

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE LOS ANGELES DE AGREGADOS A PARTIR DE ENSAIOS EM ROCHA

EVALUATION OF THE LOS ANGELES ABRASION OF AGGREGATES FROM TESTS ON ROCK

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

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

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

RESUMO

Neste artigo foram estabelecidas correlações entre as propriedades das rochas e dos agregados obtidos a partir destas, com o objectivo de estimar a aplicabilidade dos agregados, em camadas de base e sub-base de infraestruturas rodoviárias, a partir de ensaios realizados sobre o material rochoso. Tendo em vista o objectivo do trabalho foi efectuada a caracterização mecânica dos materiais rochosos através da realização de ensaios de carga pontual e martelo de Schmidt e a caracterização mecânica dos agregados através da realização do ensaio de Los Angeles. Com os resultados obtidos, não só nos ensaios atrás referidos, mas também em resultados indicados por outros autores, foram estabelecidas correlações entre a resistência à compressão uniaxial (determinada a partir da dureza Schmidt) e a resistência à carga pontual da rocha mãe, com o desgaste de Los Angeles dos agregados.

ABSTRACT

This article establishes correlations between the properties of rocks and those of the aggregates obtained from them. The goal is to estimate the applicability of the aggregates, in base and sub-base layers of road pavements, from tests on the rock materials. Having this goal in mind, the characterization of rock materials was made using the tests of point load strength and Schmidt rebound hardness; the characterization of aggregates was made through the Los Angeles test. Using the results of the referred tests and data published by other authors, correlations were established, relating the uniaxial compressive strength (obtained from the Schmidt hardness) and the point load strength of the original rock to the Los Angeles abrasion of the aggregates.

1 INTRODUÇÃO

Neste artigo apresentam-se as correlações estabelecidas entre as propriedades das rochas e dos agregados obtidos a partir destas, com o objectivo de estimar a aplicabilidade desses agregados em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. 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.

No trabalho de investigação desenvolvido, foram estudados rochas e agregados de calcário, mármore e granito. Tendo em vista o objectivo do trabalho foi efectuada não só a caracterização mecânica dos materiais rochosos através da realização de ensaios de carga pontual e martelo de Schmidt, como também a caracterização mecânica dos agregados através da realização do ensaio de Los Angeles. Com os resultados obtidos, não só nos ensaios atrás referidos, mas

também em resultados indicados por outros autores, foram estabelecidas correlações entre a resistência à compressão uniaxial (determinada a partir da dureza Schmidt) e a resistência à carga pontual da rocha mãe, com o desgaste de Los Angeles dos agregados.

Tendo em consideração os valores máximos de desgaste de Los Angeles admitidos no caderno de encargos da ex-JAE, para camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários e as correlações atrás referidas, foram estimados os valores mínimos admissíveis da resistência à compressão uniaxial (determinada a partir da dureza Schmidt) e da resistência à carga pontual que a rocha mãe deve apresentar para que os agregados a produzir possam ser utilizados naquelas aplicações.

2 MATERIAIS ENSAIADOS

Os materiais ensaiados incluíram calcários, granitos e mármore. A escolha deste tipo de rochas está relacionada com o facto de, segundo elementos estatísticos do Instituto Geológico e Mineiro, a produção de agregados proveniente de rochas carbonatadas representar cerca de 35% da produção total de agregados em Portugal, seguida dos granitos com cerca de 19,4% [3].

Foram ensaiadas três amostras diferentes de calcário, duas da mesma formação e outra de formação diferente, por as propriedades das rochas poderem diferir de formação para formação e dentro da mesma formação. As amostras de calcário, que irão ser designadas por calcário de Arruda dos Vinhos 1 e 2, são resultantes da escavação realizada no âmbito das terraplenagens associadas ao traçado da Auto-Estrada A10, que liga Bucelas a Arruda dos Vinhos. A amostra que irá ser designada por calcário de Rio Maior foi extraída de uma pedreira na zona de Rio Maior.

O granito, denominado de Alpalhão, utilizado na realização dos ensaios é proveniente dos escombros produzidos pela extracção destas rochas para fins ornamentais.

O mármore utilizado na realização dos ensaios, tal como o granito, é proveniente dos escombros produzidos pela extracção destas rochas para fins ornamentais.

3 ENSAIOS REALIZADOS SOBRE AS ROCHAS E RESULTADOS OBTIDOS

Para a caracterização mecânica das rochas procurou-se utilizar ensaios correntes e simultaneamente de fácil realização e baixo custo. Tendo em conta esses objectivos, a caracterização do comportamento mecânico das rochas foi efectuada através do ensaio de carga pontual e ensaio com o martelo de Schmidt.

O ensaio de carga pontual consiste em medir a resistência que um fragmento de rocha oferece à rotura quando comprimido entre duas ponteiras cónicas normalizadas. A realização deste ensaio seguiu o procedimento especificado pela ISRM [6]. Este ensaio é muito utilizado por ser de realização bastante simples e pouco demorada, pelo facto de não ser necessário cuidados relevantes na preparação dos provetes, podendo mesmo serem ensaiados pedaços de rocha com forma irregular. Foram ensaiados para cada um dos tipos de rochas 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 das resistências à carga pontual corrigida, $I_{s(50)}$, são obtidos multiplicando os valores da resistência à carga pontual por um factor de correcção, relativo à forma dos provetes ($F = 0,989$). No quadro 3.1 são apresentados os valores (mínimo, máximo e médio) das resistências à carga pontual corrigida, $I_{s(50)}$, para as diferentes rochas ensaiadas.

Quadro 3.1 – Valores de resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, das rochas ensaiadas

Tipo de rocha	$I_{s(50)}$ (MPa)		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Calcário de Arruda dos Vinhos 1	4,29	6,39	5,34
Calcário de Arruda dos Vinhos 2	3,70	4,61	4,17
Calcário de Rio Maior	4,73	6,27	5,55
Granito de Alpalhão	7,08	8,42	7,75
Mármore de Bencatel	2,16	2,53	2,27

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. O martelo de Schmidt é um pequeno aparelho metálico de geometria cilíndrica que dispõe de uma mola ligada a uma massa no interior e uma ponta retráctil, a qual, ao ser pressionada contra a rocha faz com que a mola seja libertada e a massa aplique uma pancada sobre a ponta retráctil. O valor da dureza Schmidt é determinado através da medida de ricochete da massa. Em função da dureza ou resistência da rocha, a massa sofre maior ou menor ressalto, cujo valor fica registado numa escala que se encontra no próprio aparelho. A dureza Schmidt para as diferentes rochas estudadas foi obtida através de ensaios realizados em conformidade com as recomendações propostas pela ISRM [5], sendo observados os procedimentos sugeridos no que respeita à preparação de amostras e execução do ensaio. O ensaio foi realizado sobre blocos, recolhidos para cada um dos tipos de rocha. Como o ensaio deve ser realizado sobre uma superfície limpa, lisa e livre de fissuras, foi previamente preparada, em cada bloco da amostra, uma superfície plana e lisa. Os blocos a ensaiar foram fixos para que não ocorressem perdas de energia e consequentemente os valores obtidos fossem inferiores aos reais. Na realização do ensaio o martelo de Schmidt foi colocado perpendicularmente à superfície plana preparada em cada bloco das amostras. Foram realizados pelo menos 20 pancadas em cada uma das amostras de rocha. O quadro 3.2 mostra os valores (mínimo, máximo e médio) obtidos para cada tipo de rocha ensaiada.

Quadro 3.2 – Valores da dureza Schmidt, N, das rochas ensaiadas

Tipo de rocha	N		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Calcário de Arruda dos Vinhos 1	*	*	*
Calcário de Arruda dos Vinhos 2	35	48	43
Calcário de Rio Maior	43	51	47
Granito de Alpalhão	57	63	60
Mármore de Bencatel	44	51	48

* - Estes ensaios não foram realizados.

No quadro 3.3 são apresentados os valores da resistência à compressão determinados a partir dos valores médios da dureza Schmidt. Estes valores foram determinados a partir de um ábaco que relaciona a dureza Schmidt com a resistência à compressão em função do peso específico da rocha e da inclinação entre o martelo e o plano de ensaio [8].

Quadro 3.3 – Valores da resistência à compressão, σ_c , determinados a partir da dureza Schmidt, para as rochas ensaiadas

Tipo de rocha	Valor médio da dureza Schmidt	Peso específico da rocha (kN/m ³)	σ_c (Mpa)
Calcário de Arruda dos Vinhos 1	*	*	*
Calcário de Arruda dos Vinhos 2	43	25,4	93
Calcário de Rio Maior	47	24,3	100
Granito de Alpalhão	60	26,2	246
Mármore de Bencatel	48	26,3	135

* - Estes ensaios não foram realizados.

4 ENSAIOS REALIZADOS SOBRE OS AGREGADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Os agregados foram submetidos ao ensaio de Los Angeles com o objectivo de avaliar o seu comportamento ao desgaste. Foi escolhido este ensaio não só tendo em vista a aplicação dos agregados, em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários, mas também por ser o ensaio preconizado no caderno de encargos da ex-JAE para avaliar o comportamento dos agregados ao desgaste.

Os ensaios foram realizados em agregados de calcário, granito e mármore, tal como para os ensaios realizados nas rochas. As amostras de cada um dos tipos de agregado, colhidas em *stocks* de britagem, são provenientes do mesmo local de origem que as rochas estudadas referidas no ponto anterior.

O ensaio de desgaste de Los Angeles foi efectuado de acordo com a especificação do LNEC E237 [2], usando a composição granulométrica A (fracção granulométrica entre 9,51 e 38,1 mm), devido à granulometria dos agregados.

No quadro 4.1 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de Los Angeles realizados nos diferentes agregados estudados.

Quadro 4.1 – Valores do desgaste de Los Angeles, LA, obtidos para os agregados estudados

Características	Agregados estudados				
	Calcário de Arruda dos Vinhos 1	Calcário de Arruda dos Vinhos 2	Calcário de Rio Maior	Granito de Alpalhão	Mármore de Bencatel
LA (%) (Granulometria A)	29	31,4	31	28	35

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Analisando os resultados obtidos na caracterização mecânica tanto dos materiais rochosos como dos agregados pode verificar-se que o granito de Alpalhão apresenta em geral melhores características mecânicas e que o mármore de Bencatel apresenta valores de resistência inferiores. Este facto deve-se à natureza petrográfica de cada uma das rochas, salientando não só o modo de formação de cada uma delas, mas também a sua composição mineralógica. O granito é uma rocha composta em grande parte por feldspato e quartzo que são minerais de elevada dureza, embora o feldspato apresente clivagem. O mármore é composto por grãos de calcite que é um mineral de dureza mais baixa e com clivagem.

No caso dos calcários, é possível verificar que, embora com composições semelhantes, apresentam valores de resistência diferentes, ainda que dentro da mesma formação. Este facto pode estar relacionado não só com o modo de formação mas também com as acções a que os maciços rochosos estiveram sujeitos ao longo do tempo.

5.1 Correlações entre rochas e agregados

5.1.1 Correlações entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles, LA

Na figura 5.1 mostra-se a variação entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles, LA, para as rochas e agregados ensaiados. Para os três tipos de regressão estudados (linear, exponencial e logarítmica), verifica-se a existência de uma forte correlação negativa, sendo os valores do coeficiente de correlação, r , são -0,93; -0,93; -0,96 e os valores do coeficiente de determinação, r^2 , são 0,87; 0,87; 0,91 para o ajustamento linear, exponencial e logarítmico, respectivamente. Assim, o ajustamento dos dados à função logarítmica, apresentado na figura 5.1, corresponde ao modelo de análise que melhor exprime a correlação entre $I_{s(50)}$ e o desgaste de LA.

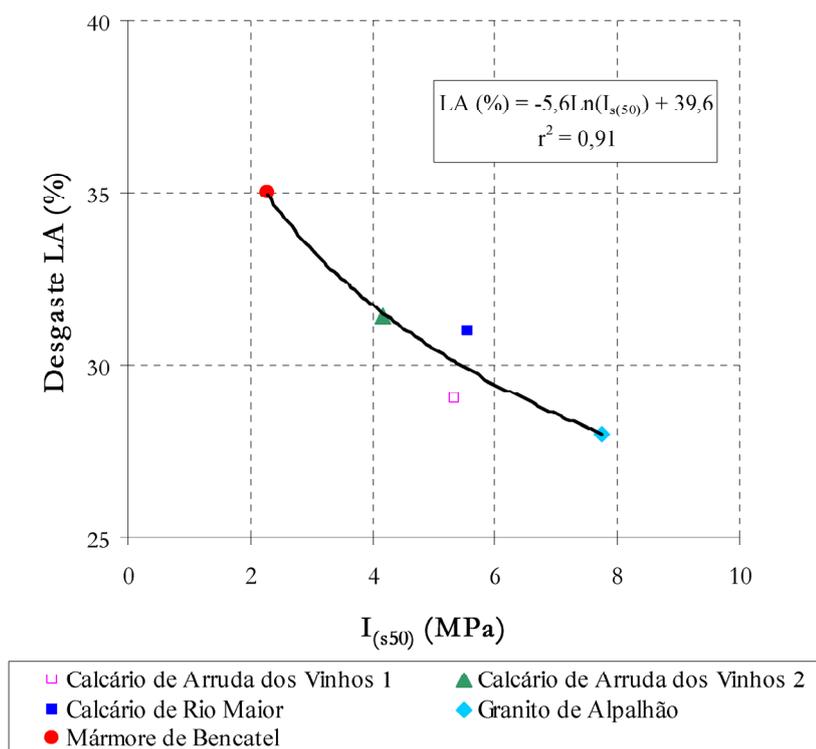


Figura 5.1 – Correlação entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles, LA, para os materiais em estudo.

O estabelecimento de correlações entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles foi efectuada por outros autores. Por exemplo, Al-Harathi [1] efectuou este estudo para

rochas e agregados de origem magmática, metamórfica e sedimentar e Irfan [4] efectuou este estudo para rochas e agregados de origem granítica.

O gráfico da figura 5.2 mostra a comparação das diferentes correlações entre a resistência à carga pontual e o desgaste de Los Angeles, obtidas nos estudos realizados por Al-Harhi, por Irfan e no presente trabalho.

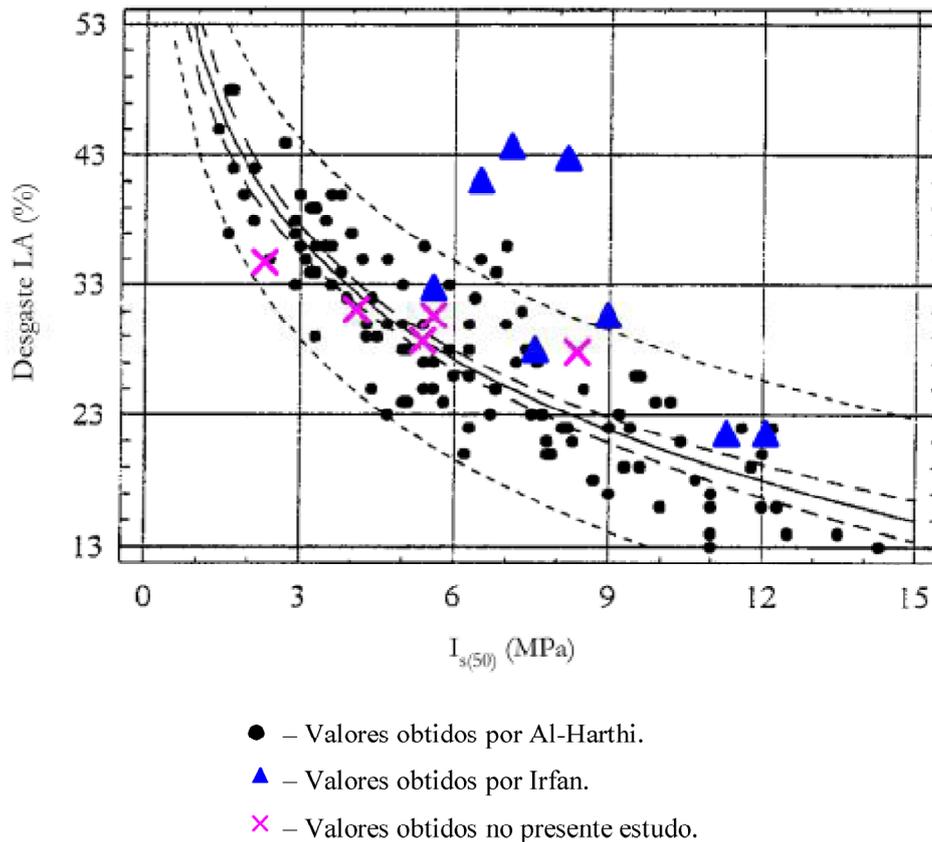


Figura 5.2 – Comparação entre os valores obtidos por Al-Harhi, Irfan e no presente estudo, relativamente à correlação entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles, LA.

Da análise realizada neste estudo e dos outros autores sobre a relação entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles, LA, pode afirmar-se que o desgaste dos materiais aumenta com a diminuição da sua resistência. A correlação entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles, LA, obtida por Al-Harhi [1] foi negativa e o modelo logarítmico o que melhor a representa, com um coeficiente de correlação, $r = -0,89$ e o coeficiente de determinação, $r^2 = 0,79$.

Por outro lado, Irfan [4] propôs uma correlação linear entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles, LA, que se revelou fraca e negativa ($r^2 = 0,51$), com coeficiente de correlação, $r = -0,71$.

Pela análise da figura 5.2 é possível verificar que alguns dos valores obtidos no estudo realizado por Irfan se afastam dos valores apresentados no estudo realizado por Al-Harhi e no presente

trabalho, embora o valor obtido para o granito de Alpalhão seja semelhante aos valores obtidos por Irfan. Contudo, seria necessário realizar mais ensaios, tanto no âmbito deste estudo como no de Irfan, para confirmar a tendência da correlação obtida por este para materiais graníticos. Em relação aos resultados apresentados neste trabalho eles corroboram os resultados apresentados no estudo elaborado por Al-Harti.

5.1.2 Correlações entre a resistência à compressão, σ_c , determinada a partir da dureza Schmidt, e o desgaste de Los Angeles, LA

Para os materiais em estudo os valores de resistência à compressão uniaxial, σ_c , obtidos a partir da dureza Schmidt, foram relacionados com os valores de desgaste de Los Angeles, LA. De acordo com os vários tipos de correlações estudadas estas são fortes e negativas e os valores do coeficiente de correlação, r , são -0,86; -0,88; -0,91 e os valores do coeficiente de determinação, r^2 , são 0,74; 0,78; 0,82 para o ajustamento linear, exponencial e logarítmico, respectivamente. O modelo de análise que melhor exprime a correlação entre a dureza Schmidt e o desgaste de Los Angeles é o modelo logarítmico apresentado no gráfico da figura 5.3. Esta figura mostra apenas quatro pontos uma vez que não foi feito o ensaio com o martelo de Schmidt no calcário de Arruda dos Vinhos 1.

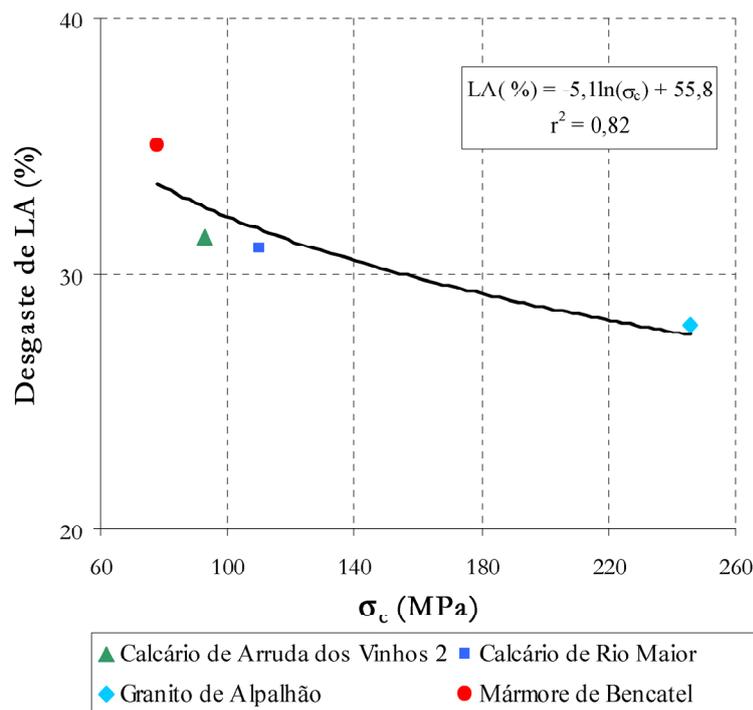


Figura 5.3 – Correlação entre a resistência à compressão uniaxial, σ_c (determinada a partir da dureza Schmidt) e o desgaste de Los Angeles, LA, para os materiais em estudo.

O estabelecimento de correlações entre a resistência à compressão uniaxial, σ_c (determinada a partir da dureza Schmidt) e o desgaste de Los Angeles, LA, foi efectuada por outros autores. Por exemplo Kazi e Al-Mansour [8] estudaram a correlação entre a resistência à compressão, determinada a partir do martelo de Schmidt, e o valor de desgaste de Los Angeles para rochas e agregados de origem vulcânica e plutónica com composição de básica a ácida. A correlação

encontrada por estes autores foi forte, não linear e negativa, não tendo sido efectuada nenhuma análise estatística para determinar o coeficiente de correlação ou obter uma equação que permita estabelecer a correlação.

Também Al-Harhi [1] estabeleceu para materiais de origem magmática, metamórfica e sedimentar a correlação entre os valores da resistência à compressão da rocha, determinada a partir da dureza Schmidt, e os valores de desgaste de Los Angeles obtidos para os agregados. A correlação foi negativa e o modelo que melhor representou esta correlação foi o logarítmico com coeficiente de correlação, $r = 0,89$.

No gráfico da figura 5.4 faz-se a comparação das correlações, entre a resistência à compressão uniaxial (obtida a partir da dureza Schmidt) e o desgaste de Los Angeles, obtidas nos estudos realizados por Al-Harhi e no presente trabalho. Da análise da figura 5.4 é possível verificar que os valores obtidos no presente estudo corroboram os obtidos no estudo realizado por Al-Harhi.

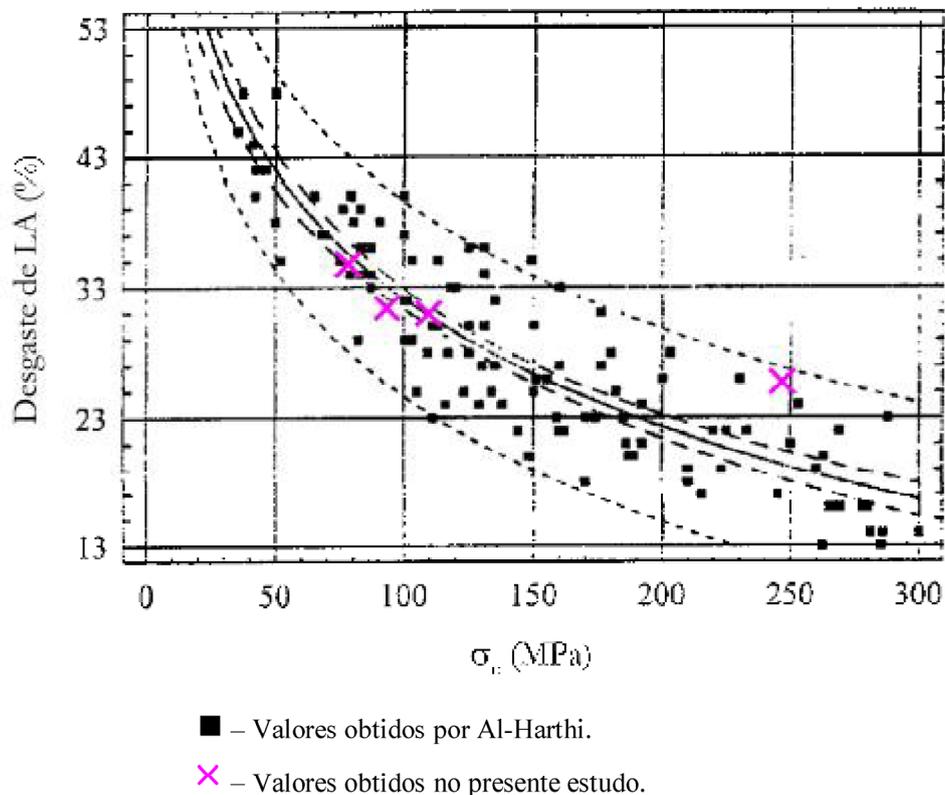


Figura 5.4 – Comparação entre os valores obtidos por Al-Harhi e no presente estudo, relativos à correlação entre a resistência à compressão uniaxial, σ_c , (obtidos a partir da dureza Schmidt) e o desgaste de Los Angeles, LA.

No quadro 5.1 são ainda apresentados os valores mínimos da resistência à carga pontual e resistência à compressão, determinada a partir da dureza Schmidt, obtidos para os materiais estudados neste trabalho e para os materiais estudados por Al-Harhi [1], a partir dos quais se pode verificar a aplicabilidade dos materiais em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários.

As equações apresentadas no quadro 5.1 foram determinadas a partir dos valores médios obtidos no estudo realizado por Al-Harhi e neste estudo. Os valores mínimos a considerar para a resistência à carga pontual e para a resistência à compressão foram determinados a partir dos valores máximos de desgaste de Los Angeles de 45 e 40 %, admitidos no caderno de encargos da ex-JAE [7], para os materiais a aplicar em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários, respectivamente.

Quadro 5.1 – Valores mínimos das propriedades a determinar nas rochas para fins rodoviários

Equação	r	Aplicação em sub-bases	Aplicação em bases
$LA = -12,4 \ln(I_{s(50)}) + 49,7$	-0,98	$I_{s(50)} \geq 1,5 \text{ MPa}$	$I_{s(50)} \geq 2,2 \text{ MPa}$
$LA = -12,8 \ln(\sigma_c) + 91,6$	-0,94	$\sigma_c \geq 38 \text{ MPa}$	$\sigma_c \geq 56 \text{ MPa}$

6 CONCLUSÕES

Verificou-se a existência de correlações entre os parâmetros de resistência obtidos para as rochas originais e para os agregados. Foram também feitas comparações entre os resultados obtidos neste estudo e os de trabalhos realizados por outros autores.

Pela análise do presente estudo foi possível concluir que existe uma proporcionalidade razoavelmente consistente entre a resistência dos agregados ao desgaste de Los Angeles e a propriedade resistência dos materiais da rocha mãe. As correlações verificadas fornecem um método quantitativo de aceder à qualidade dos agregados em relação ao desgaste, determinado pelo ensaio de Los Angeles.

A correlação existente entre a resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, e o desgaste de Los Angeles, LA, é forte e negativa, pois a valores mais elevados da resistência à carga pontual correspondem a valores mais baixos de desgaste de Los Angeles. O modelo encontrado que melhor exprime essa correlação é o logarítmico. Em relação à comparação dos resultados obtidos neste estudo com o estudo realizado por outros autores podemos concluir que os valores obtidos corroboram os valores apresentados por Al-Harhi, onde o modelo de estudo que melhor satisfaz a correlação também é o logarítmico. Em relação ao estudo de Irfan apenas foi possível comparar com o granito de Alpalhão, que não se afasta dos outros resultados.

A correlação entre a resistência à compressão, σ_c , determinada a partir da dureza Schmidt, e o desgaste de Los Angeles, LA, é forte e negativa. Kazi e Al-Mansour também apresentam conclusões idênticas para rochas plutónicas e vulcânicas.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Al-Harhi, A.A. (2001) A field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate, Bulletin Engineering Geology and Environment 60: 193-200.
- [2] Especificação LNEC 237 – 1970 “Agregados. Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [3] http://www.igm.pt/estatisticas/min_roc/roc_ind/producao/producao00-01.htm. Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa.
- [4] Irfan, T. Y. (1994) – “Aggregate properties and resources of granitic rocks for use in concrete in Hong Kong”. Q. J. Eng. Geol., 27, pp. 25 – 38.
- [5] ISRM – Commission on Testing Methods (1977) – Suggested Method for Determining of the Schmidt Rebound Hardness. Pergamon Press, pp. 101–102.

- [6] ISRM – Commission on Testing Methods (1985) – Suggested Method for Determining Point Load Strength. Pergamon Press, pp. 53 – 60.
- [7] JAF (1998) – Caderno de Encargos-tipo para a execução de empreitadas de construção. Junta Autónoma das Estradas, Lisboa.
- [8] Kazi, A.; Al-Mansour, Z. R. (1980) – “Empirical relationship between Los Angeles abrasion and Schmidt hammer strength tests with application to aggregates around Jeddah”. Q. J. Eng. Geol., 13(1), pp. 45 – 52.