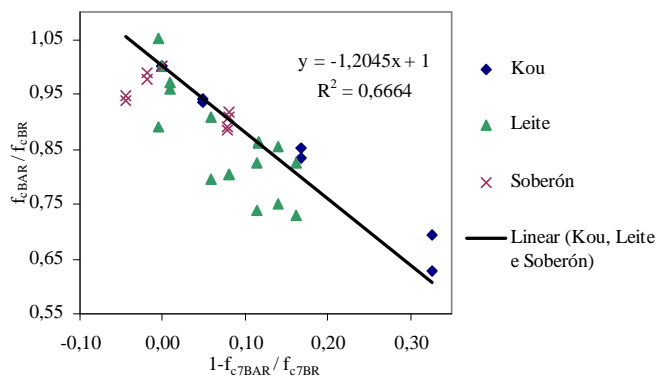


Fig. 4.9 – Resumo da variação da relação entre resistências à compressão aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Leite, Soberón e Kou

Os valores negativos, na relação entre resistências à compressão aos 7 dias, representam os resultados ensaiados em que o valor obtido para os BAR foi superior ao BR. Apesar de não se tratar de um comportamento comum e previsível, optou-se por incluir estes resultados na análise.

Na análise da variação da relação entre módulos de elasticidade e a massa volúmica ponderada dos agregados da mistu-

ra, concluiu-se da existência de uma relação tendencialmente linear, em especial, na sobreposição de valores aos 28 e 90 dias (quando não considerados os valores de Kou et al, pelas razões referidas).

Na Figura 4.10, representa-se a variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias e a massa volúmica ponderada dos agregados da mistura para as várias campanhas e a mesma sobreposição sem os valores experimentais de Leite (2001). Os coeficientes de correlação obtidos são considerados aceitáveis.

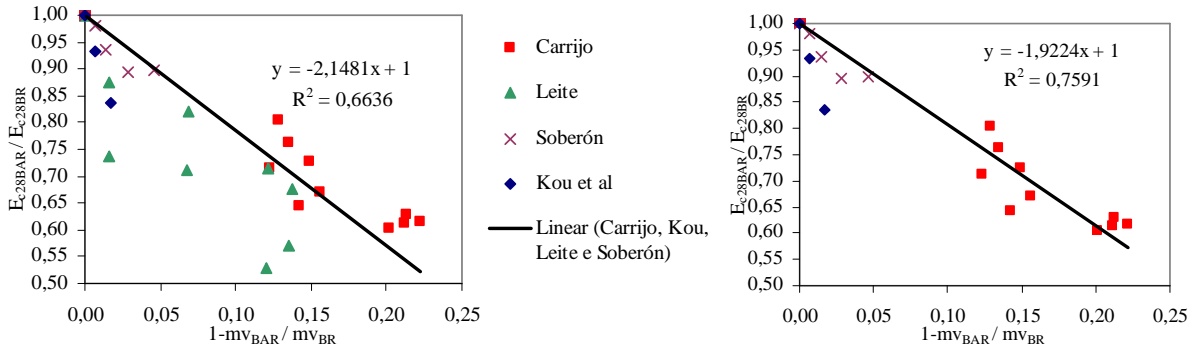


Fig. 4.10 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Kou, Soberón, Carrijo e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)

Na Figura 4.11, representa-se a mesma variação com a sobreposição dos resultados obtidos por Soberón (2002) e Kou et al (2004) aos 90 dias. O coeficiente de correlação obtido é considerado aceitável.

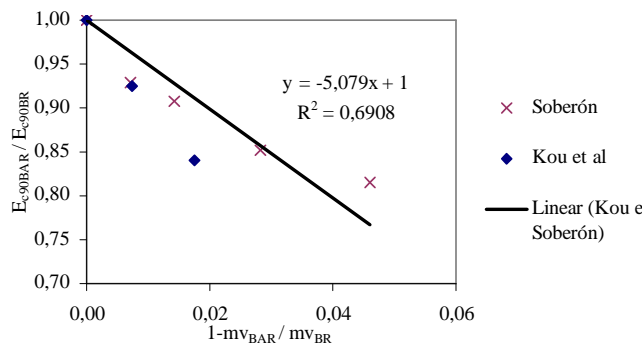


Fig. 4.11 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Kou e Soberón

Na Figura 4.12, representa-se a variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias e a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura para as várias campanhas analisadas.

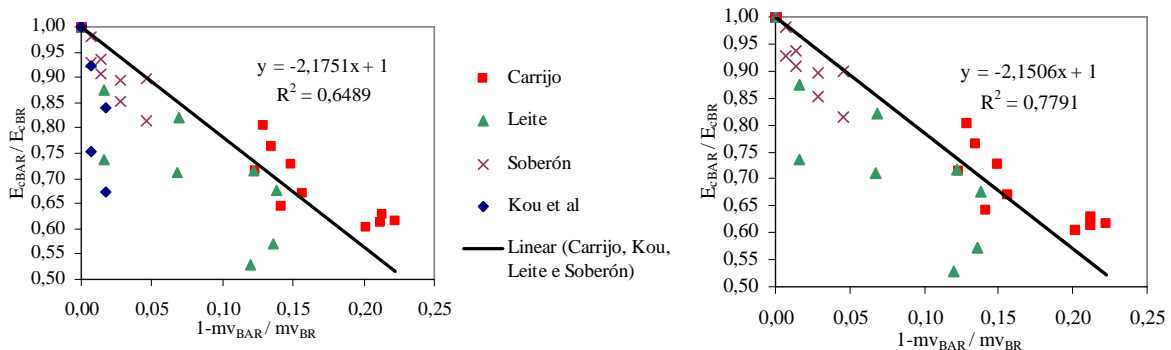


Fig. 4.12 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

No gráfico da direita, os valores de Kou et al (2004) são excluídos pelas razões apresentadas, obtendo-se um coeficiente de correlação de 0,7791, superior ao anterior e também considerado aceitável. Na Figura 4.13, representa-se o resumo

Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias e a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura sem os resultados experimentais de Leite (2001). O valor obtido para o coeficiente de correlação foi de 0,7211, sendo considerado aceitável.

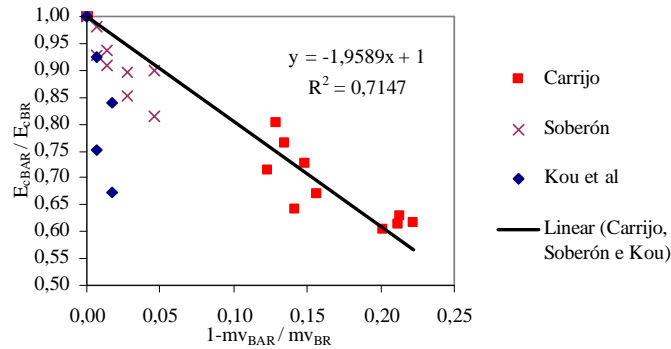


Fig. 4.13 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Soberón e Kou

Verifica-se a mesma tendência na variação com a relação entre absorções de água ponderada dos agregados da mistura. A representação da sobreposição de campanhas sem os resultados de Kou et al (2004) e o respectivo coeficiente de correlação, confirmam uma variação tendencialmente linear das relações. Na Figura 4.14, representa-se a variação referida para os resultados obtidos experimentalmente aos 28 dias para todas as campanhas e sem os valores obtidos por Leite (2001). Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitáveis em ambos os casos.

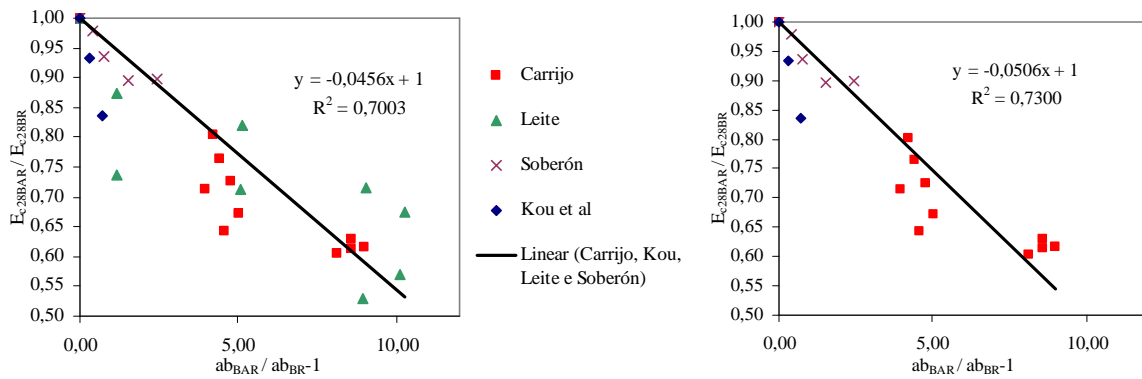


Fig. 4.14 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Kou, Soberón, Carrijo e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)

Na Figura 4.15, representa-se o resumo da variação em análise para os resultados aos 90 dias. O coeficiente de correlação obtido para esta variação é considerado não aceitável.

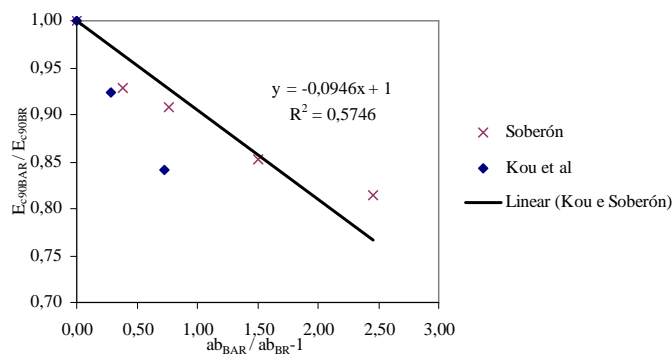


Fig. 4.15 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Kou e Soberón

Na Figura 4.16, representa-se a variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias e a relação entre

absorções de água ponderadas dos agregados da mistura para as várias campanhas analisadas e sem os valores de Kou et al (2004). Na Figura 4.17, representa-se o mesmo resumo mas sem os valores de Leite (2001). Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados aceitáveis e bom para a sobreposição sem os resultados de Kou et al (2004).

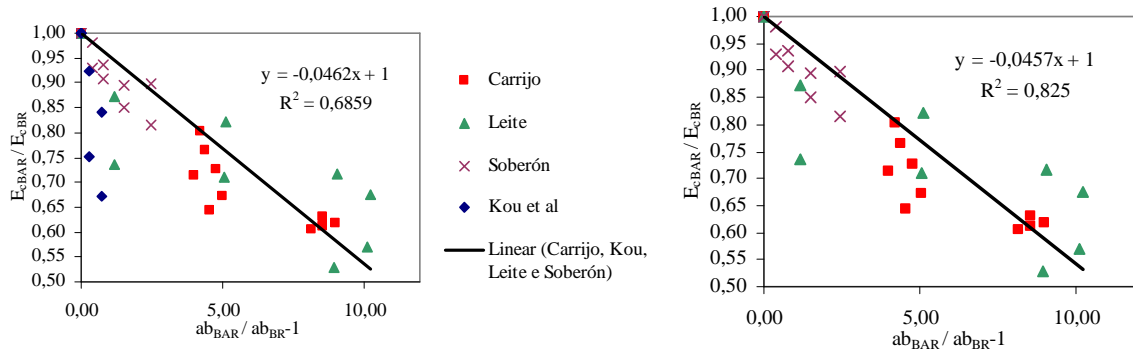


Fig. 4.16 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón, Carrijo e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

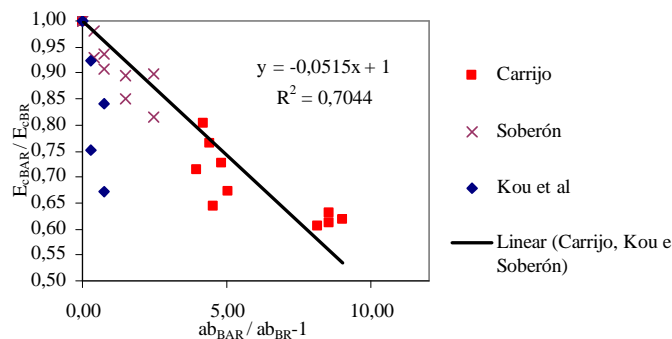


Fig. 4.17 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Carrijo, Soberón e Kou

Na variação com a relação de resistências à compressão aos 7 dias, concluiu-se a inexistência de relação linear, tendo sido obtidos coeficientes de correlação considerados não aceitáveis. Na Figura 4.18, representa-se a variação referida para os ensaios realizados aos 28 dias e os respectivos coeficientes de correlação.

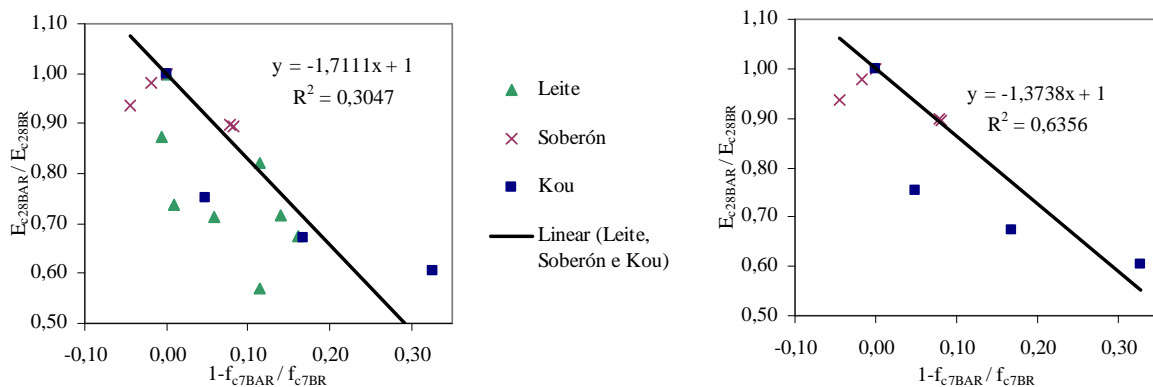


Fig. 4.18 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou, Soberón e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)

O valor obtido para o coeficiente de correlação aos 28 dias, para todas as campanhas, é reduzido, sobretudo pela dispersão de valores introduzida pela campanha de Leite (2001). Se os valores de Leite (2001) fossem excluídos, o coeficiente de correlação seria de 0,6356 (valor muito próximo do considerado aceitável), conforme gráfico apresentado à direita da Figura 4.18. A dispersão referida poderá justificar-se pela inadequação da curva granulométrica dos AR à dos AP utilizados no BR no processo de produção dos BAR. A autora assume esta opção, referindo que a utilização dos AR se

Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional realizou sem qualquer manipulação da granulometria após a sua produção, que é constatável nos valores da composição granulométrica da sua investigação. Existindo o efeito de “filler” pela razão exposta, a relação entre resistências à compressão aos 7 dias será tendencialmente maior, sendo essa a constatação observada nos valores de Leite (2001) no gráfico (à esquerda na Figura 4.18), considerando a inversão de sinal provocada no eixo das abcissas. Na Figura 4.19, representa-se a variação da relação entre módulos de elasticidade e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão, para os resultados obtidos aos 90 dias provenientes das campanhas de Sóberon (2002) e Kou et al (2004). Conforme referido no capítulo 3, Leite (2001) não obteve resultados para o módulo de elasticidade aos 90 dias. O valor obtido para o coeficiente de correlação foi de 0,3026, sendo considerado não aceitável.

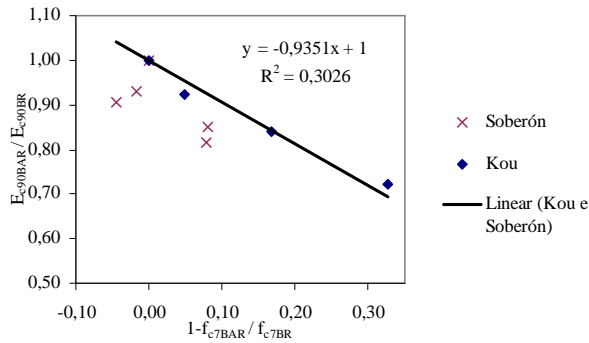


Fig. 4.19 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou e Sóberon

A sobreposição dos valores obtidos aos 28 e 90 dias para as várias campanhas é representada na Figura 4.20.

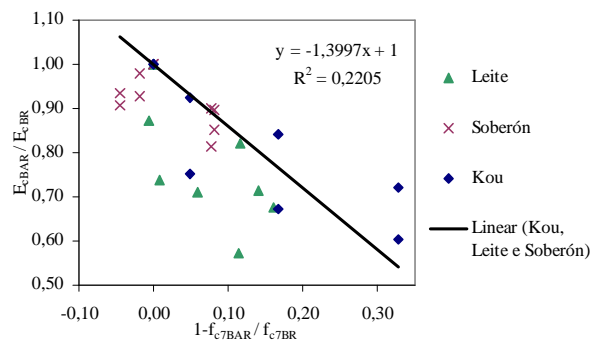


Fig. 4.20 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Leite, Sóberon e Kou

O coeficiente de correlação é muito reduzido, sobretudo pelo acerto de posicionamento da recta de regressão linear. Caso este acerto não fosse realizado, o valor do coeficiente de correlação seria de 0,5161.

A sobreposição de campanhas sem os resultados de Leite (2001) é apresentada na Figura 4.21. O coeficiente de correlação obtido é melhor do que os restantes, mas ainda assim considerado não aceitável.

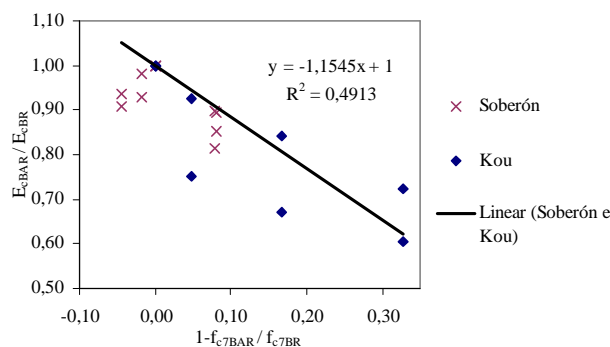


Fig. 4.21 – Resumo da variação da relação entre módulos de elasticidade aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão nas campanhas de Sóberon e Kou

Para a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral e as relações de massa volúmica e absorção de água dos agregados da mistura, os valores dos coeficientes de correlação foram muito baixos e considerados não aceitáveis.

Na Figura 4.22, representa-se a variação referida para os valores experimentais obtidos aos 28 dias. O gráfico com a sobreposição de campanhas excluindo os valores de Kou et al (2004) é apresentado à direita.

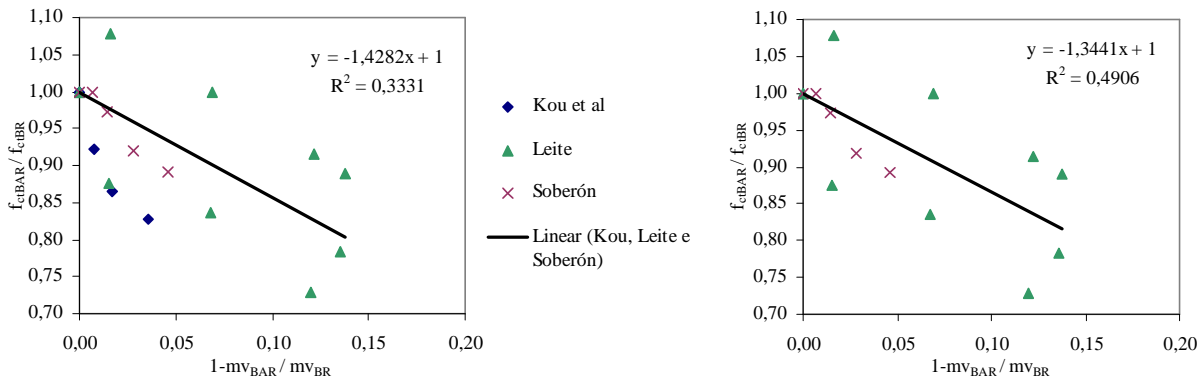


Fig. 4.22 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Na Figura 4.23, representa-se a mesma variação para os resultados experimentais aos 90 dias, fornecidos pelas campanhas de Soberón (2002) e Kou et al (2004). Os coeficientes de correlação obtidos foram considerados não aceitável e bom, para a variação dos valores isolados de Soberón (2002).

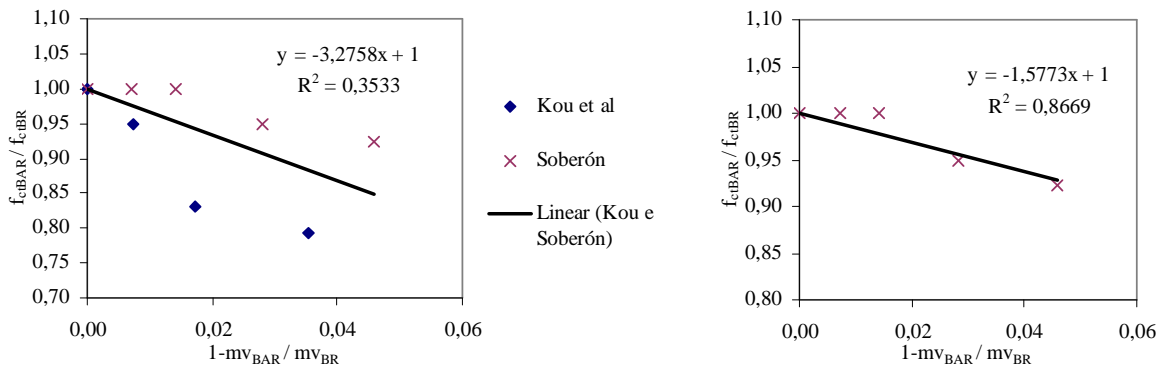


Fig. 4.23 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Na Figura 4.24, representa-se a variação da relação entre a resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias e a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura. Novamente, apresenta-se também a mesma variação sem os valores de Kou et al (2004).

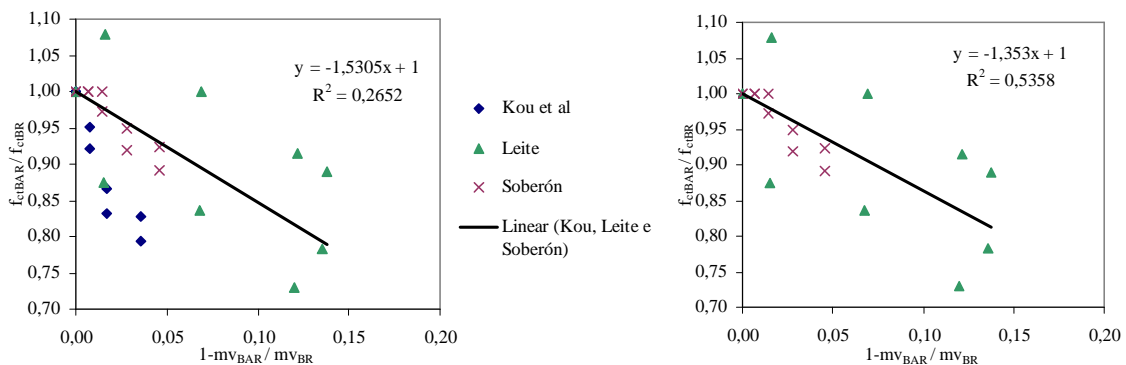


Fig. 4.24 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias e a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

A variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura é representada na Figura 4.25. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são semelhantes aos obtidos para a relação entre massa volúmicas dos agregados da mistura, sendo ambos considerados não aceitáveis.

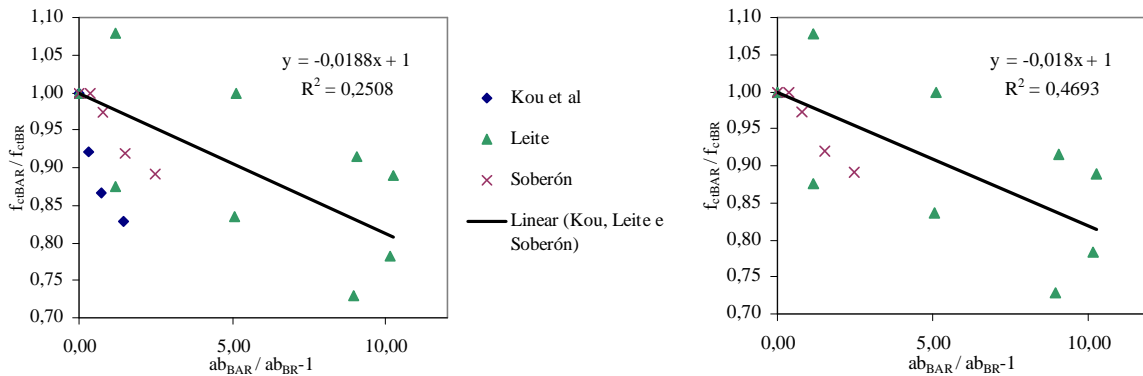


Fig. 4.25 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Na Figura 4.26, representa-se a mesma variação com os resultados experimentais aos 90 dias de idade. O coeficiente de correlação para a sobreposição de campanhas de Soberón (2002) e Kou et al (2004) é considerado não aceitável e, apenas para os resultados de Soberón (2002), é considerado bom.

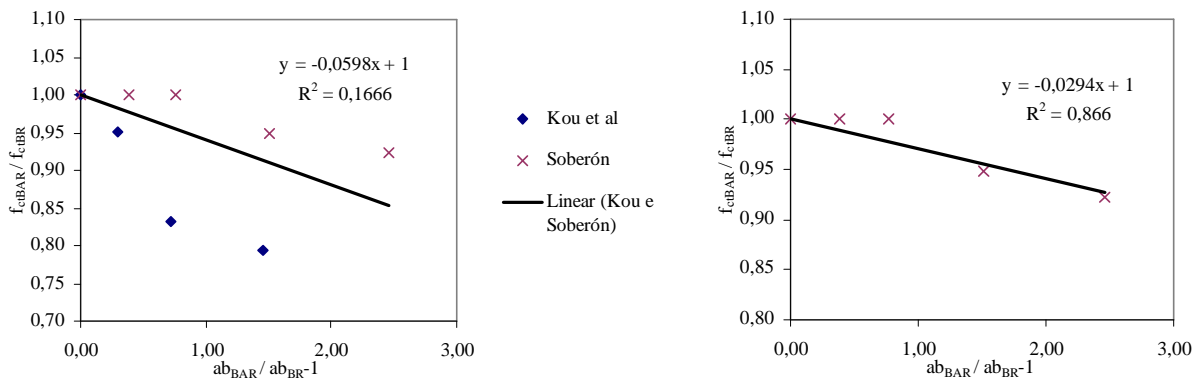


Fig. 4.26 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 90 dias e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

A sobreposição dos valores aos 28 e 90 dias é representada na Figura 4.27. Em ambos os gráficos, o coeficiente de correlação é considerado não aceitável.

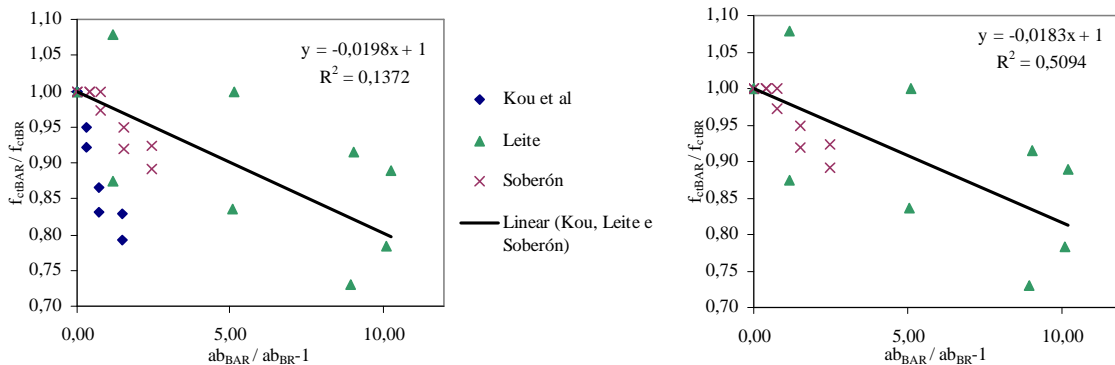


Fig. 4.27 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias e a relação entre absorções de água dos agregados da mistura nas campanhas de Leite, Soberón e Kou (à esquerda) e sem Kou (à direita)

Capítulo 4 – Conclusões

Na Figura 4.28, representa-se a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências aos 7 dias do betão.

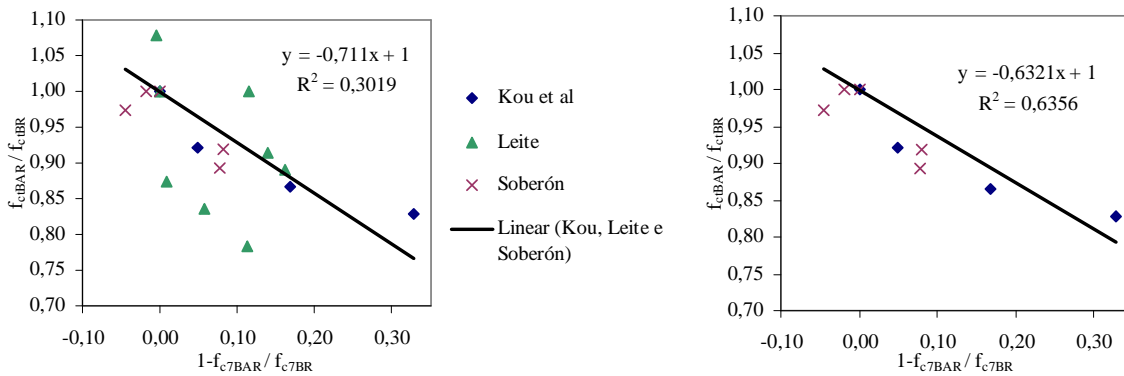


Fig. 4.28 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 dias com a relação entre resistências aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou, Soberón e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)

Conforme justificado, a campanha de Leite (2001) é composta por valores dispersos relativamente às outras campanhas, pelo que será eliminada em alguns dos gráficos. O valor obtido para o coeficiente de correlação no gráfico sem os resultados de Leite (2001) aproxima-se da qualificação aceitável.

Na Figura 4.29, representa-se a mesma variação para os valores experimentais obtidos aos 90 dias nas campanhas de Soberón (2002) e Kou et al (2004). O coeficiente de correlação obtido é considerado bom para estas duas campanhas.

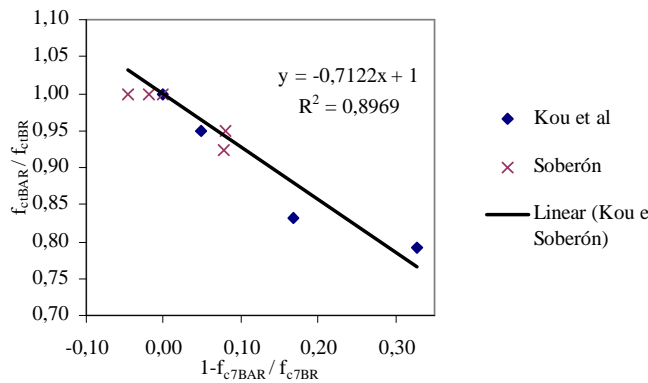


Fig. 4.29 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 90 dias com a relação entre resistências aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou et al e Soberón

Na Figura 4.30, representa-se a variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias e a relação entre resistências à compressão aos 7 dias. De novo, e pelas razões expostas, apresenta-se o gráfico da variação sem os valores de Leite, verificando-se a existência de relação tendencialmente linear.

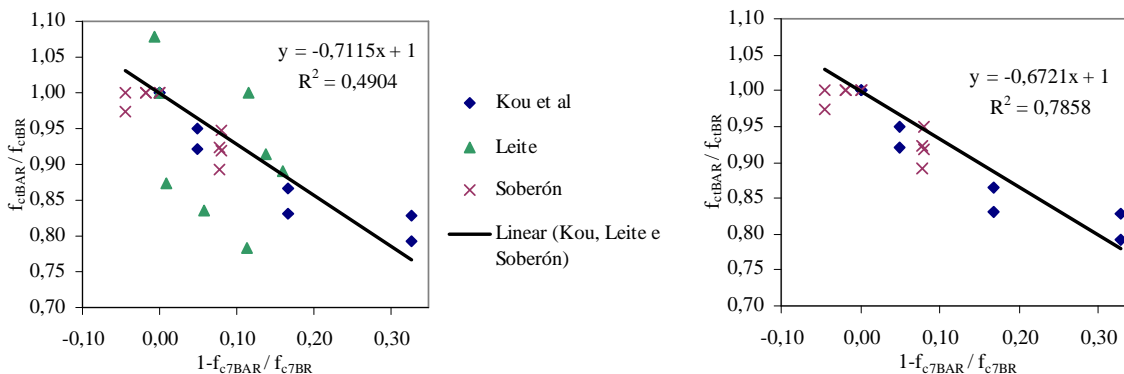


Fig. 4.30 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias com a relação entre resistências aos 7 dias do betão nas campanhas de Kou, Soberón e Leite (à esquerda) e sem Leite (à direita)

Na variação da relação entre resistências à tracção por flexão e as 3 relações descritas, foi analisada apenas uma campanha experimental, tendo os resultados indicado uma relação tendencialmente linear. Este é um dos exemplos em como a análise realizada individualmente a cada campanha proporciona bons resultados. Na Figura 4.31, representam-se os gráficos com as variações referidas para a campanha de Leite (2001), sendo os coeficientes de correlação considerados bons.

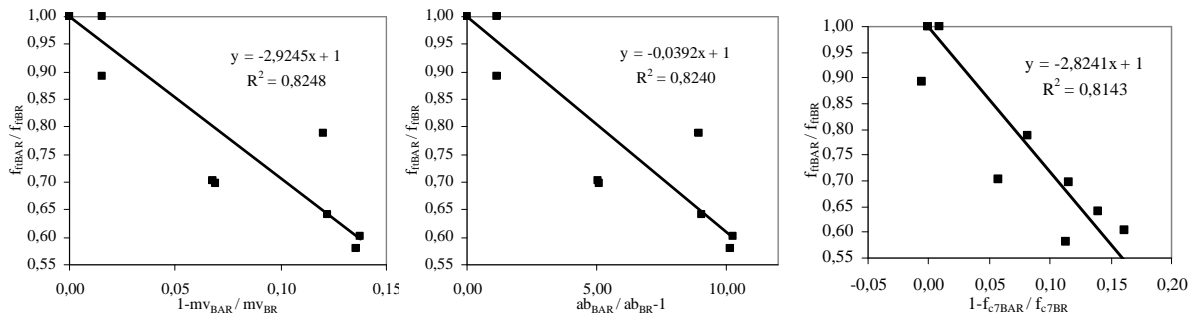


Fig. 4.31 – Resumo da variação da relação entre resistências à tracção por flexão aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Leite

Na resistência à penetração de cloretos, a variação entre a relação desta propriedade nos BAR com o BR, e as várias relações (de massas volúmicas e de absorções de água ponderadas dos agregados da mistura e de resistências à compressão aos 7 dias) revelou um comportamento tendencialmente linear, com coeficientes de correlação considerados bons, sendo esta análise restringida a uma campanha experimental e à exclusão de resultados de ensaios a betões com cinzas volantes (que se constatou provocarem uma elevada dispersão de valores, conforme referido).

Na Figura 4.32, representam-se as variações referidas para ensaios realizados à penetração de cloretos aos 28 dias através da medição da carga eléctrica na campanha de Kou et al (2004). Os coeficientes de correlação obtidos são considerados bons para todas as propriedades, confirmando um comportamento tendencialmente linear.

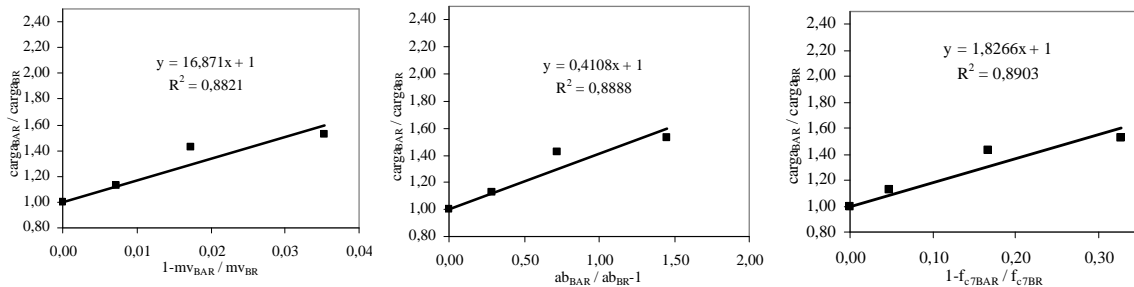


Fig. 4.32 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas aos 28 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Kou

A representação das variações em análise para os resultados experimentais aos 90 dias, realiza-se na Figura 4.33.

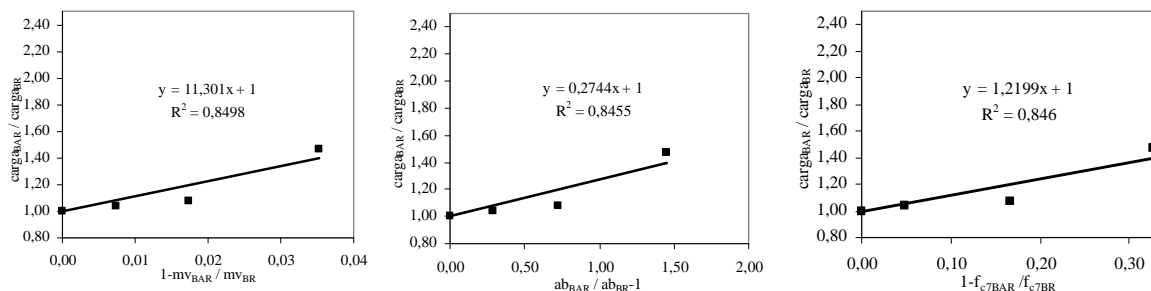


Fig. 4.33 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Kou

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são, novamente, considerados bons, indiciando uma relação tendencialmente linear da variação.

Na Figura 4.34, representam-se as variações referidas para ensaios realizados à penetração de cloretos aos 28 e 90 dias.

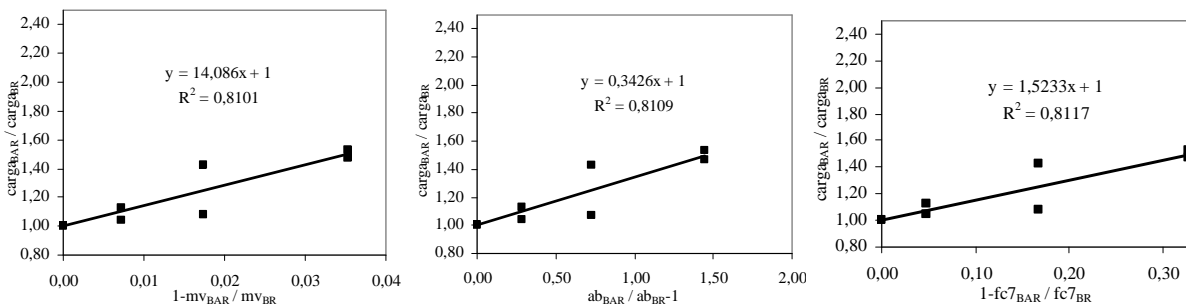


Fig. 4.34 – Resumo da variação da relação entre cargas eléctricas aos 28 e 90 dias com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Kou

A variação da relação entre retracções aos 28 e 90 dias e as relações em análise indicou valores para os coeficientes de correlação muito variados, sendo na maioria não aceitáveis, sobretudo na sobreposição de campanhas. Na campanha de Cervantes et al (2007), obtiveram-se ensaios aos 28 dias e, na campanha de Soberón (2002), aos 90 dias. Na Figura 4.35, representam-se as variações da relação entre retracções aos 28 (à esquerda) e aos 90 dias (à direita) e a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são considerados não aceitável e aceitável para os resultados de Cervantes et al (2007) e Soberón (2002), respectivamente.

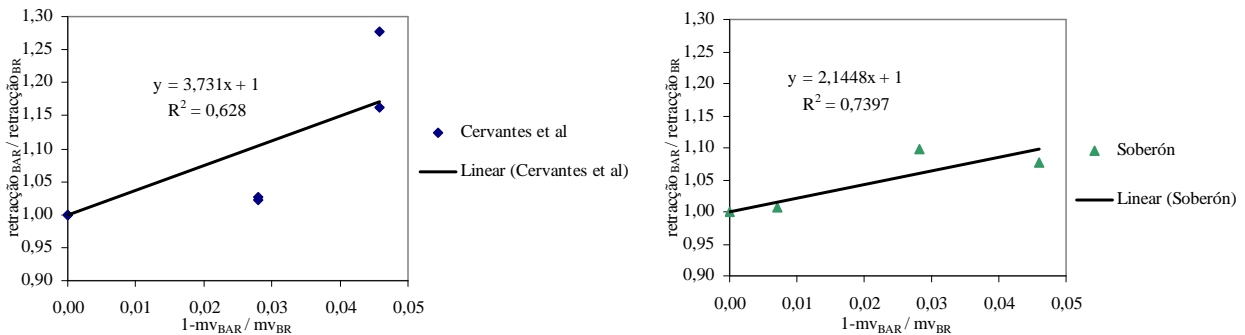


Fig. 4.35 –Variação da relação entre retracções aos 28 (à esquerda) e aos 90 dias (à direita) com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Cervantes e Soberón

Na Figura 4.36, representa-se a sobreposição dos gráficos da Figura 4.35 com a variação em causa para os resultados obtidos aos 28 e 90 dias, nas duas campanhas experimentais em análise. O coeficiente de correlação obtido neste resumo é considerado não aceitável.

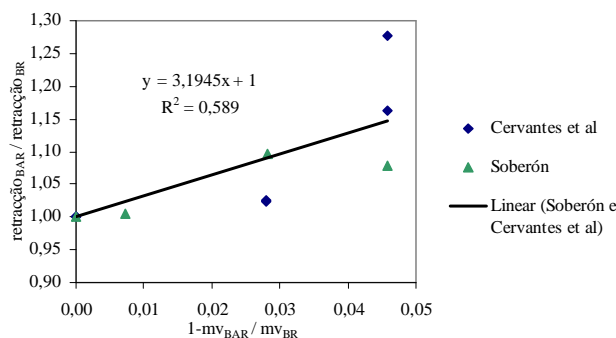


Fig. 4.36 –Variação da relação entre retracções aos 28 e aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Cervantes e Soberón

Na Figura 4.37, representa-se a mesma variação para a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação são, por coincidência, iguais e considerados aceitáveis.

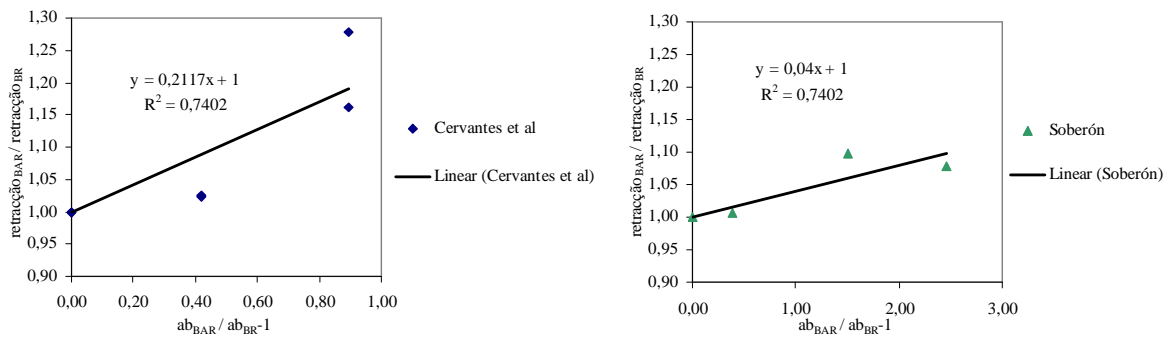


Fig. 4.37 –Variação da relação entre retracções aos 28 (à esquerda) e aos 90 dias (à direita) com a relação entre absorções de água ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Cervantes e Soberón

O gráfico resumo da variação em análise, para os resultados aos 28 e 90 dias, é apresentado na Figura 4.38. O coeficiente de correlação obtido é muito reduzido, e considerado não aceitável, reflectindo uma elevada dispersão de valores, em especial pelas reduzidas relações entra absorções de água ponderadas dos agregados da mistura na campanha de Cervantes et al (2007).

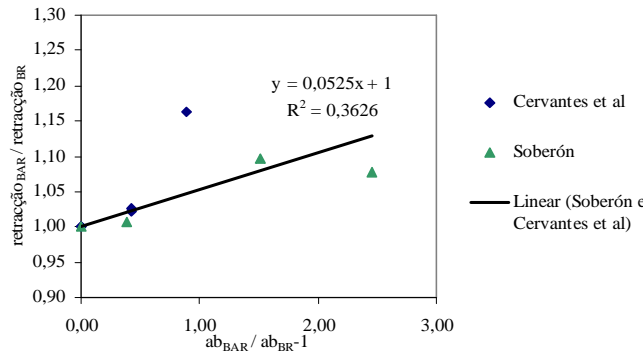


Fig. 4.38 –Variação da relação entre retracções aos 28 e aos 90 dias com a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura nas campanhas de Cervantes e Soberón

Conforme referido no ponto 3.4.6, os valores obtidos por Cervantes et al (2007) para a resistência à compressão aos 7 dias não foram considerados consistentes, pelo que na Figura 4.39, representa-se a apenas a variação da relação entre retracções aos 90 dias. O valor obtido para o coeficiente de correlação é considerado bom.

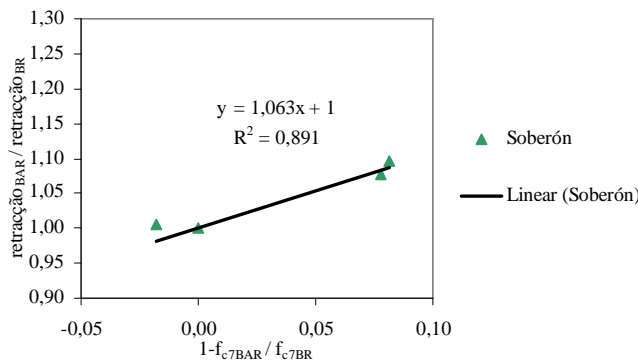


Fig. 4.39 –Variação da relação entre retracções aos 90 dias com a relação entre resistências à compressão aos 7 dias do betão na campanhas de Soberón

A variação da relação entre absorções de águas aos 28 dias, com os resultados de apenas uma campanha, e as relações entre massas volúmicas e absorções de água dos agregados da mistura revelou coeficientes de correlação considerados muito bons. No caso particular da variação com a relação entre as resistências à compressão do betão aos 7 dias, a recta de regressão linear não foi corrigida para passar no ponto correspondente ao BR. Este procedimento excepcional, con-

trário à metodologia seguida, justifica-se pelo facto de existirem valores da relação referida superiores a 1 (provavelmente correspondentes a erros experimentais) e que, no caso da “correção” da recta de regressão linear, conduzem a um coeficiente de correlação muito reduzido e sem contrapartida física. Na Figura 4.40, representam-se as variações referidas, resultado da análise aos valores experimentais de Soberón (2002).

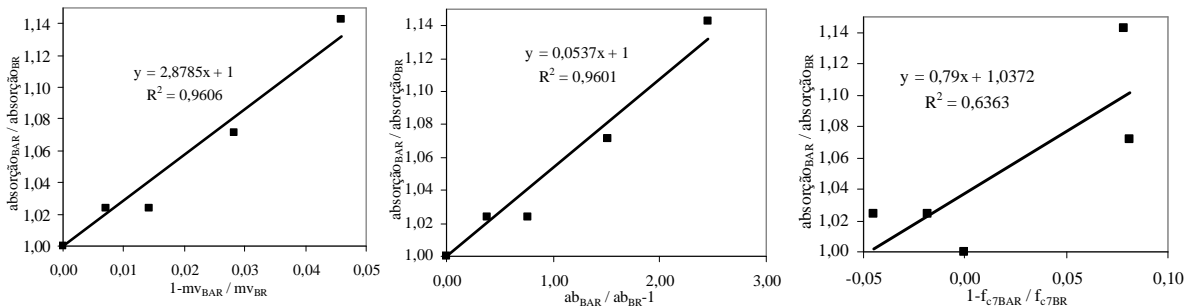


Fig. 4.40 – Resumo da variação da relação entre absorções de água com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Soberón

A campanha utilizada para análise da variação da relação entre fluências aos 90 dias e as relações mencionadas revelou a existência de comportamento linear, sendo os coeficientes de correlação elevados e considerados muito bons e aceitável para a variação com a relação entre massas volúmicas e absorções de água e as resistências à compressão do betão aos 7 dias, respectivamente. Na Figura 4.41, representam-se as variações referidas para os valores experimentais da campanha de Soberón (2002). Também na análise da variação desta propriedade com a relação entre as resistências à compressão do betão aos 7 dias e pelas mesmas razões, a recta de regressão linear não foi corrigida para passar no ponto correspondente ao BR pois, caso contrário, o valor obtido para o coeficiente de correlação seria negativo.

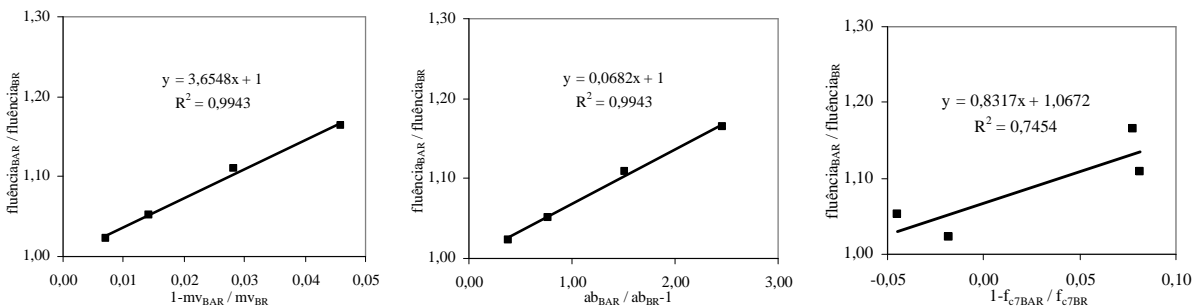


Fig. 4.41 – Resumo da variação da relação entre fluências com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) dos agregados e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Soberón

A resistência à carbonatação foi analisada apenas numa campanha experimental, que conduziu a coeficientes de correlação aceitáveis e bom para a variação entre as relações analisadas. Na Figura 4.42, representam-se as 3 variações referidas resultantes do tratamento de dados experimentais de Katz (2003).

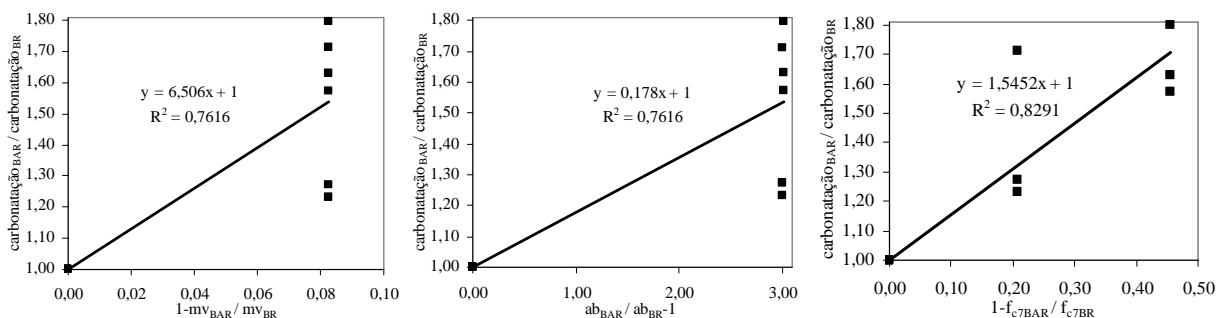


Fig. 4.42 – Resumo da variação da relação entre carbonatações com a relação entre massas volúmicas dos agregados da mistura (à esquerda), absorções de água dos agregados da mistura (ao centro) e resistências à compressão aos 7 dias do betão (à direita) na campanha de Katz

Em termos gerais, a relação entre massas volúmicas ponderadas dos agregados da mistura revelou maior linearidade na variação da relação das propriedades analisadas, do que a relação entre absorções de água ou a resistência à compressão aos 7 dias. A resistência à compressão aos 7 dias revelou-se a propriedade com piores resultados, contrariamente ao que poderia ser expectável inicialmente, sendo uma propriedade obtida no estado endurecido e, portanto, relacionando-se com as restantes. Este comportamento justificar-se-á com as diferenças entre condições de cura das várias campanhas e com a diferença entre as curvas de ganho de resistência dos BR e dos BAR, sendo um processo mais lento nos segundos pelas razões expostas no capítulo 3.

Entre as várias propriedades analisadas do betão no estado endurecido, destacam-se os resultados menos positivos obtidos nas relações com a resistência à tracção por compressão diametral. Este resultado poderá justificar-se com a maior variabilidade desta propriedade relativamente a outras (resistência à compressão axial, por exemplo), agravado pela sobreposição de várias campanhas.

Esta análise, apesar de condicionada pelos factores de variabilidade expostos no início do presente capítulo, permite validar uma metodologia de antecipação de comportamento de algumas propriedades do betão no estado fresco e endurecido após a definição da taxa de substituição de AP por AR. A metodologia em causa baseia-se na análise de propriedades de fácil e precoce aferição (massa volúmica, absorção de água e resistência à compressão aos 7 dias) e respectiva projecção de resultados nas propriedades do betão no estado endurecido. Outra enorme vantagem da aplicação deste procedimento relaciona-se com o custo da sua aplicação. É possível implementar este processo de uma forma extremamente económica, visto que os ensaios propostos aos AR e à resistência à compressão aos 7 dias são relativamente simples de executar e podem contribuir para uma enorme redução de custos para os intervenientes no processo.

A massificação da utilização dos BAR deverá sustentar-se no princípio de que estes betões têm um desempenho, na maioria dos casos, inferior aos betões tradicionais, mas que a variabilidade das propriedades dos primeiros é semelhante à dos segundos. Assim, será “apenas” necessário conhecer o decréscimo de desempenho do BAR relativamente ao BR respectivo quando utilizada uma determinada percentagem de AR e de AP com as propriedades conhecidas.

No Quadro 4.1, representam-se os coeficientes de correlação para a variação das relações das várias propriedades do betão no estado endurecido e as relações das massas volúmicas e absorções de água ponderadas da mistura dos agregados e das resistências à compressão aos 7 dias. Representam-se também os declives das rectas de correlação. Neste quadro resumo, foram adoptados alguns critérios que condicionaram a análise da presente dissertação, nomeadamente:

- na campanha de Kou et al (2004), foram utilizados apenas os resultados com 0% de cinzas volantes e obtidos após cura por imersão;
- na campanha de Carrijo (2005), foram utilizados os dados referentes aos AR classificados como “cinza” e “vermelho” e com massa volúmica inferior a $2,2 \text{ g/cm}^3$;
- na campanha de Leite (2001), foram considerados os resultados obtidos por via experimental directa e por estimativa probabilística;
- as rectas de regressão linear, obtidas automaticamente através da folha de cálculo utilizada, foram condicionadas à passagem pelo ponto correspondente aos resultados teóricos dos BR.

Os valores não mencionados no Quadro 4.1 correspondem ao processo de eliminação de algumas campanhas, de acordo com os critérios expostos no presente capítulo, no resumo e sobreposição das mesmas.

A classificação dos coeficientes de correlação foi identificada por cores para uma leitura facilitada do quadro. Este quadro representa um resumo das conclusões expostas.

Quadro 4.1 - Resumo de correlações das várias propriedades com massas volúmicas e absorções de água dos agregados da mistura e resistência à compressão aos 7 dias do betão

Propriedade	Campanhas utilizadas	Massa volúmica		Absorção de água		f_{c7d}^*	
		R^2	declive	R^2	declive	R^2	declive
f_{c28}	Carrijo/ Kou/ Leite /Soberón	0,8697	1,8354	0,6992	-0,0369	0,6339	1,3551
	Carrijo/ Leite /Soberón	0,8927	1,8284	0,7210	-0,0368	-	-
f_{c90}	Kou/ Leite/ Soberón	0,6514	1,4486	0,5778	-0,0192	0,7616	1,0539
	Leite/ Soberón	0,8152	1,4169	0,7716	-0,0190	-	-
f_c	Carrijo/ Kou/ Leite/ Soberón	0,8370	1,7693	0,5905	-0,0310	0,6664	1,2045
	Carrijo/ Leite/ Soberón	0,8734	1,7583	0,6250	-0,0308	-	-
E_{c28}	Carrijo/ Kou/ Leite/ Soberón	0,6636	2,1481	0,7003	-0,0456	0,3047	1,7111
	Carrijo/ Kou/ Soberón	0,7591	1,9224	0,7300	-0,0506	0,6356	1,3738
E_{c90}	Kou/ Soberón	0,6908	5,0790	0,5746	-0,0946	0,3026	0,9351
E_c	Carrijo/ Kou/ Leite/ Soberón	0,6489	2,1751	0,6859	-0,0462	0,2205	1,3997
	Carrijo/ Leite/ Soberón	0,7791	2,1506	0,8250	-0,0457	-	-
	Carrijo/ Kou/ Soberón	0,7147	1,9589	0,7044	-0,0515	0,4913	1,1545
f_{ct28}	Leite/ Soberón /Kou	0,3331	1,4282	0,2508	-0,0188	0,3019	0,7110
	Leite/ Soberón	0,4906	1,3441	0,4693	-0,0180	-	-
	Soberón /Kou	-	-	-	-	0,6356	0,6321
f_{ct90}	Soberón/ Kou	0,3533	3,2758	0,1666	-0,0598	0,8969	0,7122
	Soberón	0,8669	1,5773	0,8660	-0,0294	-	-
f_{ct}	Leite/ Soberón /Kou	0,2652	1,5305	0,1372	-0,0198	0,4904	0,7115
	Leite/ Soberón	0,5358	1,3530	0,5094	-0,0183	-	-
	Soberón /Kou	-	-	-	-	0,7858	0,6721
f_{ft}	Leite	0,8248	2,9245	0,8240	-0,0392	0,8143	2,8241
Cloretos ₂₈	Kou	0,8821	-16,8710	0,8888	0,4108	0,8903	-1,8266
Cloretos ₉₀	Kou	0,8498	-11,3010	0,8455	0,2744	0,8460	-1,2199
Cloretos	Kou	0,8101	-14,086	0,8109	0,3426	0,8117	-1,5233
Retracção ₂₈	Cervantes	0,6280	-3,7310	0,7402	0,2117	-	-
Retracção ₉₀	Soberón	0,7397	-2,1448	0,7402	0,0400	0,8910	-1,0630
Retracção	Soberón e Cervantes	0,5890	-3,1945	0,3626	0,0525	-	-
Absorção ₂₈	Soberón	0,9606	-2,8785	0,9601	0,0537	0,6363	-0,7900
Fluência ₉₀	Soberón	0,9943	-3,6548	0,9943	0,0682	0,7454	-0,8317
Carbonatação ₇	Katz	0,7616	-6,506	0,7616	0,1780	0,8291	-1,5452

	coeficiente de correlação aceitável ($0,65 \leq R^2 < 0,80$)
	coeficiente de correlação bom ($0,80 \leq R^2 < 0,95$)
	coeficiente de correlação muito bom ($R^2 \geq 0,95$)

* excluída a sobreposição com Carrijo (2005) por inexistência de dados

- na campanha de Kou et al (2004), foram utilizados apenas os resultados com 0% de cinzas volantes e obtidos após cura por imersão.

- na campanha de Carrijo (2005), foram utilizados os dados referentes aos AR classificados como “cinza” e “vermelho” e com massa volúmica inferior a 2,2 g/cm³.

- na campanha de Leite (2001), foram considerados os resultados obtidos por via experimental directa e por estimativa probabilística.

- as rectas de regressão linear, obtidas automaticamente através da folha de cálculo utilizada, foram condicionadas à passagem pelo ponto correspondente aos resultados teóricos dos BR.

4.3 Desenvolvimentos futuros

A concretização do presente estudo permitiu perceber o nível de desenvolvimento de campanhas experimentais já realizadas nesta área. Simultaneamente, contribui para projectar futuros trabalhos que englobem a temática da correlação das propriedades dos BAR com as propriedades dos AR, nomeadamente a massa volúmica e a absorção de água dos agregados da mistura e a resistência à compressão aos 7 dias do betão, tornando os métodos de previsão de comportamento dessas propriedades dos BAR mais expeditos. Existem várias investigações já desenvolvidas no Instituto Superior Técnico nesta área que, por seguirem procedimentos científicos rigorosos e, normalmente, semelhantes entre as várias campanhas, permitem uma utilização dos resultados obtidos com grande clareza e eficácia. Entre as investigações referidas, nomeiam-se as seguintes:

- “Betões estruturais com incorporação de agregados reciclados de betão e cerâmicos com reboco” realizada por Marco Gomes;
- “Reutilização de lamas de tratamento de rochas ornamentais em betões” realizada por Nuno Almeida;
- “Betão com agregados grossos de betão e recurso a adjuvantes, campanha experimental realizada no Instituto Superior Técnico” realizada por Daniel Matias;
- “Incorporação de resíduos de barro vermelho em argamassas cimentícias” realizada por João Silva;
- “Análise do desempenho de betões obtidos a partir de inertes reciclados provenientes de resíduos de construção” realizada por Ana Gonçalves;
- “Utilização de agregados grossos cerâmicos na produção de betão” realizada por Ana Pereira Rosa;

Sendo a presente dissertação limitada, sugere-se um aprofundamento do estudo aqui encetado, através da análise de outras campanhas experimentais de forma a alcançar uma maior validade estatística. O prosseguimento deste estudo deverá também aprofundar as propriedades relacionadas com a durabilidade do betão, nomeadamente a retracção, a fluência, a carbonatação, a penetração de cloretos e a absorção de água, visto que foram propriedades pouco desenvolvidas na presente dissertação. A aplicação deste conceito às argamassas com AR poderá também ser um campo de estudo a desenvolver no futuro. A exploração de uma metodologia capaz de envolver as diversas variáveis, através de uma correlação múltipla entre as várias correlações obtidas, será uma temática interessante como desenvolvimento futuro da tese aqui exposta.

A pesquisa realizada para esta dissertação permitiu também perceber que a investigação experimental, na área da aplicação dos AR no sector da construção, poderá aprofundar os seguintes temas:

- análise da influência do tipo de cura no desempenho final dos BAR, tanto ao nível das propriedades mecânicas como de durabilidade;
- análise do efeito de “filler” no desempenho dos BAR produzidos com AFR;
- definição de processos expeditos de análise da massa volúmica e absorção de água dos AR e de separação destes por categorias daquelas propriedades;
- produção de betões de elevado desempenho com recurso a AR, definindo intervalos de selecção da massa volúmica e absorção de água dos AR;
- análise aprofundada da correlação das propriedades de durabilidade dos BAR, produzidos apenas com AR cerâmicos, com a massa volúmica e absorção de água ponderada desses agregados;
- análise do comportamento mecânico de elementos estruturais com BAR (lajes, vigas, pilares, muros de suporte);
- produção de betões auto-compactáveis com AR.

BIBLIOGRAFIA

- Almeida, N., “Reutilização de lamas de tratamento de rochas ornamentais em betões”, Tese Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.
- Ângulo, S., “Produção de concretos de agregados reciclados”, Dissertação de conclusão de curso em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 1998.
- Ângulo, S., “Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- Azzouz, L., Kenai, S., Debied, F., “Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled aggregates”, International Symposium “Use of recycled concrete aggregate”, University of Dundee, Algeria, 1998.
- Barra, M., Vázquez, E., “Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation”, International Symposium “Use of recycled concrete aggregate”, University of Dundee, London, 1998.
- Brito, J. de, “Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões”, Lição de síntese para provas de agregação, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.
- Brito, J. de, “A Evolução da Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição na Europa”, 2º Workshop Construlink / Tektónica “Construção e Ambiente”, Lisboa, 2004.
- Brito, J. de; Pereira, A.; Correia, J., “Mechanical Behaviour of Non-Structural Concrete Made with Recycled Ceramic Aggregates”, Cement and Concrete Composites, Elsevier, UK.
- Brito, J. de; Santos, R.; Gonçalves, A., “Recycled Aggregates in Concrete Production”, Magazine of Concrete Research, London.
- Buttler, A., “Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados”, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2003.
- Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, R., “Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete”, Materials and structures, vol. 35, september-october, pp. 504-509, 2002.
- Carrijo, P., “Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto”, Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- Cervantes, V., Roesler, J., Bordelon, A., “Fracture and drying shrinkage properties of concrete containing recycled concrete aggregate”, Technical note CEAT, University of Illinois, 2007.
- Chen, H., Yen, T., Chen, K., “Use of building rubles as recycled aggregates”, Cement and concrete research n.º 33, pp.125-132, Taiwan, 2003.
- Corinaldesi, V. “Influence of recycled aggregate on the concrete performance”, Training course on “tecnhology road mapping for building materials in developing countries and promotion of related projects”, Itália, 2003.
- Correia, J.; Brito, J. de; Pereira, A., “Effects on Concrete Durability of Using Recycled Ceramic Aggregates”, Materials and Structures, RILEM, Paris.
- Ettxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., Hendriks, F., “The role and influence of recycled aggregate in recycled aggregate concrete”, Conferência Rilem de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2004.
- Ettxeberria, M., Vázquez, E., Marí, “Recycled concrete aggregate as a structural material”, Materials and structures DOI 10.1617/s11527-006-9161-5, 2006.
- Evangelista, L., “Betões executados com agregados finos reciclados de betão”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- Fraaij, A. L., Pietersen, H. S., de Vries, J., “Performance of concrete with recycled agregates”, Sustainable concrete construction - proceedings of the international conference of Dundee, pp.187-198, Delft, 2002.
- Gomes, M., “Betões estruturais com incorporação de agregados reciclados de betão e cerâmicos com reboco”; Tese Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.
- Gonçalves, A., “Análise do desempenho de betões obtidos a partir de inertes reciclados provenientes de resíduos de construção”, Tese Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2001.

- Gutiérrez, P. A., de Juan, M. S., "Influence of recycled aggregate quality on concrete properties", CEDEX, Conferência Rilem de Barcelona, 2004.
- Katz, A. "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and concrete research*, n.º 33, pp. 703-711, Israel, 2003.
- Khatib, J. M., "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", *Cement and concrete research*, disponível em www.sciencedirect.com, 2004.
- Kimura, Y., Imamoto, K., Nagayama, M., Tamura, H., "High quality recycled aggregate processed by decompression and rapid release", <http://www2.ashitech.ac.jp/arch/imamoto/Kimura.pdf>
- Knights, J., "Relative performance of high quality concretes containing recycled aggregates and their use in construction", International Symposium "Use of recycled concrete aggregate", University of Dundee, London, 1998.
- Kou, S. C., Poon, C. S., Chan, D., "Properties of steam cured recycled aggregate fly ash concrete", Conferência de Barcelona, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 2004.
- Larrañaga, M. E., "Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete", Tese de Doutoramento, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2004.
- Latterza, L., Machado, E., "Concreto com agregado graúdo reciclado: propriedades no estado fresco e endurecido e aplicação em pré-moldados leves", *Cadernos de engenharia e estruturas*, n.º 21, pp. 27-58, 2003.
- Leite, M., "Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- Levy, S., "Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2001.
- Levy, S. M., Helene, P., "Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development", *Cement and concrete research*, disponível em www.sciencedirect.com, 2004.
- Limbachiya, M.C., Dhir, R. K., Leelawat, T., "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete", *Materials and structures* vol. 33, pp. 574-580, Department of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee, 2000.
- Lin, Y., Tyan, Y., Chang, T., Chang, C., "An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates", *Cement and concrete research*, disponível em www.sciencedirect.com, Taiwan, 2004.
- Masood, A., Ahmad, T., Arif, M., Mahdi, F., "Waste management strategies for concrete", *Environ Eng Policy*, vol. 3, p. 15-18, 2002.
- Matias, D., "Betão com agregados grossos de betão e recurso a adjuvantes, campanha experimental realizada no Instituto Superior Técnico", Relatório ICIST, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.
- Matias, D., Brito, J. de, "Influência da forma dos agregados grossos reciclados de betão na trabalhabilidade e resistência de betões", Encontro nacional de betão estrutural 2004, pp. 187-194, Porto, 2004.
- Mendes, T., Morales, G., Carbonari, G., "Study on ARC's Aggregate utilization recycled of concrete", Conferência Rilem de Barcelona, Universidade Estadual de Londrina, Brasil, 2004.
- Merlet, J. D., Pimienta, P., "Mechanical and physico-chemical properties of concrete produced with coarse and fine recycled concrete aggregates", *Demolition and reuse of concrete and masonry*, RILEM proceedings 23, Odense, 1993, pp. 343-353.
- Muller, A., "Lightweight aggregates from masonry rubble", Conferência Rilem Barcelona, 2004.
- Oliveira, M. de, de Assis, C., Terni, A., "Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate", Conferência Rilem de Barcelona, 2004.
- Olorunsogo, F. T., Padayachee, N., "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes", *Cement and concrete research*, n.º 32, pp. 179-185, Johannesburg, South Africa, 2001.
- Poon, C. S., Kou, S. C., Lam, L., "Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete", *Materials and structures*, DOI 10.1617/s11527-006-9192-y, RILEM, Hong Kong, 2006.
- Roos, F., Zilch, K., "Verification of the dimensioning values for concrete with recycled aggregates", International Symposium "Use of recycled concrete aggregate", University of Dundee, London, 1998.
- Rosa, A. P., "Utilização de agregados grossos cerâmicos na produção de betão", Tese Mestrado, Instituto Superior Téc-

nico, Lisboa, 2002.

Sago-Cretnsil, K.K., Brown, T., A.H. Taylor, "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate", *Cement and concrete research*, n.º 31, pp.707-712, Australia, 2000.

Santos, R. dos; Branco, F.; Brito, J. de, “Mechanical Properties of Concrete with Coarse Recycled Aggregates - Study for the Demolition of a Stadium”, *Structural Engineering International*, vol. 14, n.º 3, IABSE, Zurich, 2004.

Silva, J., “Incorporação de resíduos de barro vermelho em argamassas cimentícias”, Tese Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.

Soberón, J. G., "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study", *Cement and concrete research*, n.º 32, pp. 1301-1311, Mexico, 2002.

Strategic and Development Council, “Roadmap 2030: The U.S. Concrete Industry Technology Roadmap”, United States, 2002.

Sugiyama, Masashi, "The compressive strength of concrete containing tile chips, crushed callop shells, or crushed roofing tiles", Conferência Rilem de Barcelona, Hokkai Gakuen University, Sapporo, Japan, 2004.

Tsujino, M., Noguchi, T., Tamura, M., Kanematsu, M., Maruyama, I., "Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment", *Journal of advanced concrete technology*, vol. 5, n.º 1, 13-25. 2007.

Vieira, G., Molin, D., Lima, F. de, "Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição", *Engenharia Civil*, n.º 19, pp. 5-18, Universidade do Minho, 2004.

Wainwright et al, “Modifying the performance of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates”, *Demolition and reuse of concrete - RILEM Proceedings 23*, E & FN Spon, pp. 319-330, 1994.

Wirquin, E., Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, R., "Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité - application aux bétons de granulats recyclés", *Materials and structures*, vol. 33, pp. 403-408, 2000.

Xiao, J. Z., Li, J. B., Zhang, C., “On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete - an overview”, *Materials and structures*, vol. 39, pp. 655-664, 2006.

ANEXO I

Fichas de campanha experimental

Ficha de campanha experimental

-Investigador / orientador: Priscila Carrijo / António Figueiredo

-Tipo de investigação: Dissertação de mestrado

-Unidade de investigação / ano: Universidade de São Paulo / 2005

-Tipo de agregados reciclados: betão + cerâmicos / grossos

-Ensaios realizados (normas de ensaio):

-agregados:

composição granulométrica (NBR 7211/83 e NM 248);
massa volúmica (NBR NM 53);
absorção de água (NBR NM 53).

-betão fresco:

massa volúmica (NBR 9833/87);
trabalhabilidade (NBR NM 67).

-betão endurecido:

compressão axial (NBR NM101);
absorção de água (NBR 9833/87);
módulo de elasticidade (NBR 8522/83).

-Parâmetros:

-fixos:

relação a/c;
relação cimento / agregados.

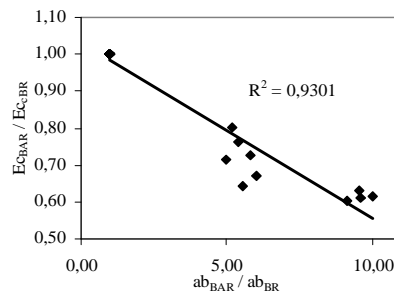
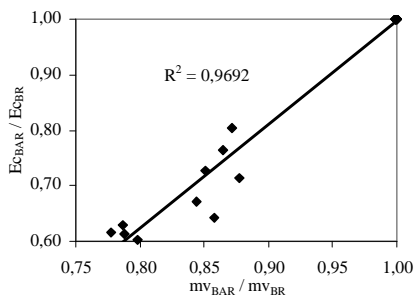
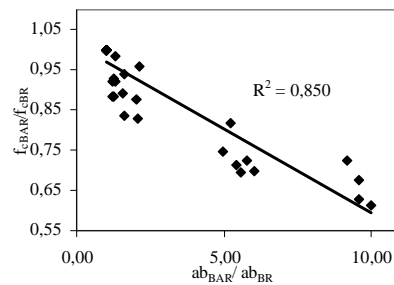
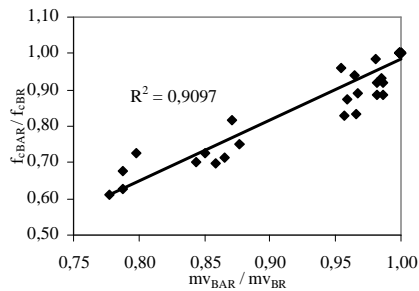
-variáveis:

densidade dos agregados grossos.



-Principais conclusões:

A campanha experimental centrou-se na análise dos efeitos da variação da densidade dos AR grossos no BAR com diferentes relações a/c, unicamente para uma taxa de substituição de AR de 100%. Foi possível definir relações lineares entre propriedades da mistura dos AR e a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos BAR.



Ficha de campanha experimental

-Investigador / orientador: Mónica Leite / Denise Dal Molin

-Tipo de investigação: Tese de doutoramento

-Unidade de investigação / ano: Univ. Fed. do Rio Grande do Sul / 2001

-Tipo de agregados reciclados: betão + cerâmicos / finos + grossos

-Ensaios realizados (normas de ensaio):

-agregados:

composição granulométrica (NBR 7217 e 7211);
massa volúmica (NBR 9776 e 9937)
baridade (NBR 7251);
absorção de água (NBR 9777 e 9937);
índice de forma (NBR 7809 e 7211);

-betão fresco:

massa volúmica (NBR 9833);
trabalhabilidade (NBR 7223 e 10342);

-betão endurecido:

compressão axial (NBR 5739);
tracção à flexão (NBR 12142);
tracção à compressão diametral (NBR 7222);
módulo de elasticidade (NBR 8522).

-Parâmetros:

-fixos:

idade do betão (28 dias para todas as propriedades mecânicas);
pré-saturação dos agregados;
traço.

-variáveis:

relação a/c;
taxa de substituição dos AR.

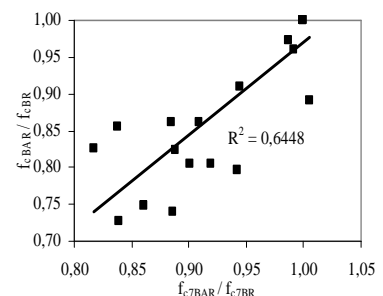
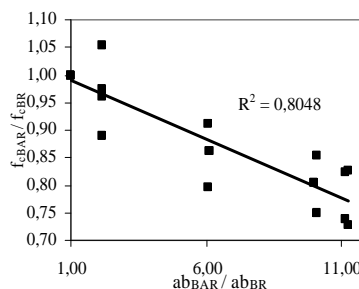
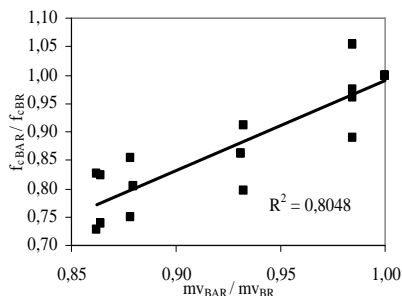


-Principais conclusões:

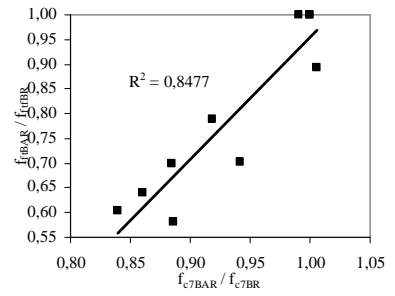
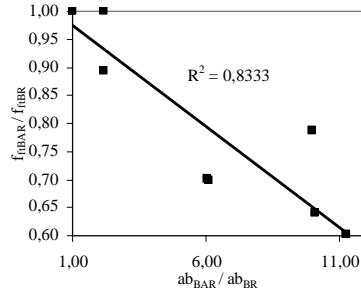
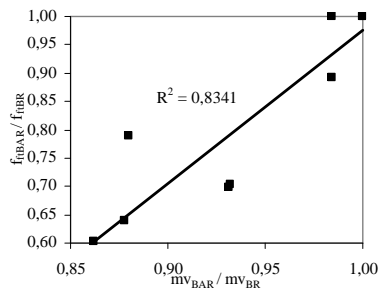
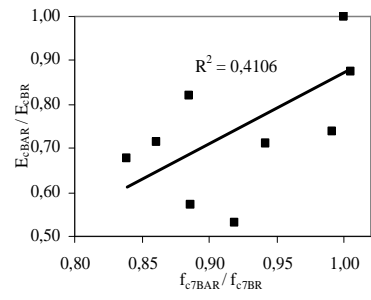
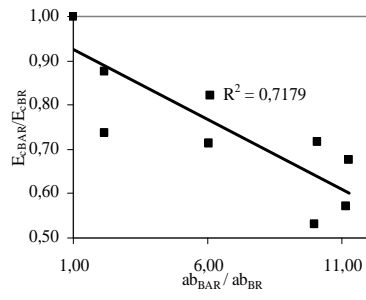
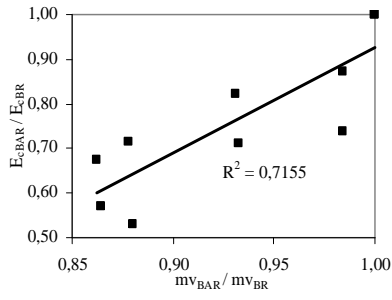
Os resultados experimentais foram alvo de análise estatística, tendo resultado uma equação matemática para representar o comportamento de cada propriedade.

A utilização de AGR contribui mais para o decréscimo de comportamento da resistência à tracção, do módulo de elasticidade e da trabalhabilidade do que a utilização de AFR.

A relação a/c e a porosidade dos agregados são factores fundamentais na resistência final dos BAR. Para as relações a/c mais baixas foi possível obter relações lineares entre as propriedades da mistura dos AR e as ensaiadas dos BAR.



Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados
Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional



Ficha de campanha experimental

-Investigador: S. C. Kou, C. S. Poon, Chan, D.

-Tipo de investigação: Artigo - Conferência de Barcelona Rilem

-Unidade de investigação / ano: Hong Kong Polytechnic University / 2004

-Tipo de agregados reciclados: indiferenciados / grossos

-Ensaio realizados (normas de ensaio):

-agregados:

composição granulométrica (BS 812);
massa volúmica;
absorção de água;
porosidade;
resistência à compressão.

-betão endurecido:

compressão axial;
penetração de cloretos (ASTM-C-1202-94);
módulo de elasticidade (ASTM-C-469-65);
retração (BS 1881);

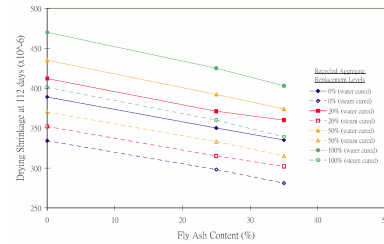
-Parâmetros:

-fixos:

relação a/c;
granulometria;
traço.

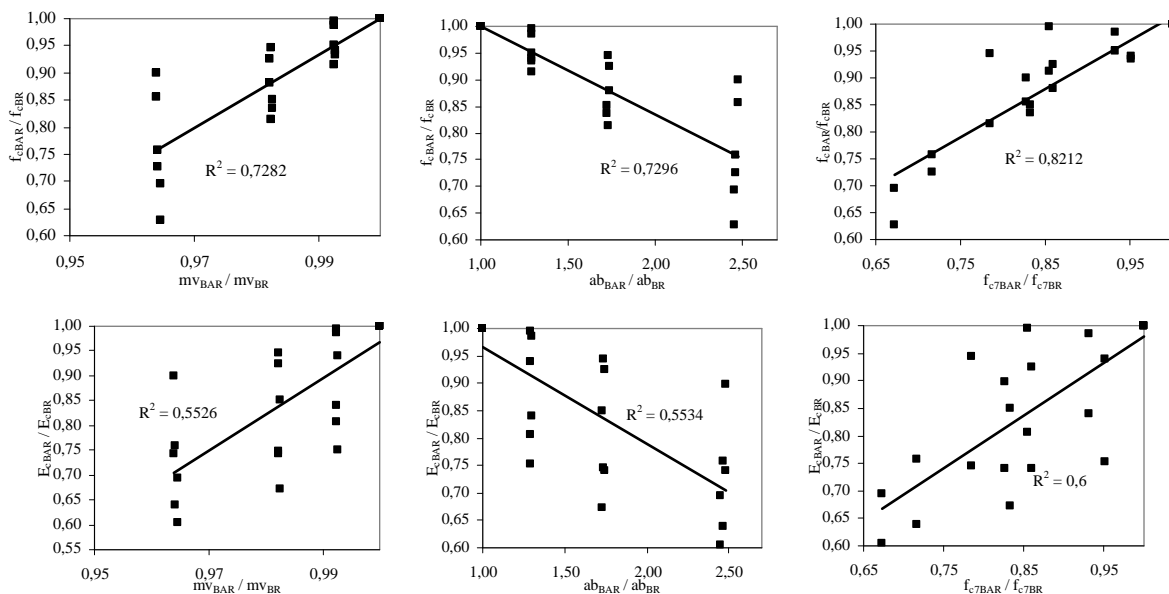
-variáveis:

inclusão de cinzas volantes;
taxa de substituição dos AR;
tipo de cura (por imersão e por vapor).

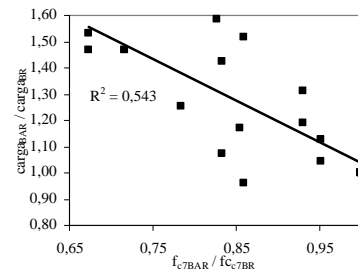
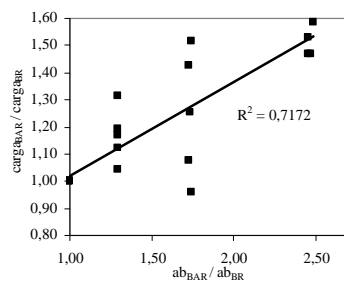
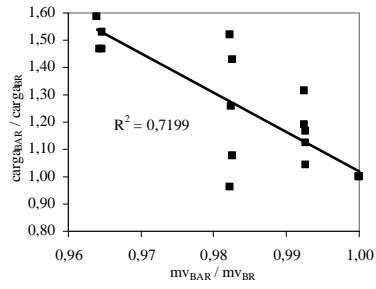
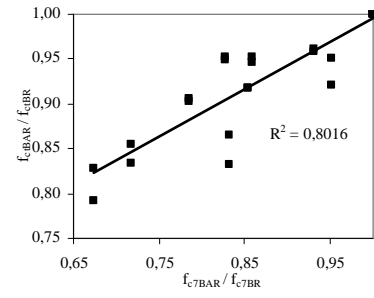
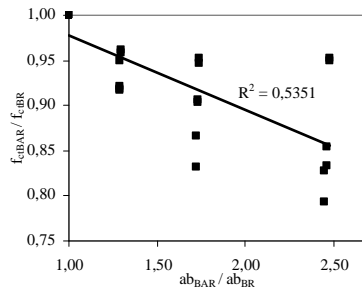
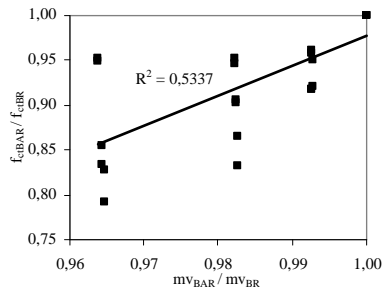


-Principais conclusões:

A adição de cinzas volantes pode melhorar o comportamento das propriedades de resistência e durabilidade dos BAR. O módulo de elasticidade não beneficia com a adição de cinzas volantes. O processo inicial de cura por vapor melhora igualmente o comportamento dos BAR.



Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados
Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional



Ficha de campanha experimental

-Investigador: José M. V. Gómez Soberón

-Tipo de investigação: Artigo científico na Cement and Concrete Research n.º 32

-Unidade de investigação / ano: Technical University of Catalonia / 2002

-Tipo de agregados reciclados: betão / grossos

-Ensaio realizados (normas de ensaio):

-agregados:

absorção de água (UNE 83134 e 83133-90);
composição granulométrica (UNE-EN 933-2-96);
massa volúmica (UNE-EN 1744-1);
índice de forma (UNE 7238-71 e 933-3-97);
módulo de finura (UNE 7238-71);
porosidade (UNE 83134-90).

-betão fresco:

trabalhabilidade;
massa volúmica;
conteúdo de ar (ASTM C138).

-betão endurecido:

compressão axial (UNE 83-304-84);
tracção por compressão diametral (UNE 83-306-85);
porosidade (ASTM D 4404);
massa volúmica (UNE 83-312-90);
permeabilidade (UNE 83-310-90);
retracção;
módulo de elasticidade (UNE 83-316-96);
fluência;
absorção de água (UNE 83-310-90).

-Parâmetros:

-fixos:

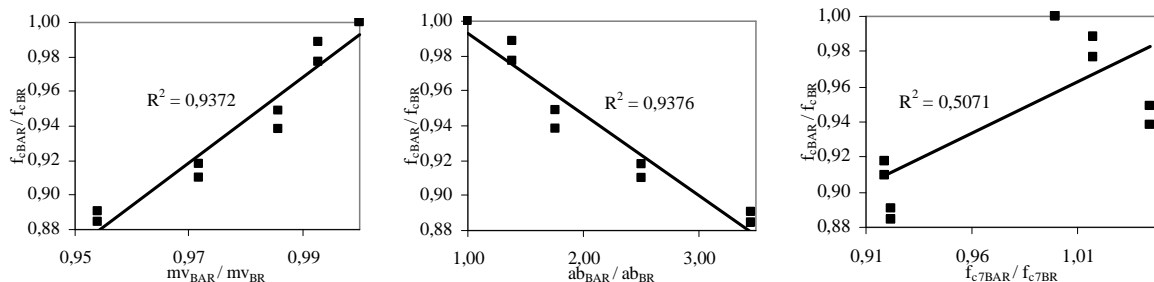
relação a/c;
trabalhabilidade;
composição granulométrica.

-variáveis:

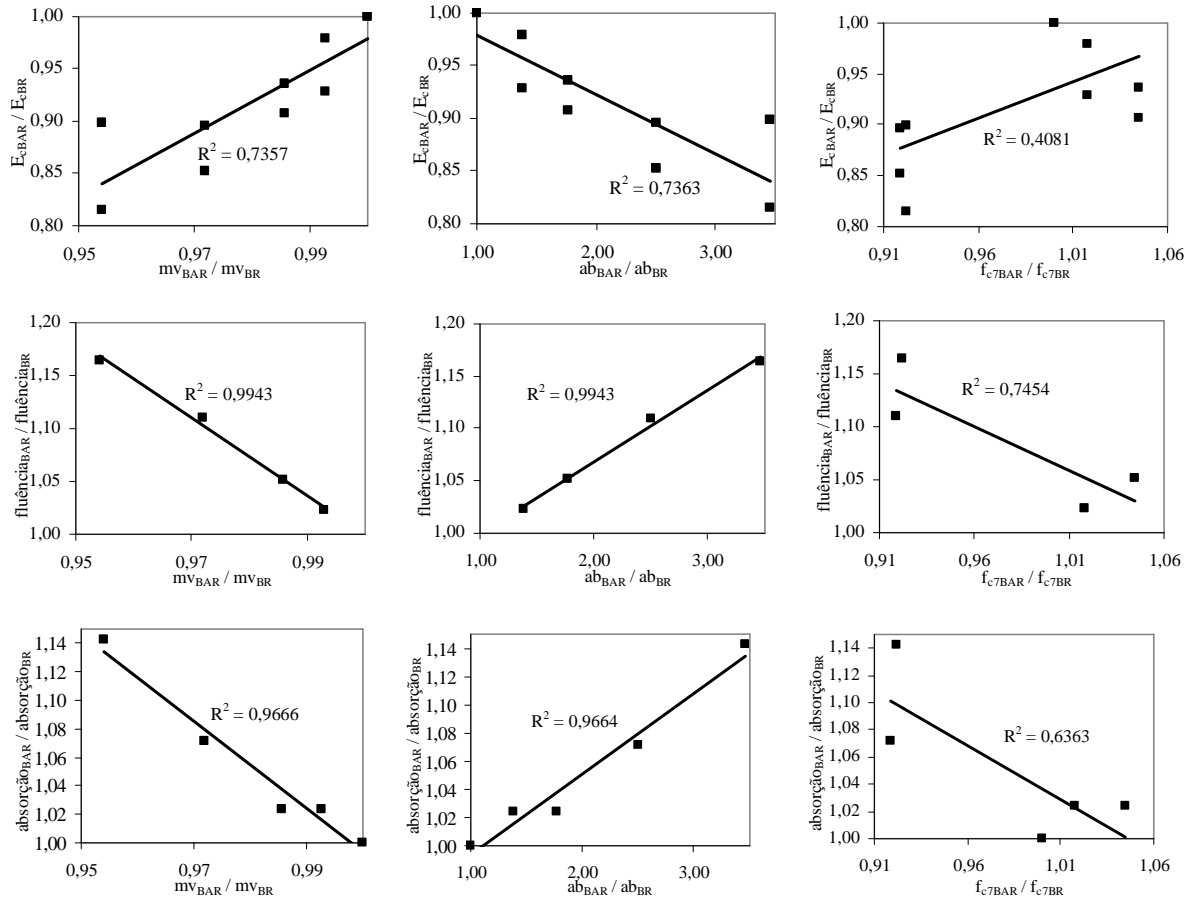
idade dos ensaios;
taxa de substituição dos AR.

-Principais conclusões:

A campanha centra-se na porosidade dos BAR, ensaiada por intrusão de mercúrio. Existe uma correlação entre a taxa de substituição e a dimensão e volume dos poros do betão no estado endurecido, com uma maior incidência nas idades mais baixas.



Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados
Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional



Ficha de campanha experimental

-Investigadores: Victor Cervantes, Jeffery Roesler, Amanda Bordelon

-Tipo de investigação: Technical note n.º 34 do CEAT (Center of Excellence for Airport Technology)

-Unidade de investigação / ano: University of Illinois / 2007

-Tipo de agregados reciclados: betão / grossos

-Ensaios realizados (normas de ensaio):

-agregados:

absorção de água;
composição granulométrica;
massa volúmica.

-betão endurecido:

compressão axial (ASTM C39);
tracção à flexão (ASTM C496);
retracção (ASTM C157);
módulo de elasticidade.

-Parâmetros:

-fixos:

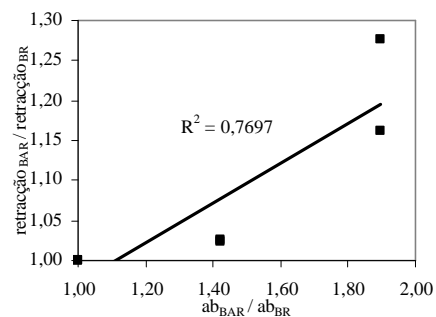
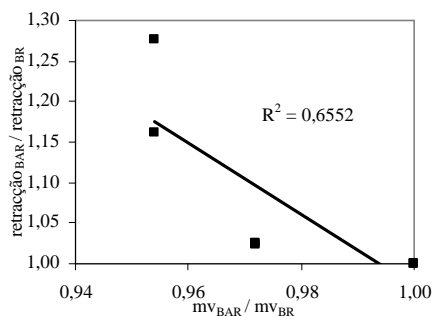
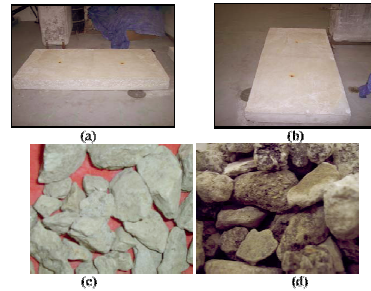
quantidade de água;
quantidade de cimento;

-variáveis:

adição de fibras sintéticas;
taxa de substituição dos AR.

-Principais conclusões:

A campanha experimental centra-se na influência das fibras sintéticas na resistência à tracção por flexão. Concluiu-se que o BAGR₁₀₀, com fibras sintéticas, apresenta resistência semelhante ao BR e BAGR₅₀ da mesma família. A retracção do BAGR₁₀₀ é diminuída com a adição das fibras sintéticas. Quanto maior a taxa de substituição de AP por AR, maior a retracção.



Ficha de campanha experimental

-Investigador: Amnon Katz

-Tipo de investigação: Artigo científico na Cemente and Concrete Research n.º 32

-Unidade de investigação / ano: Israel Institute of Technology / 2003

-Tipo de agregados reciclados: betão / grossos e finos

-Ensaios realizados (normas de ensaio):

-agregados:

absorção de água;
composição granulométrica;
massa volúmica;
baridade;
resistência à compressão (BS812-90);
quantidade de cimento (ASTM C1084-97).

-betão fresco:

trabalhabilidade;
massa volúmica;
conteúdo de ar (ASTM C138).

-betão endurecido:

compressão axial;
tracção à flexão;
tracção por compressão diametral;
retracção;
módulo de elasticidade;
absorção de água;
carbonatação.

-Parâmetros:

-fixos:

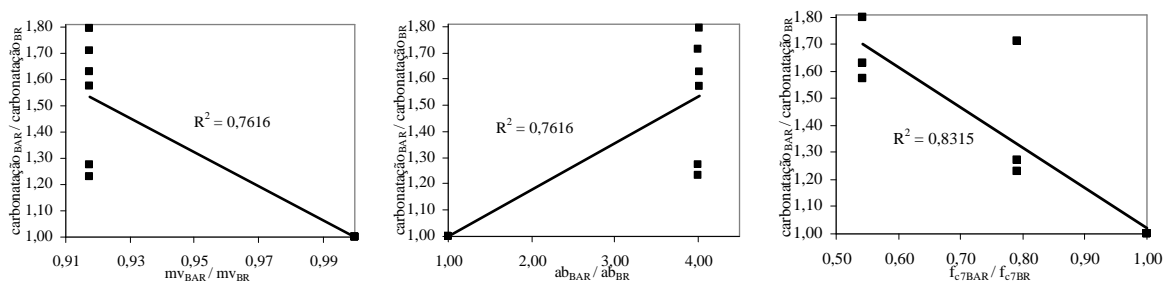
relação a/c.

-variáveis:

tipo de cimento (portland tradicional e branco)
diferença de idades do betão de origem;
taxa de substituição dos AR.

-Principais conclusões:

A influência da idade do betão de origem não é muito relevante, apesar de nas idades mais baixas (1 dia) ainda existir alguma capacidade cimentícia dos AR. Na generalidade das propriedades ensaiadas, registou-se uma tendência de redução de capacidades com o aumento da taxa de substituição de AP por AR.



ANEXO II
Base de datos

ANEXO III

Lista de artigos não analisados

LISTA DE ARTIGOS NÃO ANALISADOS

- Batayneh, Marie, Asi, "Use of selected waste materials in concrete mixes"
- Collivignarelli, Sorlini, "Reuse of municipal solid wastes incineration fly ashes in concrete mixtures"
- Gokce, Nagataki, Saeki, Hisada, "Interface Phenomena in Recycled Aggregate Concrete under Frost Action"
- Imamoto, "Deflections and cracks in recycled coarse aggregate concrete members processed by decompression and release".
- Kalaiaram, Suhramian, "Properties of recycled concrete aggregate with silica fume"
- Krezel, McMans, Harding, "The use of layered recycled concrete aggregate barriers in targeting urban noise"
- Otsuki, Miyazato, Yodsudjai, "Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete"
- Padmini, Ramamurthy, Mathews, "Relative moisture movement through recycled aggregate concrete"
- Rakshvir, Barai, "Studies on recycled aggregates-based concrete".
- Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., A.H. Taylor, "Durability and performance characteristics of recycled concrete aggregate"
- Sato, Maruyama, Sogabe, Sogo, "Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams"
- Vivian, Gao, "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two stage mixing approach".
- Watanabe, Niishibata, Hasshimoto, Ohtsu "Evaluation of Compressive Failure in Recycled Aggregate Concrete with Oscillation of Mixture Inserting Vibrators by Acoustic Emission"
- Wirquin, E., Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, R., "Frost resistance of recycled aggregate concrete"
- Wirquin, E., Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, R., "Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregates concrete"
- Xiao, Falkner, "Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel bars".
- Zhou, Jun-Li, Yi-Li, "Study on the Workability and Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash"