

CORRELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AGREGADOS E DAS ROCHAS ORIGINAIS

CORRELATION BETWEEN MECHANICAL BEHAVIOUR OF AGGREGATES AND ORIGINAL ROCKS

Conde, M. Carmo, *ISEL, Lisboa, Portugal, mcarmo@dec.isel.ipl.pt*

Dinis da Gama, C., *IST, Lisboa, Portugal, dgama@ist.utl.pt*

Lopes, M. G. *ISEL, Lisboa, Portugal, glopes@dec.isel.ipl.pt*

RESUMO

O estudo apresentado constitui a fase inicial de um trabalho de investigação destinado a estabelecer correlações entre as propriedades das rochas e dos agregados obtidos a partir destas. Para isso, começou por determinar-se os parâmetros de resistência do material rochoso tendo sido realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial, carga pontual, ensaio brasileiro, martelo de *Schmidt* e durabilidade (*slake durability*). Em relação aos agregados, a resistência foi avaliada através de ensaios de desgaste por abrasão, utilizando o equipamento de Los Angeles. Foram seguidamente estabelecidas correlações entre os parâmetros de resistência obtidos para a rocha original e para os agregados. Estas correlações são de grande interesse por permitirem, a partir das sondagens do terreno na fase de ante-projecto de uma obra, avaliar, através de ensaios realizados na rocha, as características prováveis dos agregados que se podem obter.

ABSTRACT

The present study comprises the initial phase of an investigation work targeted to establish correlations between the properties of rock and of aggregates obtained from those. It started with the determination of rock strength through tests of uniaxial compression, point load, tensile strength by the Brazilian method, Schmidt rebound hardness and slake durability index. The aggregates strength was evaluated by the Los Angeles abrasion test. Correlations between the obtained parameters of strength, between the original rock and the resulting aggregates, were established. These correlations will allow, from ground sampling in the early phase of most projects, the use of test results conducted on the rock mass to evaluate the probable characteristics of the obtainable aggregates.

1 INTRODUÇÃO

O estudo apresentado constitui a fase inicial de um trabalho de investigação destinado a estabelecer correlações entre as propriedades das rochas e dos agregados obtidos a partir destas. O objectivo deste trabalho é obter um método para avaliar, na fase de sondagem do terreno, a aplicabilidade dos agregados através de ensaios realizados sobre a rocha original. Este estudo é de grande interesse uma vez que permite uma orçamentação e gestão da obra com maior rigor.

As rochas e os agregados estudados são de origem calcária, embora no trabalho de investigação em curso se preveja estudar também granitos e basaltos. Os agregados, de granulometria extensa, foram estudadas com vista à sua aplicação em camadas de base e sub-base de infraestruturas rodoviárias.

Numa primeira fase do trabalho foram caracterizados os materiais rochosos recorrendo aos ensaios de caracterização química e mecânica. De seguida foi feita a caracterização física e mecânica dos agregados, de acordo com o estabelecido no caderno de encargos da ex-JAE [13], tendo em conta a sua aplicação em camadas de base e sub-base. Finalmente foram estabelecidas correlações entre os parâmetros de resistência obtidos para as rochas originais e para os agregados.

2 MATERIAIS ENSAIADOS

Os materiais ensaiados são rochas sedimentares calcárias pertencentes à Orla Mesocenozóica. Escolheram-se dois calcários da mesma formação (1 e 2) e outro de formação diferente. As amostras designadas por calcário 1 e calcário 2 são resultantes da escavação realizada no âmbito das terraplenagens associadas ao traçado da Auto-Estrada A10, que liga Bucelas a Arruda dos Vinhos. Estas formações sedimentares do período jurássico fazem parte da sub-bacia de Arruda dos Vinhos. A amostra designada por calcário 3 foi extraída de uma pedreira na zona de Rio Maior. Este calcário também pertence ao período jurássico, integra as formações que constituem a Serra dos Candeeiros.

A escolha deste tipo de rocha está relacionada com o facto de que, segundo elementos estatísticos do Instituto Geológico e Mineiro, a produção de agregados proveniente de rochas do tipo calcário representa cerca de 38% da produção total de agregados em Portugal [7].

3 ENSAIOS REALIZADOS SOBRE AS ROCHAS E RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados ensaios de caracterização química e ensaios de caracterização mecânica. Como a composição química de uma rocha pode variar consoante o tipo litológico, e dentro do mesmo tipo pode ainda variar consoante as condições de formação e de fenómenos de alteração, quando se trata do estudo de rochas carbonatadas torna-se importante a determinação da composição química da rocha, para que seja possível fazer-se a diferenciação entre calcários puros, calcários margosos e calcários dolomíticos. É importante fazer esta distinção uma vez que as propriedades físicas e mecânicas dos agregados podem variar consoante o tipo de rocha carbonatada.

A análise química dos calcários foi feita recorrendo à determinação do resíduo insolúvel, por ataque com ácido clorídrico. No quadro 3.1 são apresentadas as análises químicas dos diferentes calcários, onde são expressos os valores dos teores dos principais óxidos e o resíduo insolúvel para as diferentes amostras.

Procurou-se estudar a de resistência das rochas através dos ensaios mais correntes para esse fim, com o objectivo de obter aquele que melhor se correlaciona com a perda por desgaste de Los Angeles.

A caracterização do comportamento mecânico dos calcários foi efectuada através dos seguintes ensaios:

- ensaio de compressão uniaxial;
- ensaio de carga pontual;
- ensaio brasileiro;
- ensaio de durabilidade “*Slake Durability Test*”;
- ensaio com o martelo de “*Schmidt*”.

Quadro 3.1 – Análise química dos calcários ensaiados

Teor (%)	Calcário 1	Calcário 2	Calcário 3
Na ₂ O	0,02	0,05	0,01
K ₂ O	0,02	0,05	0,00
MgO	0,46	0,50	0,21
Fe ₂ O ₃	0,31	0,29	0,00
P ₂ O ₅	0,08	0,10	0,04
Al ₂ O ₃	0,33	0,67	0,00
CO ₂	42,98	42,29	43,14
CaO	54,38	54,14	55,77
RI*	0,90	2,25	0,00
Qz**	0,10	0,36	0,00

* – resíduo insolúvel, após ataque com HCl.

** – fracção de quartzo distinguida no resíduo insolúvel.

O estudo da resistência à compressão simples foi efectuado através do ensaio de compressão uniaxial, realizado de acordo com a recomendação da Sociedade Internacional da Mecânica das Rochas (ISRM) [11]. Foram ensaiados, para cada um dos calcários, 5 provetes de forma cilíndrica com 48,8 mm de diâmetro. Os valores (mínimo, máximo e médio) das resistências à compressão uniaxial, σ_c , calculadas dividindo a carga máxima que o provete suporta durante o ensaio pela área da secção transversal original, são apresentadas no quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Valores de resistência à compressão uniaxial

Tipo de rocha	σ_c (MPa)		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Calcário 1	43,8	145,5	111,5
Calcário 2	49,4	120,1	79,1
Calcário 3	46,5	99,9	84,5

A resistência à compressão do material rochoso foi também avaliada através do ensaio de carga pontual, realizado de acordo com a recomendação da ISRM [12]. Este ensaio é muito utilizado por ser de realização bastante mais simples que o anterior para além de não ser necessário ter cuidados relevantes na preparação dos provetes, podendo mesmo serem ensaiados pedaços de rocha com forma irregular. Foram ensaiados para cada um dos calcários 10 provetes de forma cilíndrica com 48,8 mm de diâmetro. Os valores da resistência à carga pontual foram calculados pela razão entre a força necessária para levar o provete à rotura e o quadrado do diâmetro da secção transversal. Os valores (mínimo, máximo e médio) das resistências à carga pontual corrigida, $I_{s(50)}$, obtidas multiplicando os valores da resistência à carga pontual por um factor de correcção, relativo à forma dos provetes ($F = 0,989$), são apresentados no quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Valores de resistência à carga pontual

Tipo de rocha	$I_{s(50)}$ (MPa)		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Calcário 1	4,29	6,39	5,34
Calcário 2	3,70	4,61	4,17
Calcário 3	4,73	6,27	5,55

Um outro ensaio que permite determinar, ainda que de uma forma indirecta, a resistência à tracção uniaxial de rochas é o ensaio brasileiro. Este ensaio foi realizado segundo o procedimento recomendado pela ISRM [8]. Para cada um dos calcários foram ensaiados 10 provetes de forma cilíndrica com diâmetro igual a 48,8 mm e espessura aproximadamente igual ao raio. Os valores (mínimo, máximo e médio) da resistência à tracção, σ_t , determinados pela

relação entre a carga necessária para levar o provete à rotura e o produto do diâmetro pela espessura do provete, são apresentados no quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Valores de resistência à tracção

Tipo de rocha	σ_t (MPa)		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Calcário 1	6,57	11,06	9,58
Calcário 2	5,36	8,82	6,85
Calcário 3	5,86	8,32	6,73

O ensaio com martelo de *Schmidt*, tal como o ensaio de carga pontual, é um ensaio não destrutivo de fácil realização e também permite avaliar a resistência do material rochoso. Neste ensaio, realizado de acordo com as recomendações de ISRM [9], foram aplicadas 20 pancadas em cada amostra de rocha. O quadro 3.5 mostra os valores (mínimo, máximo e médio) obtidos para os três calcários.

Quadro 3.5 – Valores do índice de *Schmidt*

Tipo de rocha	Índice de <i>Schmidt</i>		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Calcário 1	33	43	38
Calcário 2	35	48	43
Calcário 3	43	51	47

O ensaio de durabilidade ou “*Slake Durability Test*” é outro dos ensaios normalmente utilizados para avaliar a resistência oferecida por uma amostra de rocha ao enfraquecimento e à desintegração, quando sujeita a dois ciclos normalizados de secagem e molhagem. Os ensaios foram realizados em conformidade com as recomendações da ISRM [10]. O ensaio de durabilidade foi realizado sobre 2 provetes de cada uma das amostras de rocha; cada provete era constituído por 10 pedaços de rocha com cerca de 50 g cada. Os valores do índice “*slake durability*” (segundo ciclo), I_{d2} , calculado como a percentagem da relação entre o peso final e o peso inicial da amostra seca, são apresentados no quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Valores do índice de durabilidade, “*slake durability*”

Tipo de rocha	I_{d2} (%)
Calcário 1	99,37
Calcário 2	98,34
Calcário 3	99,38

No quadro 3.7 pretendeu-se fazer um resumo dos valores médios obtidos para os diferentes ensaios de caracterização mecânica das 3 amostras de calcários.

Quadro 3.7 – Valores médios obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos calcários

Ensaio	Procedimento de ensaio	Parâmetro	valor médio		
			Calcário 1	Calcário 2	Calcário 3
Compressão uniaxial	[11]	σ_c (MPa)	111,5	79,1	84,5
Carga pontual	[12]	$I_{s(50)}$ (MPa)	5,34	4,17	5,55
Brasileiro	[8]	σ_t (MPa)	9,58	6,85	6,73
Durabilidade	[10]	I_{d2} (%)	99,37	98,34	99,38
Martelo de <i>Schmidt</i>	[9]	Índice de <i>Schmidt</i>	38	43	47

4 ENSAIOS REALIZADOS SOBRE OS AGREGADOS E RESULTADOS OBTIDOS

A caracterização física e mecânica de agregados a utilizar na construção rodoviária é efectuada normalmente através dos seguintes ensaios:

- análise granulométrica;
- equivalente de areia;
- adsorção de azul de metileno;
- perda por desgaste na máquina de “Los Angeles”.

A análise granulométrica foi efectuada de acordo com a especificação LNEC E 233 [5]. Na figura 4.1 apresentam-se as curvas granulométricas das amostras de agregados e o fuso granulométrico da ex-JAE [13] para materiais a aplicar em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

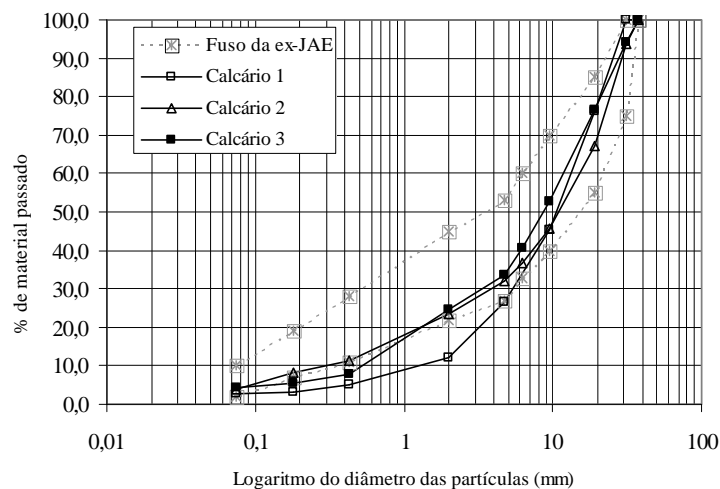


Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados ensaiados

Para avaliação da quantidade e da qualidade dos elementos finos foram realizados ensaios de equivalente de areia, e calculada a relação volumétrica entre os elementos arenosos e a totalidade dos elementos da fracção passada no peneiro com 4,75 mm de abertura (Nº4 ASTM), de acordo com a especificação LNEC E 199 [4].

A avaliação da quantidade de elementos argilosos presentes na fracção fina do agregado foi avaliada pelo ensaio de adsorção de azul de metileno realizado com base na norma francesa P 18-595 [14]. Este ensaio só foi realizado para a amostra de agregado proveniente do calcário 3, porque com base nos resultados obtidos no equivalente de areia verificou-se a existência de uma baixa percentagem de partículas finas argilosas.

A resistência das partículas dos agregados à fragmentação por impacto e ao desgaste por atrito foi avaliada através do ensaio de perda por desgaste na máquina de Los Angeles. O ensaio efectuada de acordo com a especificação do LNEC E 237 [3], foi realizado usando a composição granulométrica A (fracção granulométrica entre 9,51 e 38,1 mm), devido à granulometria do agregado.

No quadro 4.1 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados para a caracterização dos agregados.

Quadro 4.1 – Valores obtidos para a caracterização dos agregados

Ensaio	Calcário 1	Calcário 2	Calcário 3
Equivalente de areia (%)	73,0	50,3	64,4
Azul de metileno (ml/g por 100g de finos)	*	*	0,30
Perda por desgaste na máquina de Los Angeles (%)	29,0	31,4	31,0

* estes ensaios não foram realizados

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Ensaios sobre rochas

Da análise química efectuada (ver quadro 3.1) verifica-se que as percentagens de Al_2O_3 e MgO são muito baixas, pelo que pode concluir-se que os calcários são quase puros. Através dos valores de CO_2 e CaO verifica-se que o calcário 3 é de todos o que apresenta maior grau de pureza.

Os resultados apresentados no quadro 3.7 não permitem concluir sobre a existência de correlações entre os valores da resistência obtidos nos diferentes ensaios realizados. No entanto, usando as correlações entre a resistência à compressão uniaxial, σ_c , e a resistência à carga pontual, I_s , determinadas por Al-Harthi [1] e por Wiesner e Gillate [16], é possível verificar que os resultados obtidos no presente estudo se encontram dentro das gamas de valores obtidas por estes autores (figura 5.1).

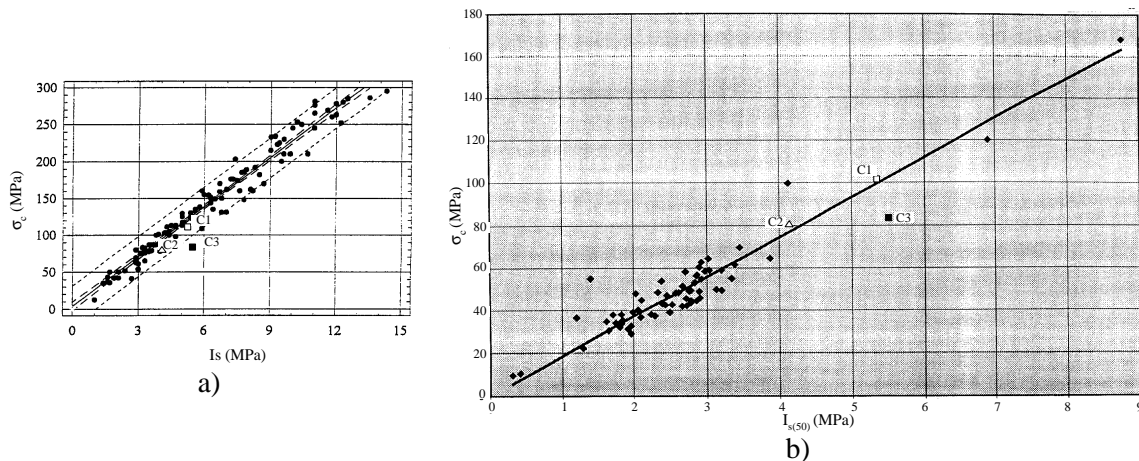


Figura 5.1 – Correlação entre I_s e σ_c obtidas por diferentes autores

Comparando os valores resistência à tracção (ensaio brasileiro), e os valores do índice de “Schmidt”, apresentados no quadro 3.7, parece existir uma convergência negativa entre estes parâmetros. Seria desejável efectuar mais ensaios para confirmar esta correlação uma vez que González de Vallejo, L et al [6] referem que a resistência à tracção varia entre 5 % a 10 % da resistência à compressão uniaxial, e o índice de “Schmidt”, para rochas de densidades semelhantes, aumenta com a resistência à compressão uniaxial.

5.2 Ensaios sobre agregados

Pela análise das curvas granulométricas da figura 4.1 verifica-se que na amostra designada por calcário 1 existe um défice de material de diâmetro inferior a 4,75 mm relativamente ao fuso proposto pela ex-JAE [13]. Os agregados dos três calcários possuem uma percentagem de finos

(material passado no peneiro N° 200 ASTM) que varia entre 2,7 e 4,4 %, inferior a 5 % como preconiza o caderno de encargos da ex-JAE [13].

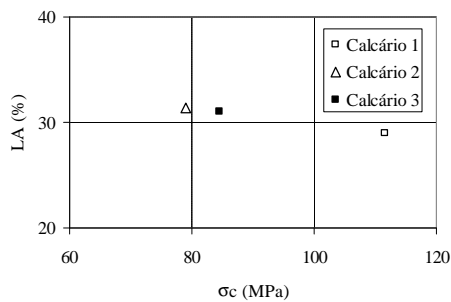
Analisando os valores do ensaio de equivalente de areia, quadro 4.1, conclui-se que todos os materiais poderiam ser empregues em camadas de sub-base e base de pavimentos, uma vez que, segundo o caderno de encargos da ex-JAE [13], os valores devem ser superiores a 45 % e 50 %, respectivamente. No entanto, os agregados de calcário 2 seriam os menos aconselháveis em camadas de base, uma vez que o valor de equivalente de areia está próximo do limite mínimo.

Os valores obtidos no ensaio de adsorção de azul de metileno revelam a existência de teores baixos de partículas finas argilosas, o que é coerente com os resultados obtidos pelas análises químicas.

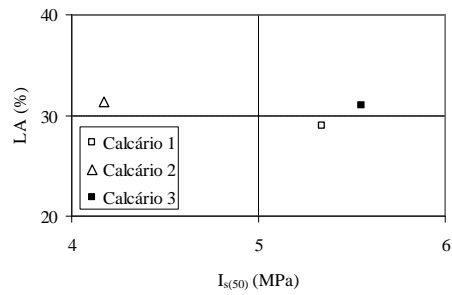
Os resultados obtidos no ensaio de desgaste da máquina de Los Angeles para os diferentes materiais são todos da mesma ordem de grandeza e segundo os valores preconizados no caderno de encargos da ex-JAE [13], verifica-se que todos os materiais cumprem o especificado para aplicar em camadas de sub-base e base de pavimentos, inferior a 45 % e a 40 %, respectivamente.

6 CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE ROCHAS E AGREGADOS

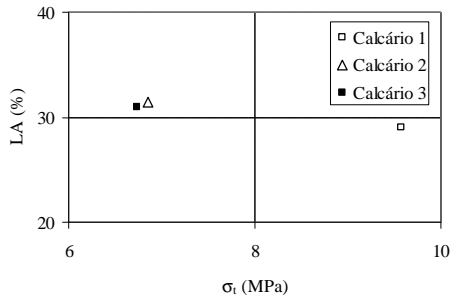
Tendo em conta o número reduzido de ensaios efectuados até à data não é possível ainda estabelecer correlação entre os valores de resistência das rochas e os valores de perda por desgaste de Los Angeles, obtidos para os agregados (figura 6.1). Contudo, a inclusão dos valores obtidos neste estudo nas correlações estabelecidas entre a resistência à compressão uniaxial e o desgaste de Los Angeles, determinadas por Al-Harhi [1] para rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, e por Shakoor e Brown [15] e Ballivy e Dayre [2] para rochas carbonatadas é possível verificar que os valores obtidos no presente estudo não se afastam dos encontrados por estes autores (figura 6.2)



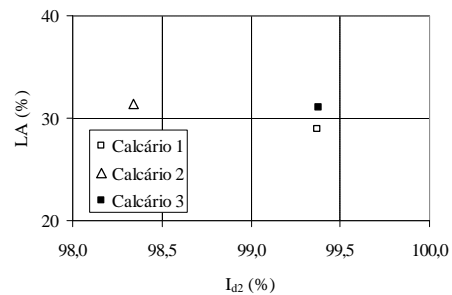
a) Relação entre σ_c e LA



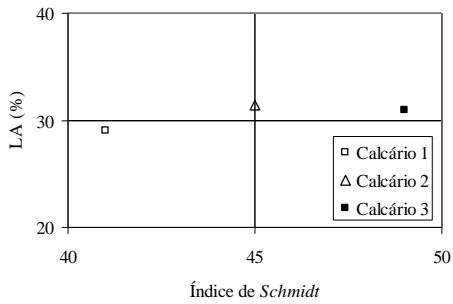
b) Relação entre $I_{s(50)}$ e LA



c) Relação entre σ_t e LA



d) Relação entre I_{d2} e LA



e) Relação entre o índice de *Schmidt* e LA
 Figura 6.1 – Relação obtidas entre os valores de resistência das rochas e o desgaste de LA

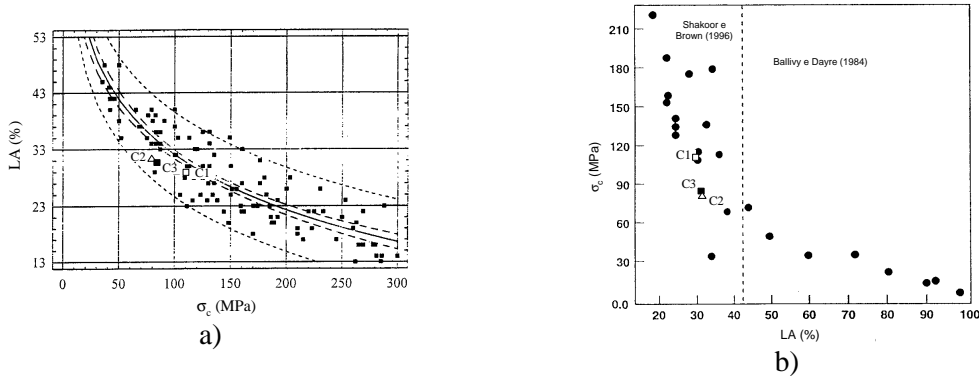


Figura 6.2 – a) Relação entre σ_c e LA adaptado de [1]; b) Relação entre LA e σ_c adaptado de [15]

Na relação entre a resistência à compressão pontual e o desgaste de Los Angeles, apresentada na figura 6.3 e realizada por Al-Harthy [1], é possível verificar-se que os valores determinados para os três calcários também se encontram dentro dos limites estabelecidos por este autor.

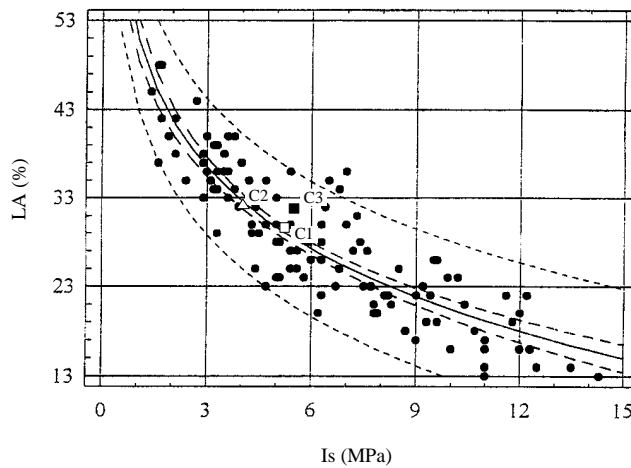


Figura 6.3 – Relação entre I_s e LA adaptado de [1]

7 CONCLUSÕES

Do estudo efectuado até à data já foi possível confirmar a conhecida correlação entre os ensaios de resistência à compressão uniaxial e a resistência à carga pontual. Existe também correlação entre os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das rochas e o ensaio de perda por

desgaste na máquina de Los Angeles, realizado para o estudo dos agregados; principalmente entre a resistência à compressão uniaxial e o desgaste de Los Angeles e entre a resistência à carga pontual e o desgaste de Los Angeles. Também é possível concluir, pela análise de estudos já efectuados, que estas correlações são inversas, ou seja, os valores de resistência das rochas aumentam com a diminuição da perda por desgaste de Los Angeles.

Este estudo será continuado, não só realizando um maior número de ensaios mas também alargando a diferentes tipos litológicos, para que possa ser mais conclusivo.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] Al-Harthi, A.A. (2001) A field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate, *Bulletin Engineering Geology and Environment* 60: 193-200.
- [2] Ballivy G., Dayre M. (1984) The mechanical behaviour of aggregates related to the physicommechanical properties of rock:, *Bull IAEG*, 29: 339-342.
- [3] Especificação LNEC 237 – 1970 “Agregados. Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [4] Especificação LNEC E 199 – 1967 “Solos. Ensaio de equivalente de areia”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [5] Especificação LNEC E 233 – 1968 “Agregados. Análise granulométrica”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [6] González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002) - *Ingeniería Geológica*, Pearson Education, Madrid.
- [7] <http://www.igm.pt/estatisticas/default.html>.
- [8] ISRM – Commission on Testing Methods (1977) - Suggested Method for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test. Pergamon Press, pp. 120–121.
- [9] ISRM – Commission on Testing Methods (1977) - Suggested Method for Determining of the Schmidt Rebound Hardness. Pergamon Press, pp. 101–102.
- [10] ISRM – Commission on Testing Methods (1977) - Suggested Method for Determining of the Slake-Durability Index. Pergamon Press, pp. 92–94.
- [11] ISRM – Commission on Testing Methods (1978) - Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. Pergamon Press, pp. 113–116.
- [12] ISRM – Commission on Testing Methods (1985) - Suggested Method for Determining Point Load Strength. Pergamon Press, pp. 53–60.
- [13] JAE (1998) – *Caderno de Encargos-tipo para a execução de empreitadas de construção*. Junta Autónoma das Estradas, Lisboa.
- [14] Norma AFNOR: NF P 18-595 (1990) – “Granulats. Essai au bleu de méthylène. Méthode à la tache”.
- [15] Shakoor A., Brown C. L. (1996) Development of a quantitative relationship between unconfined compressive strength and Los Angeles abrasion loss for carbonate rocks, *Bull IAEG*, 53: 97-103.
- [16] Wiesner E., Gillate S. J. (1997) An evaluation of the relation between unconfined compressive strength and point load strength index , *Bull IAEG*, 56: 115-118.