

Capítulo 6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

6.1. Introdução

Este capítulo apresenta e analisa os resultados dos ensaios descritos no Capítulo 5. Inicialmente são caracterizadas as propriedades das partículas e da rocha do enrocamento e, posteriormente, são analisadas as características do enrocamento como meio granular. O capítulo enfatiza a influência da alteração no comportamento dos enrocamentos, em especial, de basalto.

A Tabela 6.1 proporciona adequada visualização das variáveis consideradas em cada tipo de ensaio relacionados no Capítulo 5. De acordo com a tabela, as categorias de ensaios foram divididas em função do tipo de amostra: rocha, partículas ou enrocamento.

6.2. Ensaio nas partículas e na rocha do enrocamento

6.2.1. Caracterização petrográfica e química

Foi realizada a caracterização petrográfica e química visando a avaliação dos efeitos da alteração na estrutura e na composição mineralógica do basalto alterado no laboratório. Inicialmente, foi realizada a observação das lâminas delgadas dos basaltos. As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Furnas a partir de fragmentos de basalto com diâmetro nominal de 25,4mm. As Figuras 6.1 a 6.6 ilustram as imagens das lâminas obtidas em microscópio óptico com luz natural. São apresentadas imagens da borda e do centro dos fragmentos. As imagens das bordas foram feitas a 2mm da superfície das partículas. A descrição mineralógica das lâminas é a mesma feita para o basalto intacto da Pedreira apresentada no Apêndice I.

Tabela 6.1 - Variáveis consideradas no programa experimental para cada tipo de ensaio.

Ensaio	tipo de amostra	Variáveis consideradas													
		<i>litologia</i>	<i>alteração no campo</i>	<i>alteração no laboratório</i>	<i>dimensão das partículas</i>	<i>tipo de equipamento</i>	<i>saturação das partículas</i>	<i>densidade relativa</i>	<i>tipo de granulometria</i>	<i>equipamento de grandes dimensões</i>	<i>dimensão do corpo de prova (efeito de escala)</i>	<i>grau de fraturamento das partículas</i>	<i>D/d_{max}</i>	<i>inundação do corpo de prova</i>	<i>saturação por submersão do corpo de provas</i>
petrografia	rocha	X	X	X											
análise química	rocha	X	X	X											
ensaio de lixiviação	rocha	-	o	X											
ciclos de umidade	rocha	-	o	X											
compressão uniaxial	rocha	X	X	X											
compressão diametral	rocha	X	X	X											
absorção	partícula	X	X	X	X										
coeficiente de forma	partícula	X	X	X	X										
densidade específica	partícula	X	X	X	X	X									
carregamento pontual	partícula	X	X	X	X	-	X								
fraturamento de partículas	partícula	X	X	X	X	-	X								
esclerometria	partícula	X	X	-	-	-	-								
desgaste	partícula	X	X	X	-	X	-								
ensaio de lixiviação	enrocamento	-	o	X	o	-	o	-	-	X					
ciclos de umidade	enrocamento	-	o	X	o	-	o	-	-	-					
g_{max} e g_{min}	enrocamento	X	X	X	o	X	o	-	X	-					
absorção	enrocamento	X	X	X	o	-	o	-	X	-					
inclinação de talude natural	enrocamento	X	X	-	o	-	o	-	X	-	<i>dimensão do corpo de prova (efeito de escala)</i>	<i>grau de fraturamento das partículas</i>	<i>D/d_{max}</i>	<i>inundação do corpo de prova</i>	<i>saturação por submersão do corpo de provas</i>
compressão unidimensional	enrocamento	X	X	X	o	X	o	X	X	X	X	X	-	X	X
compressão triaxial	enrocamento	X	X	X	o	-	o	X	-	X	-	-	-	-	-
cisalhamento direto	enrocamento	X	X	X	o	X	o	X	X	X	X	-	X	-	X
compressão isotrópica	enrocamento	-	-	-	o	-	o	X	-	-	-	-	-	-	-

D ... dimensão mínima do corpo de prova;

 d_{max} ... dimensão máxima da partícula;

X ... variável estudada;

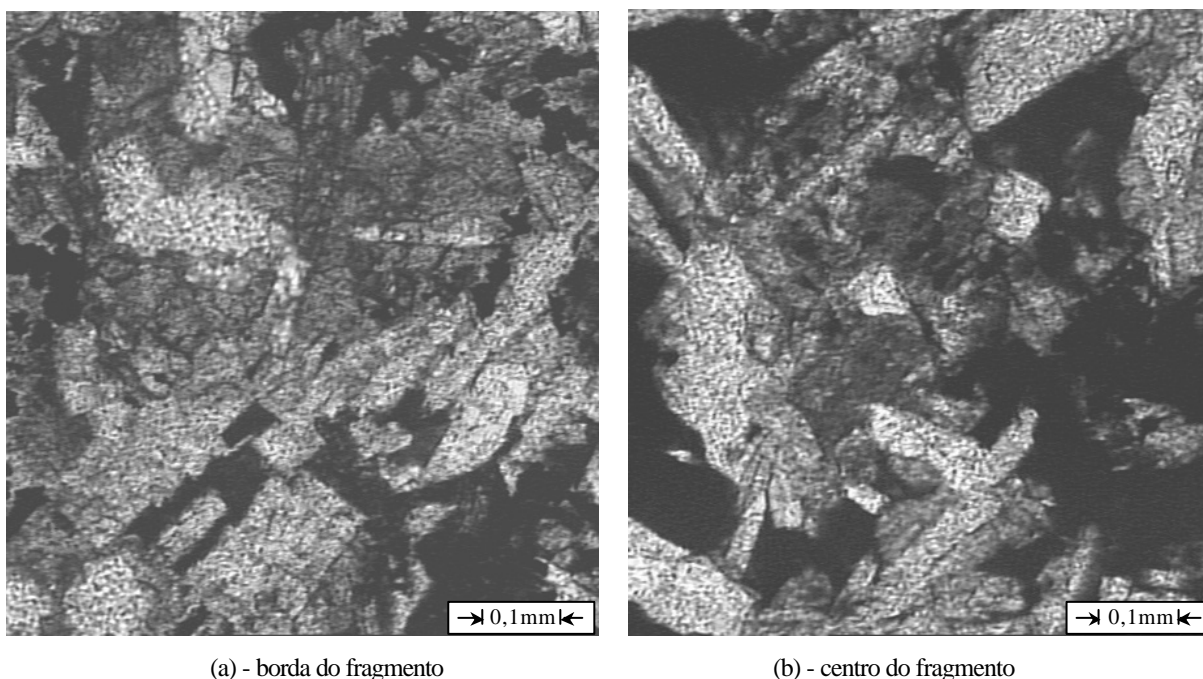
o ... não é uma variável;

- ... variável não estudada.

Observa-se que a alteração no laboratório por lixiviação contínua provoca a microfissuração dos minerais próximos à superfície dos fragmentos, principalmente dos plagioclásios. O nível de microfissuração aumenta com o número de horas de lixiviação contínua da rocha, conforme se verifica nas Figuras 6.1 a 6.5. Na amostra submetida a ciclos de umidade, não se observa microfissuração significativa na superfície das partículas (Figura 6.6).

Além da microfissuração superficial, na amostra com 3200 horas de lixiviação contínua, ocorre alteração química de minerais próximos à superfície da partícula (Figura 6.7). O centro das partículas permanece inalterado em todas amostras alteradas no laboratório.

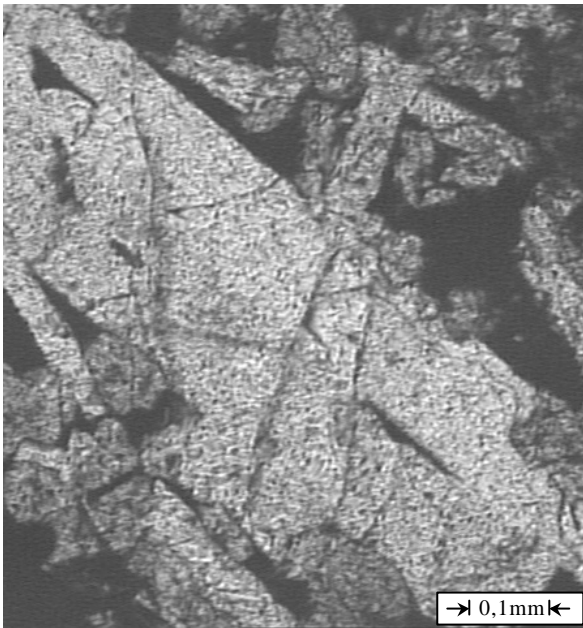
Observa-se a abertura de fissuras pré-existentes da rocha devido a alteração no laboratório (Figura 5.5). Esta figura ilustra o aspecto das fissuras após a abertura provocada pela lixiviação contínua de um corpo de prova de basalto da Pedreira. Na superfície das fissuras abertas, ocorre a concentração do produto de alteração do material de preenchimento. A alteração por ciclos de umidade também provoca a abertura de fissuras, porém não ocorre a concentração de produtos de alteração na superfície.



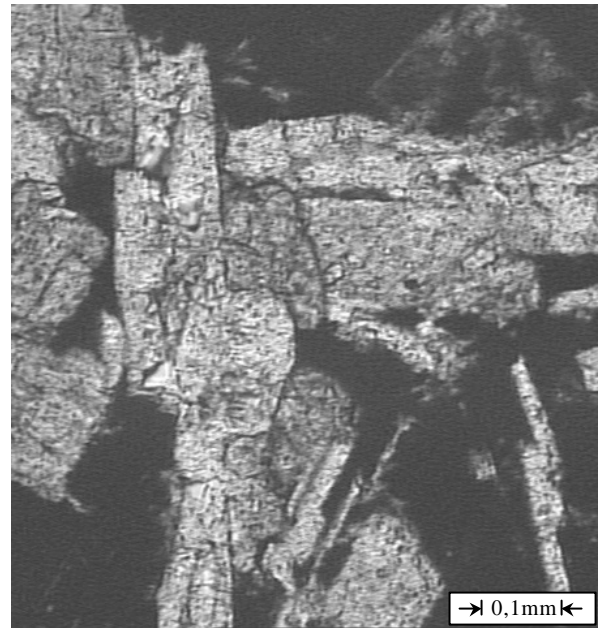
(a) - borda do fragmento

(b) - centro do fragmento

Figura 6.1 - Fotografia de lâmina petrográfica do basalto da Pedreira Rio Grande - 100 horas de lixiviação.

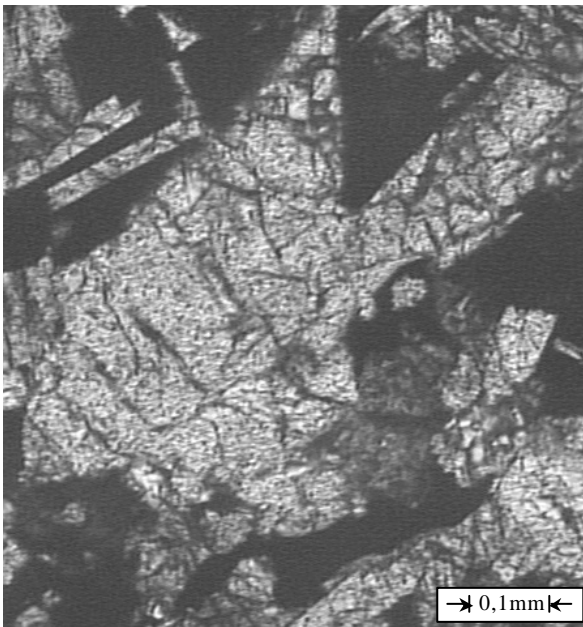


(a) - borda do fragmento

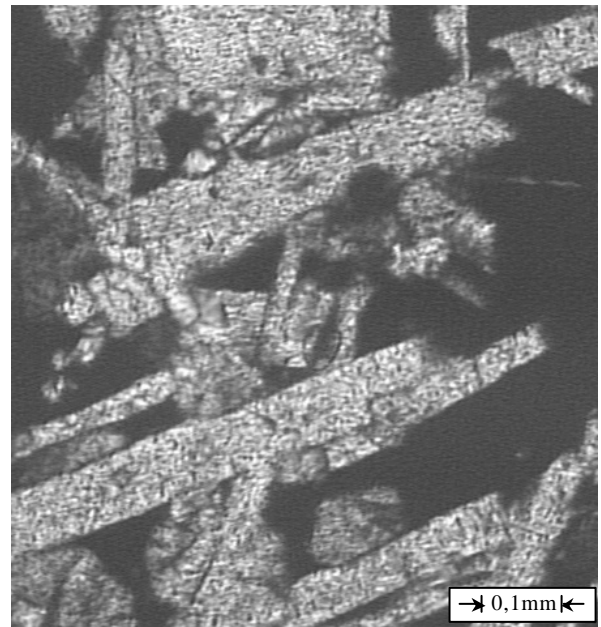


(b) - centro do fragmento

Figura 6.2 - Fotografia de lâmina petrográfica do basalto da Pedreira Rio Grande - 240 horas de lixiviação.

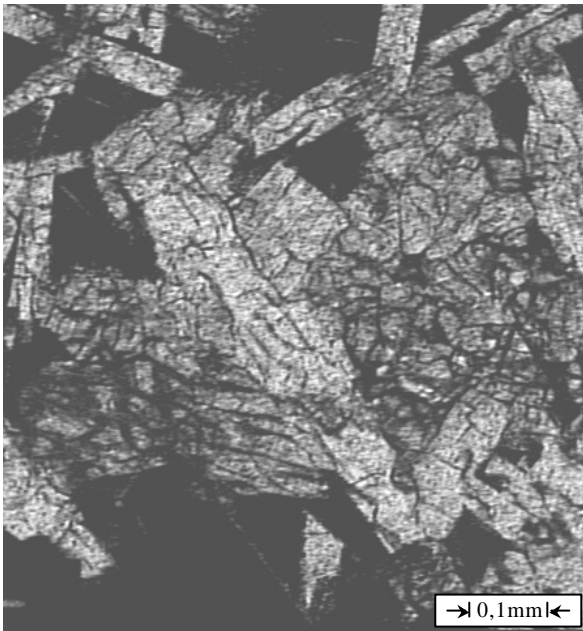


(a) - borda do fragmento

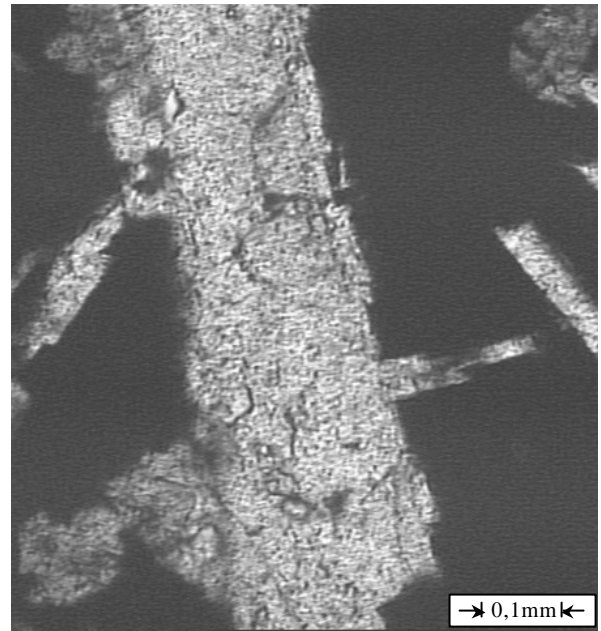


(b) - centro do fragmento

Figura 6.3 - Fotografia de lâmina petrográfica do basalto da Pedreira Rio Grande - 600 horas de lixiviação.

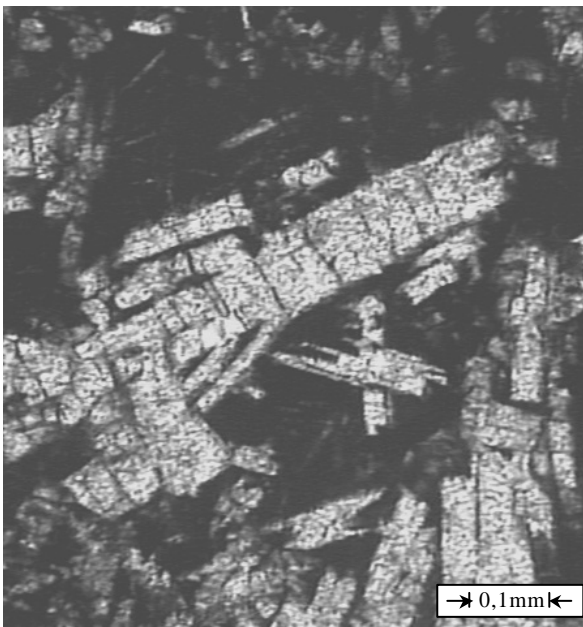


(a) - borda do fragmento

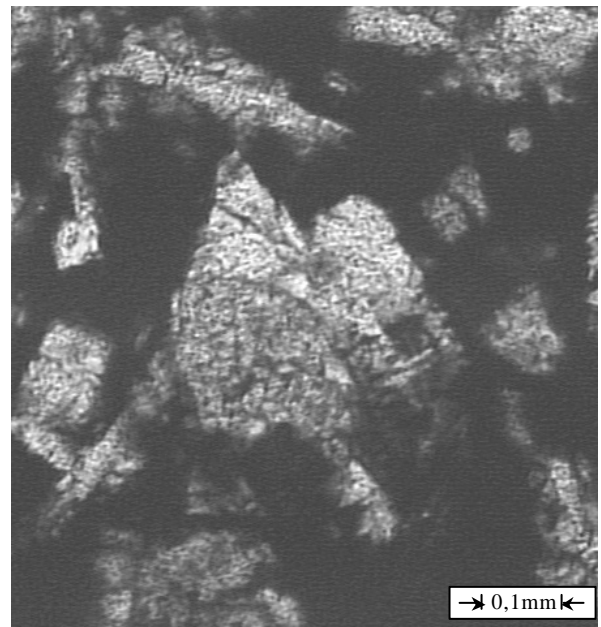


(b) - centro do fragmento

Figura 6.4 - Fotografia da lâmina petrográfica do basalto da Pedreira Rio Grande - 1500 horas de lixiviação.

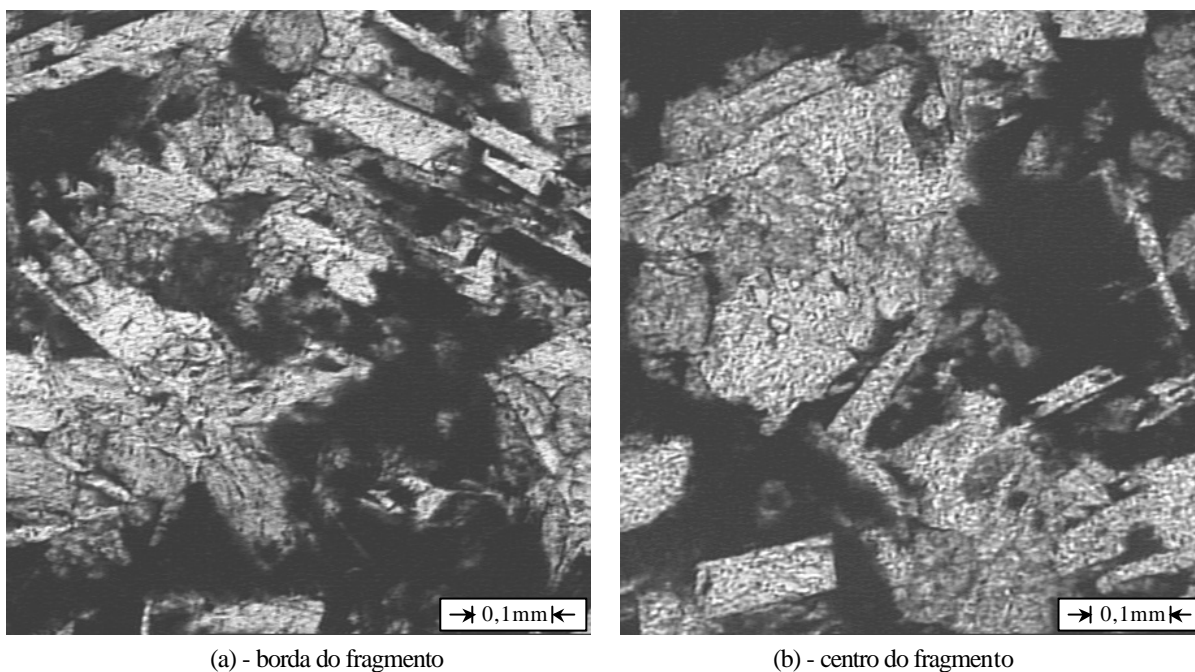


(a) - borda do fragmento



(b) - centro do fragmento

Figura 6.5 - Fotografia de lâmina petrográfica do basalto da Pedreira Rio Grande - 3200 horas de lixiviação.



(a) - borda do fragmento

(b) - centro do fragmento

Figura 6.6 - Fotografia de lâmina petrográfica do basalto da Pedreira Rio Grande - 100 ciclos de umidade.

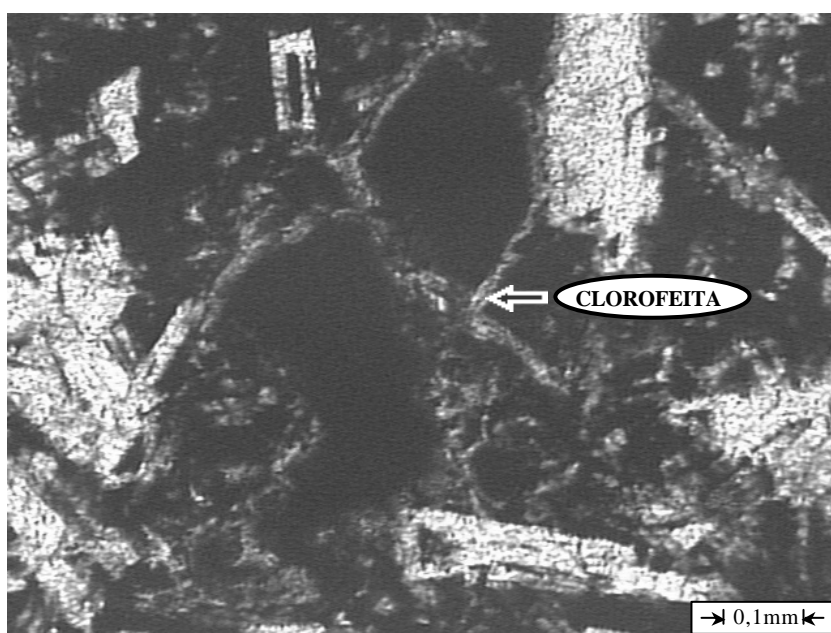


Figura 6.7 - Fotografia de lâmina petrográfica mostrando alteração química de clorofeíta próxima à superfície de uma partícula - 3200 horas de lixiviação.

Observa-se ainda que a capa de alteração apresenta maior concentração de H_2O^+ (água livre) e maior perda ao fogo que o basalto intacto (Tabela 6.2). Tais resultados indicam a formação de argilominerais pela alteração do basalto no campo. Além dos argilominerais

serem freqüentes subprodutos da alteração de rochas, eles possuem grande capacidade de absorção de água e são os principais minerais queimados nos ensaios de perda ao fogo. Assim, estes resultados são bons indicadores do estado alterado da rocha.

Tabela 6.2 - Resultados das análises químicas dos basaltos intacto e alterados no campo ou no laboratório.

Material			Teor de elementos constituintes (%)											
Tipo	Origem	Alteração	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	Perda ao fogo
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	45,2	13,5	11,0	6,4	8,3	5,1	3,2	1,7	0,5	0,4	5,2	3,5
	Pedreira Rio Grande	Intacto	50,0	13,0	7,2	7,5	9,4	4,8	2,6	2,6	0,7	0,4	1,7	0,6
		100 h de lixiviação	49,5	12,9	7,9	7,5	9,3	4,6	2,6	2,4	0,8	0,4	1,6	1,4
		240 h de lixiviação	49,6	12,3	7,0	8,4	9,1	4,7	2,6	2,6	0,7	0,4	2,0	1,5
		600 h de lixiviação	49,6	12,3	7,3	8,0	9,2	4,8	2,6	2,6	0,8	0,4	2,0	1,4
		1500 h de lixiviação	49,8	12,5	6,7	8,3	9,1	4,6	2,5	2,5	0,7	0,4	1,5	1,4
		3200 h de lixiviação	49,5	12,4	6,7	8,6	9,1	4,6	2,6	2,6	0,7	0,4	2,0	1,1
		100 ciclos de umidade	49,7	12,4	6,4	8,8	9,0	4,7	2,5	2,5	0,8	0,4	2,0	1,6

O basalto intacto corresponde a zero anos de alteração no campo e zero horas de lixiviação

Métodos de determinação:

FeO por titulação;

Perda ao fogo por calcinação a 1000°C até peso constante;

H₂O⁺ por método de Penfield;

Demais elementos por determinação por fluorescência de raios-X e fusão com tetraborato de lítio.

A Tabela 6.2 também apresenta os resultados das análises químicas feitas no basalto intacto, nos basaltos alterados no laboratório e na capa de alteração do basalto da Barragem de Marimbondo (alterado no campo).

Como referido no item 4.2.3, vale lembrar que devido a alteração natural do basalto, dá-se o aumento da concentração do ferro Fe_2O_3 na capa de alteração. Este aumento é provocado pela oxidação dos minerais férricos (magnetita) presentes na rocha. O ferro que se precipita durante o processo de alteração se concentra na superfície da rocha alterada. Tal concentração é justificada pela baixa mobilidade do ferro, o que dificulta a sua lixiviação. No basalto alterado no laboratório não se verificam variações significativas nas concentrações de

ferro. No entanto, nota-se uma coloração avermelhada na superfície dos fragmentos de basalto lixiviados, indicando a concentração do ferro na superfície das partículas.

As menores concentrações de SiO_2 , Na_2O , CaO e K_2O na capa de alteração do basalto de Marimbondo, em relação ao basalto intacto, indicam que os elementos lixiviados são a sílica, o sódio, o cálcio e o potássio. Assim, a alteração no laboratório não provocou perda significativa destes elementos. No entanto, esta perda foi suficiente para modificar o pH das soluções de lixiviação de 7 para cerca de 10,5 em 500 horas de lixiviação contínua (Figura 6.8). A modificação do pH se deve à formação de hidroxila OH^- , resultante principalmente da ionização de sódio e cálcio provenientes da lixiviação da rocha por hidrólise (troca dos álcalis da rocha por H^+ ou H_2O^+). Considerando um corpo de prova de enrocamento de 590N ($\cong 60Kg$) lixiviado por 15 litros de solução aquosa (condições semelhantes aos ensaios de lixiviação executados) e através do equilíbrio entre os íons, estima-se que são necessários cerca de 1,8 a 4,2g de rocha lixiviada para provocar tal variação de pH , dependendo da concentração dos íons Na^+ e Ca^{2+} na rocha. Destaca-se que o pH da solução utilizada nos ciclos de umidade não variou significativamente. Assim, a não troca da solução de lixiviação durante o ensaio sugere que os álcalis permanecem em solução, como mostra a variação do pH , reduzindo a capacidade de reação da solução com a rocha. Com a troca da solução durante o ensaio, espera-se que as reações químicas ocorram com mais facilidade, propiciando a alteração química da rocha.

Desta forma, conclui-se que a alteração do basalto da Pedreira no laboratório é provocada basicamente por processos físicos de alteração. No entanto, devido ao crescente nível de fissuração da rocha, espera-se uma contribuição mais significativa dos processos químicos de alteração.

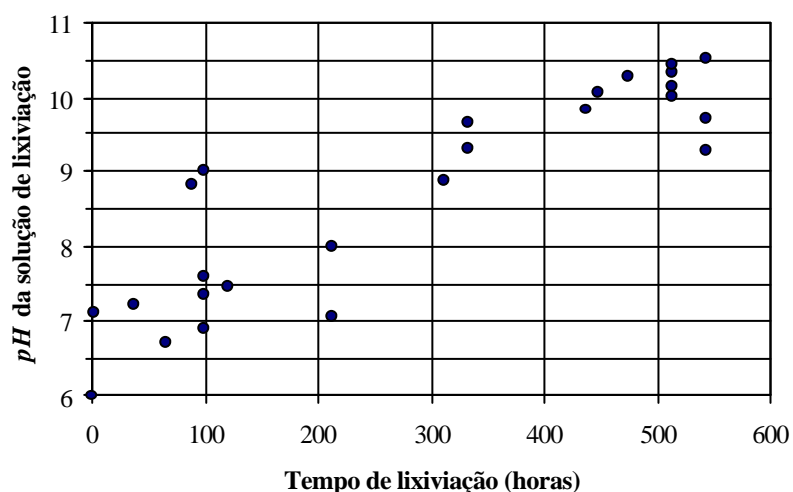


Figura 6.8 - Variação do pH da solução com o tempo de lixiviação.

6.2.2. Densidade específica das partículas

A Tabela 6.3 apresenta os valores de densidade específica real seca G_s , saturada com superfície seca G_{sss} e aparente seca G_{ap} , das partículas dos diferentes materiais estudados. Verifica-se que a alteração natural do basalto da Barragem provoca uma redução de 1 a 2% na densidade específica das partículas. No entanto, a alteração do basalto no laboratório não gera modificação significativa na densidade específica das partículas. Verifica-se ainda uma diferença entre os valores de G_s determinados por diferentes procedimentos de ensaios. Tal diferença se justifica pela dimensão das partículas utilizadas em cada tipo de ensaio. Espera-se que, na determinação do volume das partículas para o cálculo de G_s , a influência dos vazios internos da rocha (fissuras e poros não-conectados com a superfície do fragmento) aumente com a dimensão das partículas.

Tabela 6.3 - Pesos específicos das partículas de enrocamento.

Material			Densidade específica			
Tipo	Origem	Alteração	G_s (*)	G_s (**)	G_{sss} (**)	G_{ap} (**)
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	2,90	2,86	2,80	2,78
	Pedreira Rio Grande	Intacto	2,94	2,88	2,86	2,85
		100 h de lixiviação	-	2,88	2,85	2,84
		240 h de lixiviação	-	2,88	2,86	2,84
		600 h de lixiviação	-	2,87	2,85	2,84
		1500 h de lixiviação	-	2,88	2,85	2,84
		3200 h de lixiviação	-	2,87	2,85	2,84
		100 ciclos de umidade	-	2,87	2,84	2,83
Granito	Serra da Mesa	São	-	2,62	2,59	2,58

O basalto intacto corresponde a zero anos de alteração no campo e zero horas de lixiviação;

(*) Volume das partículas determinado pelo método do picnômetro e partículas com diâmetro nominal de 4,76mm;

(**) Volume das partículas determinado através do peso submerso e partículas com diâmetro nominal de 25,4mm.

6.2.3. Absorção

A Figura 6.9 apresenta a variação da absorção das partículas em função do diâmetro nominal D_n . Verifica-se que o valor da absorção das partículas de diâmetro D_n superior a 25mm (aproximadamente 1 polegada) é praticamente constante. Para menores diâmetros nominais, a absorção é inversamente proporcional a D_n , o que é explicado pelo aumento da

superfície específica à medida que as partículas têm suas dimensões reduzidas. Nota-se que a absorção do basalto alterado naturalmente de Marimbondo é maior que o basalto intacto da Pedreira.

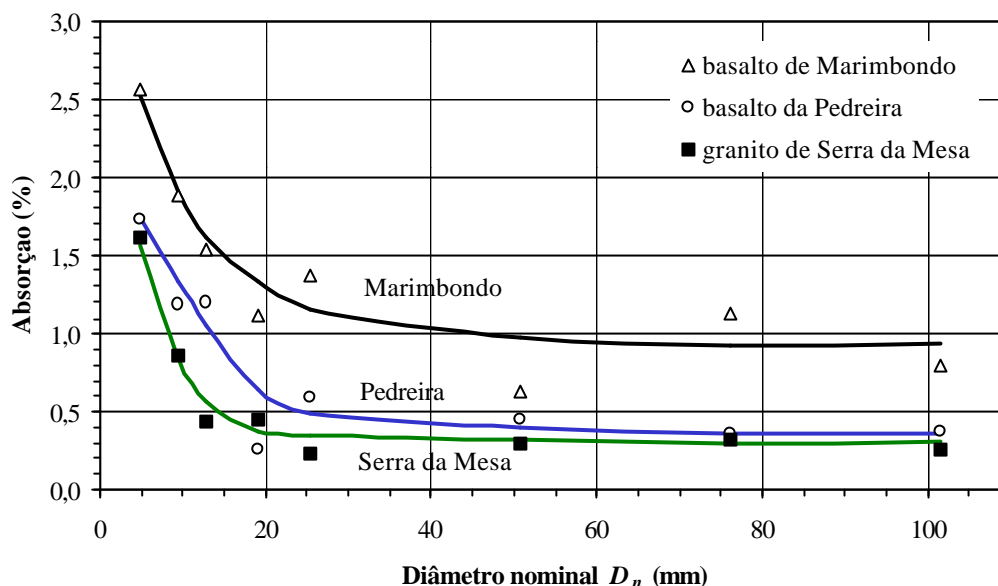


Figura 6.9 - Variação da absorção com o diâmetro nominal D_n das partículas de enrocamento.

A Tabela 6.4 apresenta os valores da absorção das partículas para o diâmetro nominal D_n de 25,4mm (1 polegada) em função do estado de alteração. A alteração natural do basalto provoca um aumento de 127% na absorção das partículas. A alteração no laboratório, por outro lado, indica que a redução não é significativa. Na alteração por lixiviação no laboratório, ocorre a concentração de óxidos na superfície dos fragmentos. Pode-se esperar que eventualmente ocorra uma impermeabilização das partículas e a conseqüente redução da absorção das partículas de basalto.

A fim de evitar a dispersão dos resultados, os ensaios de absorção nos diferentes materiais foram executados simultaneamente, buscando sempre os mesmos procedimentos de ensaio.

6.2.4. Coeficiente de forma

A Tabela 6.5 apresenta os valores médios e o desvio padrão do coeficiente de forma C_f , definido por Marsal (1973a). O procedimento de determinação de C_f é descrito no item

5.5.2. Não há variação significativa do coeficiente C_f em relação ao diâmetro nominal das partículas.

Tabela 6.4 - Valores de absorção para partículas com diâmetro nominal D_n de 25,4mm.

Material			Absorção (%)
Tipo	Origem	Alteração	
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	1,25
	Pedreira Rio Grande	Intacto	0,55
		100 h de lixiviação	0,41
		240 h de lixiviação	0,41
		600 h de lixiviação	0,43
		1500 h de lixiviação	0,45
		3200 h de lixiviação	0,47
		100 ciclos de umidade	0,50

O basalto intacto corresponde a zero anos de alteração no campo e zero horas de lixiviação.

Tabela 6.5 - Valores médios e desvio padrão do coeficiente de forma C_f .

Material	Local	Alteração	Diâmetro nominal D_n (mm)					Média (mm)
			19,1	25,4	38,1	50,8	76,2	
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	1,20±0,23	1,22±0,21	1,21±0,26	1,31±0,16	1,20±0,22	1,23±0,22
	Pedreira Rio Grande	Intacto	1,21±0,24	1,14±0,15	1,3±0,2	1,19±0,18	1,24±0,19	1,21±0,2
		100 h de lixiviação	1,24±0,22	1,22±0,23	1,21±0,19	1,17±0,17	-	1,20±0,2
		240 h de lixiviação	1,30±0,17	1,24±0,21	1,19±0,22	1,14±0,17	-	1,20±0,2
		600 h de lixiviação	1,21±0,31	1,16±0,15	1,04±0,16	1,03±0,13	-	1,08±0,18
		1500 h de lixiviação	1,09±0,19	1,26±0,32	1,07±0,17	1,07±0,18	-	1,12±0,23
		3200 h de lixiviação	1,07±0,13	1,13±0,19	1,14±0,31	1,08±0,31	-	1,11±0,27
		100 ciclos de umidade	1,10±0,21	1,18±0,19	1,15±0,18	1,14±0,18	-	1,15±0,18
Granito	Serra da Mesa	São	1,14±0,3	0,99±0,17	1,13±0,16	1,06±0,12	1,08±0,15	1,08±0,19

O basalto intacto corresponde a zero anos de alteração no campo e zero horas de lixiviação.

Constata-se uma ligeira redução de C_f com o tempo de lixiviação do basalto da Pedreira. Além disso, as partículas alteradas com ciclos de umidade apresentam coeficiente de forma menores que as partículas da Pedreira (basalto intacto).

Espera-se que a alteração no laboratório provoque um aumento da angulosidade das partículas. A abertura das fissuras do basalto da Pedreira, durante o processo de alteração no laboratório, modifica a forma das partículas para uma geometria mais irregular e, conseqüentemente, mais angulosa. No caso da alteração no campo, a associação da abertura das fissuras (que aumenta a angulosidade) com a decomposição superficial (que reduz a angulosidade) faz com que o coeficiente de forma permaneça praticamente constante.

Conforme verificado na Tabela 6.5 e corroborado na Tabela 6.6, a alteração natural do basalto de Marimbondo não provoca modificações relevantes nas formas das partículas. Destaca-se, também, que não foram observadas diferenças visuais significativas entre as formas das partículas de basalto com alteração no laboratório e as de basalto intacto. No entanto, constata-se diferença entre as partículas de granito e as de basalto. Segundo Krumbein e Sloss (1955) e CIRIA (1991), classifica-se as partículas de basalto como angulosas e as de granito como semi-arredondadas.

6.2.5. Carregamento pontual

Os resultados dos ensaios de carregamento pontual (*point load test*), executados em partículas secas e úmidas segundo procedimento descrito no item 5.5.2, são apresentados no Apêndice II.1. O apêndice, indica que a umidade da rocha não influencia significativamente na carga de ruptura pontual das partículas de basalto. A Figura 6.10 apresenta as curvas ajustadas aos resultados dos ensaios com partículas secas. Os parâmetros das curvas ajustadas aos resultados e os valores do coeficiente de correlação R^2 (obtidos pelos procedimentos usuais de regressão estatística) são apresentados na Tabela 6.7. No ajuste buscou-se valores de R^2 próximos de 1. Para isto são usadas as seguintes expressões:

$$P = a \ln(D_e^2) - b \quad , \text{ para as partículas de basalto;} \quad (6.1)$$

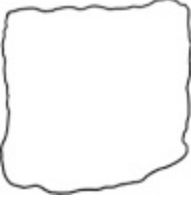













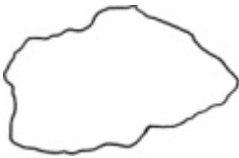
$$P = a D_e^2 - b \quad , \text{ para as partículas de granito;} \quad (6.2)$$

onde a e b são os parâmetros das curvas, P é a carga de ruptura no carregamento pontual em Newtons e D_e é o diâmetro equivalente da partícula em centímetros.

Observa-se que a carga de ruptura P aumenta com o diâmetro D_e (Figura 6.10). Apesar da grande dispersão dos resultados (Tabela 6.7), a alteração natural do basalto provoca uma

redução de aproximadamente 10% da carga de ruptura no carregamento pontual das partículas (para D_e igual a 50mm). A alteração no laboratório também causa uma redução da carga P . Para o basalto com 3200 horas de lixiviação observa-se uma redução de aproximadamente 64% em relação ao basalto intacto (Pedreira) para D_e igual a 50mm. Esta redução aumenta com a dimensão das partículas.

Tabela 6.6 - Forma típicas das partículas de enrocamento (sem escala).

Granito do enrocamento de Serra da Mesa	Basalto do enrocamento de Marimbondo	Basalto da Pedreira Rio Grande
		
		
		
		
		

A perda de carga de ruptura no carregamento pontual das partículas de basalto, devido à alteração por lixiviação no laboratório, aumenta com o tempo de lixiviação.

A partir das cargas de ruptura P , determina-se o índice de carregamento pontual I_s , definido como (Broch e Franklin, 1972):

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (6.3)$$

Tabela 6.7 - Resultados dos ensaios de carregamento pontual.

Material	Local	Alteração	Umidade das partículas	a	b	R^2	$I_{s(50)}$	q_u (MPa)
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	Secas	80,60	40,57	0,7541	8,98	215,52
			Úmidas	83,71	65,59	0,7821	8,15	195,60
	Pedreira Rio Grande	Intacto	Secas	98,36	73,05	0,8422	9,98	239,52
			Úmidas	93,90	79,23	0,7398	8,92	214,08
		100 h de lixiviação	Secas	62,68	25,67	0,4610	7,23	173,52
		240 h de lixiviação	Secas	65,33	33,71	0,5632	7,24	173,76
		600 h de lixiviação	Secas	55,29	12,04	0,3535	6,82	163,68
		1500 h de lixiviação	Secas	47,03	30,18	0,4748	4,97	119,28
		3200 h de lixiviação	Secas	38,34	35,50	0,2572	3,60	86,40
		100 ciclos de umidade	Secas	58,20	7,95	0,4917	7,38	177,12
Granito	Serra da Mesa	São	Secas	6,53	25,43	0,8589	7,59	182,16

O basalto intacto corresponde a zero anos de alteração no campo e zero horas de lixiviação.

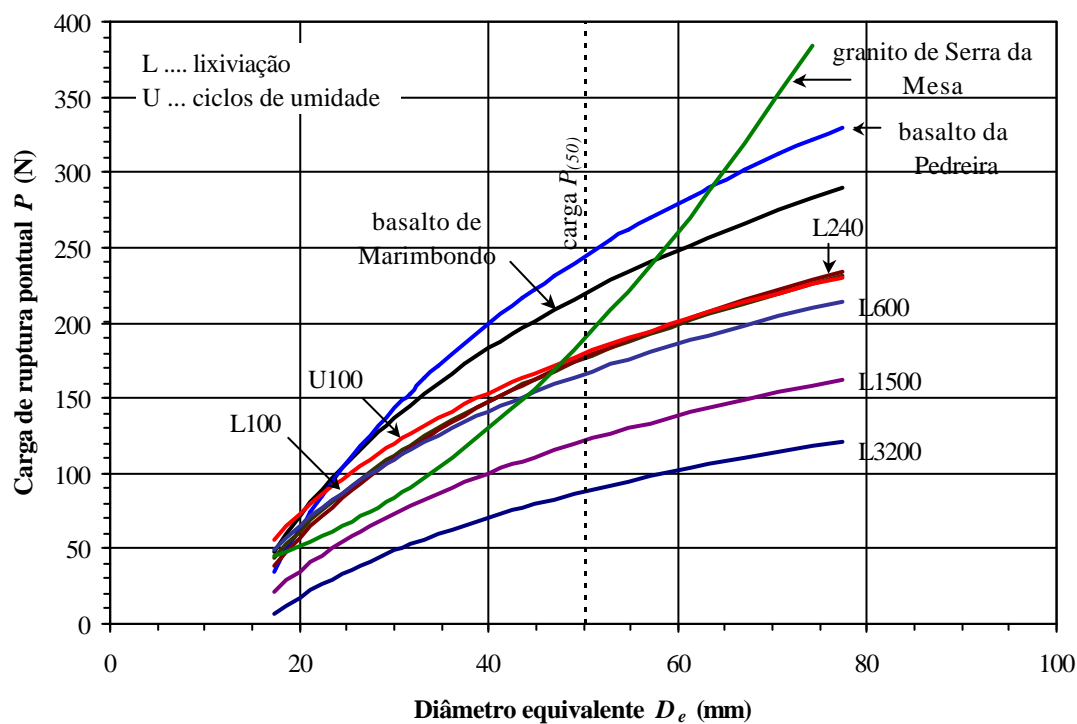


Figura 6.10 - Variação da carga de ruptura pontual P em função do diâmetro equivalente D_e .

A Figura 6.11 mostra a variação de I_s com o diâmetro D_e . Vale ressaltar que a norma recomenda que a indicação do índice de carregamento pontual deve considerar o valor de $I_{s(50)}$ (I_s correspondente ao diâmetro D_e igual a 50mm), conforme indicado na Tabela 6.7. O índice de carregamento pontual diminui com a alteração do basalto. Nos valores de D_e inferiores a 30mm a variação de P não é conclusiva, muito provavelmente devido ao efeito de escala das partículas. Destaca-se que a norma recomenda a execução do ensaio de carregamento pontual em partículas com diâmetros de 30 a 85mm.

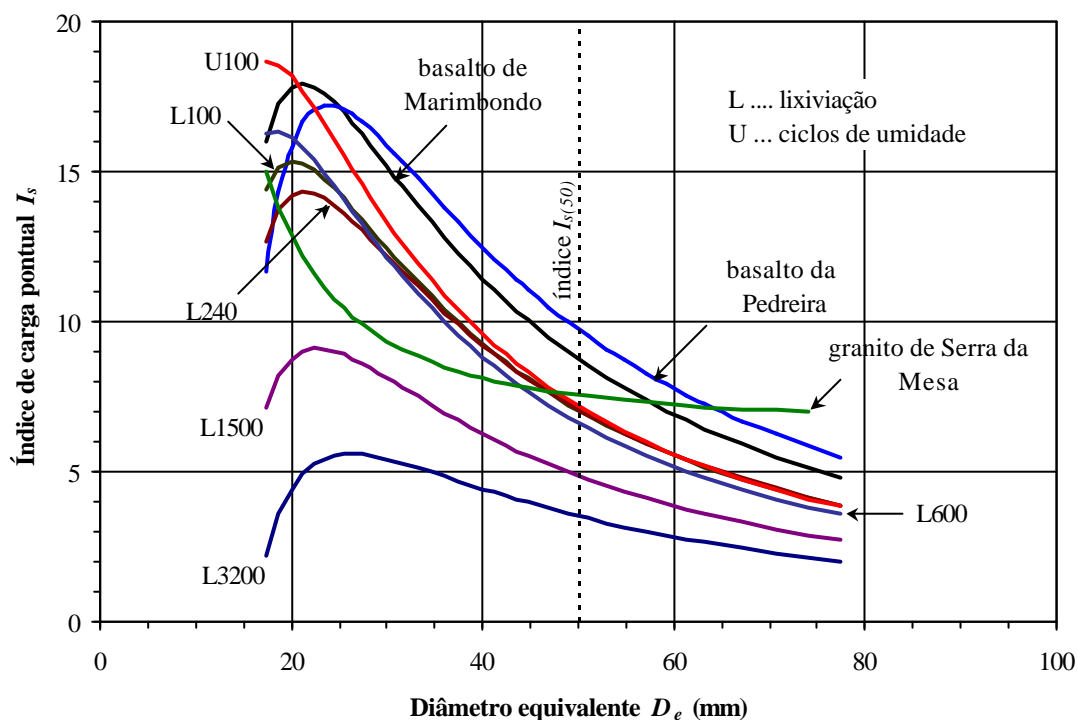


Figura 6.11 - Variação do índice de carregamento pontual I_s em função do diâmetro equivalente D_e .

Dos resultados mostrados nas Figuras 6.10 e 6.11, pode-se observar ainda que a curva referente ao granito tem um padrão de variação distinto das curvas correspondentes aos basaltos. No entanto, os valores de I_s do granito mostram pequena redução para valores de D_e maiores que 50mm. Tal fato não se verifica nos basaltos. Nestas rochas o valor de I_s é significativamente decrescente para valores de D_e maiores que 30mm. Tal aspecto pode estar relacionado à presença de fissuras na rocha basáltica. Espera-se que no processo de britagem as fissuras se propaguem gerando novos fragmentos menores e com menos fissuras que nas

partículas maiores. Isto provoca a redução da taxa de crescimento de P em relação ao diâmetro D_e nos basaltos e, conseqüentemente o decréscimo de I_s com o diâmetro D_e .

Pode-se, ainda, estimar o valor da resistência à compressão uniaxial da rocha q_u através de uma expressão empírica freqüentemente utilizada na prática da engenharia (Goodman, 1989; Hudson e Harrison, 1995) indicado na Tabela 6.7:

$$q_u = 24 I_{s(50)} \quad (6.4)$$

onde q_u é expresso em MPa.

A redução da resistência q_u do basalto lixiviado aumenta com o tempo de lixiviação. Os valores de q_u sugerem ainda uma pequena redução da resistência da rocha devido a alteração natural do basalto no campo.

6.2.6. Ensaio de fraturamento

Os resultados dos ensaios de fraturamento, executados segundo procedimento descrito no item 5.5.2, são apresentados no Apêndice II.2. Do apêndice, observa-se que saturação por submersão provoca uma pequena redução da carga de fraturamento das partículas. A Figura 6.12 mostra as curvas ajustadas aos resultados dos ensaios. A Tabela 6.8 apresenta os parâmetros das curvas ajustadas e os valores do coeficiente de correlação R^2 (obtido pelos procedimentos usuais de regressão estatística). Da mesma maneira que nos ensaios de carregamento pontual, o ajuste buscou valores de R^2 próximos de 1. Para isso utilizou-se as expressões:

$$Q_a = a \ln(D_m) - b \quad , \text{ para as partículas de basalto;} \quad (6.5)$$

$$Q_a = a D_m - b \quad , \text{ para as partículas de granito;} \quad (6.6)$$

onde a e b são os parâmetros das curvas, Q_a é a carga de fraturamento em Newton e D_m é o diâmetro médio das partículas em centímetros.

Considerando D_m igual a 50mm, a alteração natural do basalto provoca uma redução de cerca de 30% na carga de fraturamento das partículas (Figura 2.12). Esta redução, comparada com a perda de carga de 10% no carregamento pontual (item 6.2.5), considerando $D_e \cong D_m = 50\text{mm}$, sugere que a alteração provoca uma maior redução da resistência dos

contatos entre partículas que da resistência das partículas. Assim, com a alteração da rocha, espera-se que uma possível ruptura do enrocamento ocorra inicialmente pela quebra dos contatos entre as partículas e, posteriormente, pela ruptura das partículas do enrocamento.

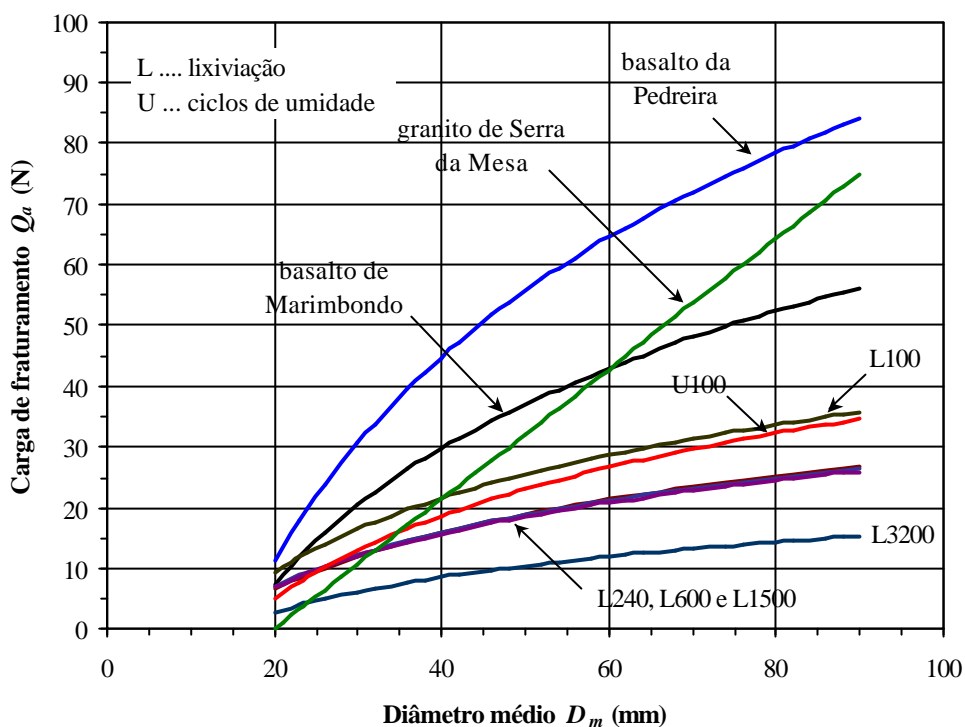


Figura 6.12 - Variação da resistência ao fraturamento com o diâmetro médio das partículas rochosas.

Tabela 6.8 - Parâmetros das curvas ajustadas aos resultados dos ensaios de fraturamento das partículas.

Material	Local	Alteração	Umidade	a	b	R^2
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	Secas	32,40	15,16	0,9244
			Saturadas	28,17	13,85	0,9318
	Pedreira Rio Grande	Intacto	Secas	48,53	22,52	0,9779
			Saturadas	48,94	32,22	0,9731
		100 h de lixiviação	Secas	17,54	2,76	0,4381
		240 h de lixiviação	Secas	13,50	2,83	0,4104
		600 h de lixiviação	Secas	12,96	2,00	0,3595
		1500 h de lixiviação	Secas	12,75	2,03	0,3465
		3200 h de lixiviação	Secas	8,42	3,2	0,4803
100 ciclos de umidade	Secas	19,74	8,68	0,5338		
Granito	Serra da Mesa	São	Secas	10,69	21,35	0,9544

O basalto intacto corresponde a zero anos de alteração no campo e zero horas de lixiviação.

Os baixos coeficientes de correlação apresentados na Tabela 6.8 indicam grande dispersão dos valores da carga Q_a nos basaltos alterados no laboratório. Vale lembrar que foram executados dezoito ensaios em cada amostra lixiviada (Tabela 5.4). No entanto, nota-se que a alteração, tanto natural quanto no laboratório, reduz a carga de fraturamento das partículas de basalto. Tal redução depende do diâmetro médio das partículas, conforme indicado na Tabela 6.12.

A perda de carga de fraturamento das partículas de basalto, devido à alteração por lixiviação no laboratório, aumenta com o tempo de lixiviação.

6.2.7. Ensaio de esclerometria

A Tabela 6.9 apresenta os resultados dos ensaios de esclerometria, executados segundo procedimento descrito no item 5.5.2. Os resultados sugerem que a alteração natural do basalto da Barragem provoca uma redução de aproximadamente $44\pm 14\%$ na resistência à compressão uniaxial q_u da rocha.

Tabela 6.9 - Resultados dos ensaios de esclerometria e valores correspondentes da resistência à compressão uniaxial q_u .

Material	Número de ensaios	Leitura do martelo	Resistência à compressão uniaxial q_u (MPa)
<i>Basalto da Barragem de Marimbondo</i>	144	32,9 ± 9,8	29,5±13,5
<i>Basalto da Pedreira Rio Grande</i>	168	48,3 ± 6,5	51,7±10,2

O valor estimado de q_u utilizando os resultados dos ensaios de esclerometria são superiores aos estimados pelos resultados dos ensaios de carregamento pontual (Tabela 6.7). A diferença é mais significativa para o basalto da Pedreira. Destaca-se que os valores de q_u obtidos nos diferentes ensaios são oriundos de correlações empíricas, elaboradas a partir de ensaios de diversos tipos de rocha.

6.2.8. Ensaios de compressão uniaxial e diametral (ensaio brasileiro)

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial estão apresentados no Apêndice II.3. A metodologia dos ensaios e as características iniciais dos corpos de prova são

apresentadas no item 5.5.6. A Tabela 6.10 apresenta os valores médios dos módulos de deformabilidade tangente E , coeficiente de Poisson ν e a resistência à compressão uniaxial q_u . O valor do módulo E corresponde à inclinação da reta tangente à curva tensão axial S_u vs. deformação axial e_{axi} a 50% da resistência à compressão uniaxial máxima q_u , e o coeficiente de Poisson ν é a inclinação da reta tangente à curva deformação radial e_{rad} vs. e_{axi} a 50% da tensão q_u .

Tabela 6.10 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial.

Material	Local	Alteração	E (GPa)	ν	q_u (MPa)
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	90,64	0,28	237,80
	Pedreira Rio Grande	Intacto	89,27	0,25	180,62
		300 h de lixiviação	67,09	0,21	174,60
		750 h de lixiviação	59,06	0,15	176,73
		1500 h de lixiviação	55,54	0,18	153,14
		3200 h de lixiviação	46,57	0,33	84,20
Granito	Serra da Mesa	São	63,38 (*)	-	200,00 (*)

O basalto intacto corresponde a zero anos de alteração no campo e zero horas de lixiviação;
(*) Castro (1996).

Verifica-se que o módulo E e o coeficiente de Poisson ν do basalto intacto da Pedreira são semelhantes aos do basalto naturalmente alterado de Marimbondo. Esta semelhança é explicada pelo processo de extração dos testemunhos, uma vez que a obtenção de corpos de prova de boa qualidade só é possível na parte central dos grandes blocos de basalto (Figura 5.3), onde a rocha apresenta-se intacta. Deste modo, os corpos de prova do basalto de Marimbondo não representam o real estado de alteração do bloco de rocha.

Dos resultados apresentados no apêndice, nota-se que os basaltos apresentam as curvas S_u vs. ϵ_{axi} aproximadamente lineares. No entanto, a alteração do basalto no laboratório provoca uma pequena curvatura, côncava para cima, na fase inicial das curvas. Esta fase, típica de ensaios de compressão uniaxial, corresponde ao fechamento de microfissuras pré-existentes e alguns poros da rocha, que aumentam com a alteração no laboratório.

Destaca-se que a lixiviação contínua provoca a alteração do material de preenchimento das descontinuidades (fissuras e microfissuras pré-existentes da rocha) reduzindo a resistência da rocha e, em alguns casos, danifica o corpo de prova (Figura 5.5). Tal redução de resistência pode contribuir tanto para o aumento da não-linearidade da fase inicial da curva \mathbf{s}_u vs. \mathbf{e}_{axi} , quanto para a redução da resistência à compressão uniaxial q_u da rocha e do módulo de deformabilidade E , conforme constatado na Tabela 6.10.

A Figura 6.13 apresenta a variação dos parâmetros de deformabilidade E e \mathbf{n} e da resistência q_u , com o tempo de lixiviação contínua no laboratório. A alteração no laboratório provoca a redução do módulo E e da resistência q_u do basalto. Além disto, a redução aumenta de forma não-linear com o tempo de lixiviação. No entanto, a variação do coeficiente de Poisson com o tempo de lixiviação não é conclusiva, apesar de mostrar a tendência de aumento quando considerados os valores correspondentes ao basalto intacto da Pedreira ($\mathbf{n} = 0,25$) e ao alterado por 3200 horas de lixiviação ($\mathbf{n} = 0,33$).

Comparando os valores de q_u indicados na Tabela 6.10 com os valores estimados pelos ensaios de carregamento pontual e esclerometria (Tabelas 6.7 e 6.9, respectivamente), conclui-se que as estimativas de resistência à compressão uniaxial segundo os ensaios de carregamento pontual parecem ser adequadas. Todavia, recomenda-se a aferição da equação empírica (este assunto será tratado no item 7.5). Conclui-se também que a estimativa de resistência segundo os ensaios de esclerometria não se mostra muito coerente quando comparada aos resultados dos ensaios de compressão uniaxial.

A Tabela 6.11 apresenta os resultados dos ensaios de compressão diametral (ensaio brasileiro). A resistência à tração \mathbf{s}_t é determinada indiretamente através da expressão (Mellor e Hawkes, 1971):

$$\mathbf{s}_t = \frac{2 P}{\mathbf{p} D t} \quad (6.7)$$

onde P é a carga correspondente ao aparecimento da fratura diametral primária, D é o diâmetro e t é a espessura do corpo de prova.

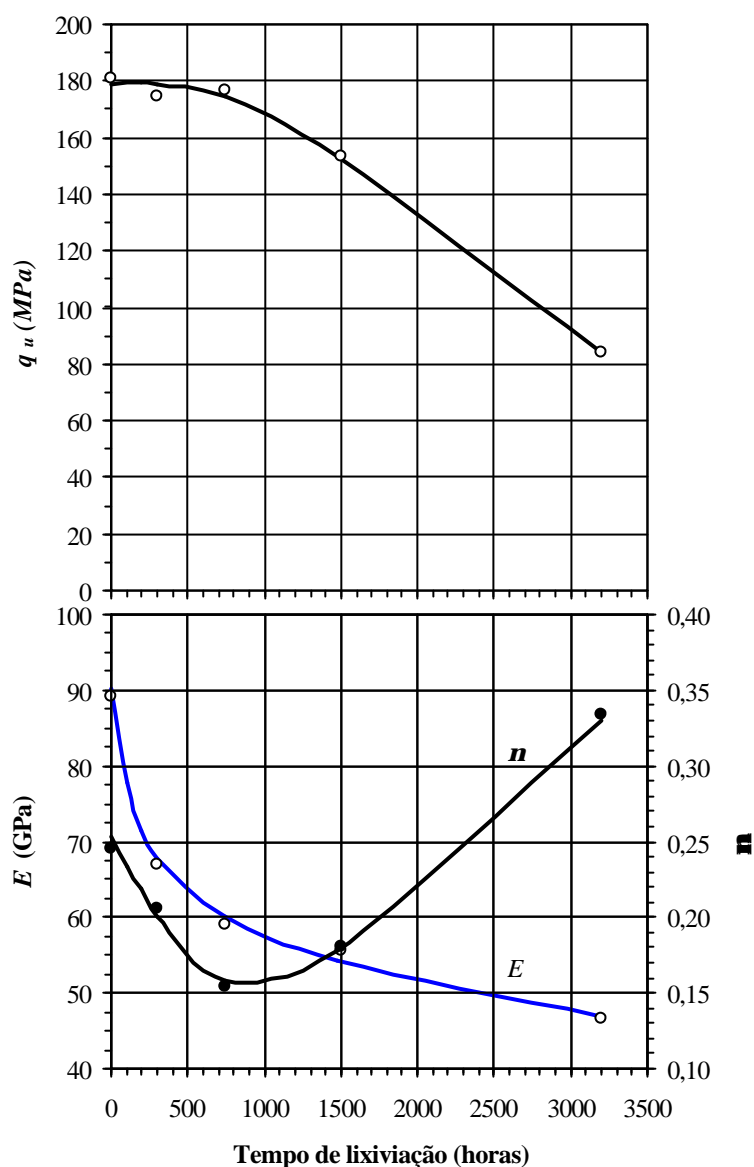


Figura 6.13 - Variação da resistência q_u e parâmetros E e n com o tempo de lixiviação do basalto.

Verifica-se que a resistência S_t do basalto de Marimbondo é maior que a do basalto intacto da Pedreira (Tabela 6.11). Isso também é explicado pelo processo de extração anteriormente mencionado. Assim, da mesma maneira que no ensaio de compressão uniaxial, o ensaio brasileiro não representa a alteração natural do basalto estudado.

Os valores de resistência à tração dos basaltos alterados no laboratório também são maiores que o do basalto intacto (exceto o basalto com 300 horas de lixiviação). Estes resultados não são conclusivos, principalmente devido à pequena quantidade de ensaios executados (Tabela 5.5). Ressalta-se ainda que a grande dispersão de resultados deste tipo de ensaio é reconhecida por muitos autores. Além disto, a alteração no laboratório provoca a

abertura de fissuras e conseqüentemente o dano de corpos de prova. Deste modo, os corpos de prova que restaram para ensaio de tração foram aqueles que não apresentavam fissuras. Isto pode explicar os elevados valores de resistência à tração e a não representatividade do estado de alteração do basalto em tais ensaios.

Tabela 6.11 - Valores de resistência à tração σ_t obtidos no ensaio brasileiro.

Material	Local	Alteração	Número de ensaio	σ_t (MPa)
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	10	13,76
	Pedreira Rio Grande	Intacto	10	11,80
		300 h de lixiviação	6	11,53
		750 h de lixiviação	6	14,90
		1500 h de lixiviação	2	16,67
		3200 h de lixiviação	1	14,78
		50 ciclos de umidade	4	18,03
		100 ciclos de umidade	3	14,11
Granito	Serra da Mesa	São	-	9,6 (*)

O basalto intacto corresponde a zero anos de alteração no campo e zero horas de lixiviação.
(*) Castro (1996)

6.2.9. Ensaio de desgaste

As Figuras 6.14 e 6.15 apresentam os resultados dos ensaios de desgaste dos tipos *slake durability* (SD) e micro Deval (MD), respectivamente. Os ensaios foram executados segundo a metodologia descrita no item 5.5.7. A diferença fundamental entre os dois tipos de ensaios reside na energia aplicada às partículas (velocidade e tempo de rotação), a fim de provocar o desgaste. No ensaio SD, aplica-se baixa energia de desgaste (baixa rotação em curto intervalo de tempo), desgastando assim a parte mais superficial das partículas. No ensaio MD, a energia aplicada é alta (alta rotação por longo intervalo de tempo), provocando o desgaste até a parte mais central das partículas.

Como era de se esperar, a perda de massa é função não somente da litologia da rocha, mas também da energia de desgaste aplicada no ensaio.

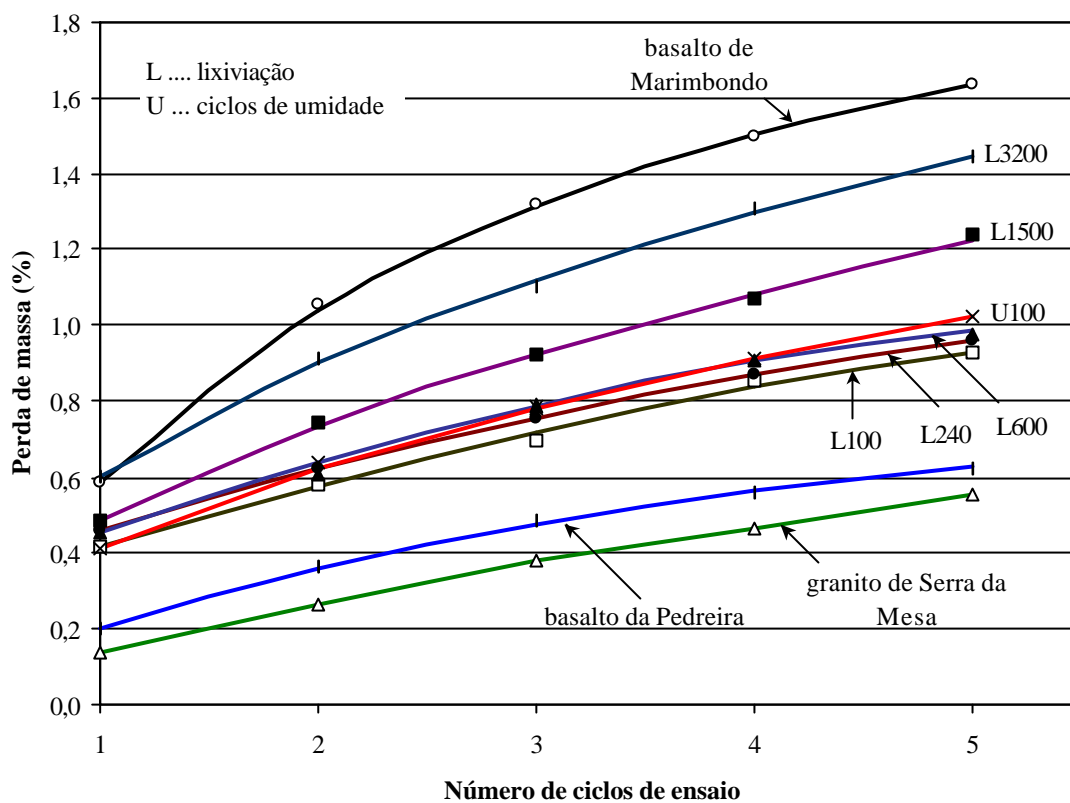


Figura 6.14 - Variação da perda de massa com o número de ciclos do ensaio *slake durability*.

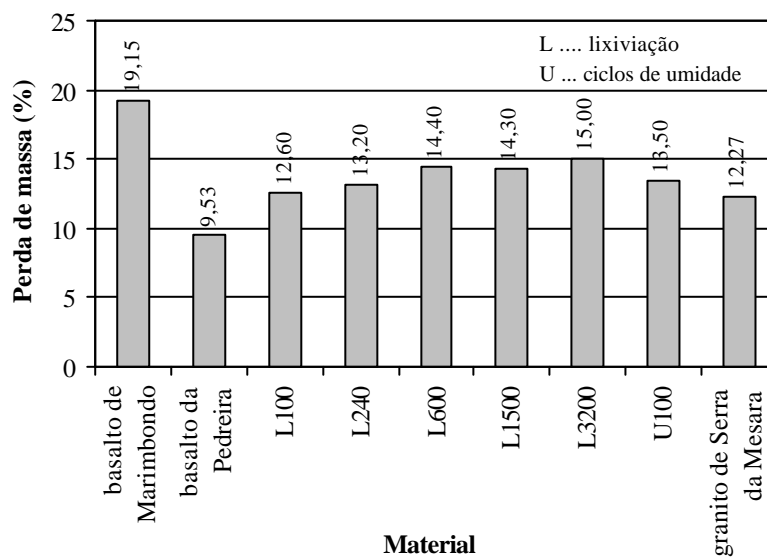


Figura 6.15 - Variação da perda de massa dos materiais ensaiados no equipamento micro Deval.

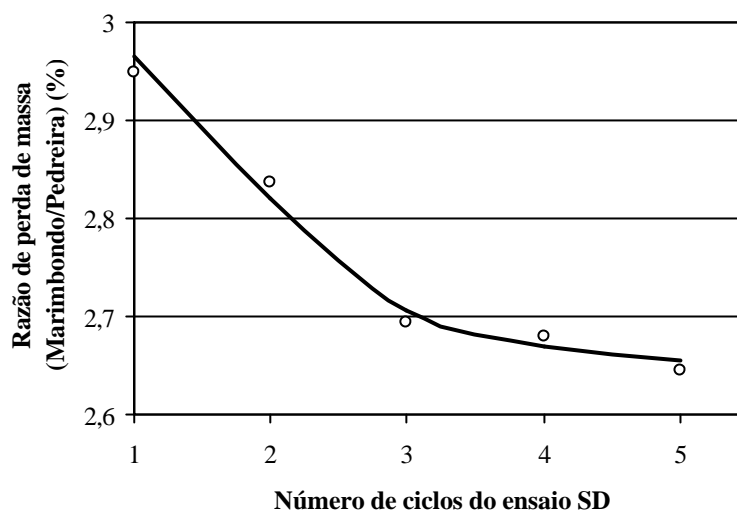


Figura 6.16 - Variação da razão de perda de massa dos basaltos de Marimbondo e da Pedreira em função do número de ciclos no ensaio SD.

Observa-se que a alteração da rocha basáltica no laboratório e naturalmente no campo provoca o aumento da perda de massa da rocha, nos dois tipos de ensaio de desgaste considerados.

No ensaio SD, ocorre o aumento da perda de massa com o número de ciclos de ensaio. No entanto, a taxa de perda de massa diminui com o número de ciclos (Figura 6.16). Tal fato é explicado pela baixa resistência superficial das partículas do basalto de Marimbondo em relação a resistência superficial do basalto da Pedreira. Espera-se que o desgaste superficial ocorra nos primeiros ciclos de ensaio, o que corresponde a uma grande perda de massa inicial. Assim, nos últimos ciclos a rocha apresenta uma superfície mais resistente e, conseqüentemente, menos desgastável.

A Figura 6.17 mostra as variações da perda de massa do basalto em função do número de horas de lixiviação contínua. Ocorre a redução do gradiente de perda de massa com o tempo de lixiviação. A redução é ainda mais acentuada no material desgastado pelo ensaio MD. Como neste ensaio a energia de desgaste é mais intensa, a parte superficial mais alterada das partículas é desgastada de forma mais acelerada que no ensaio SD. Isso também justifica o valor praticamente constante da perda de massa no ensaio MD após cerca de 900 horas de lixiviação do basalto.

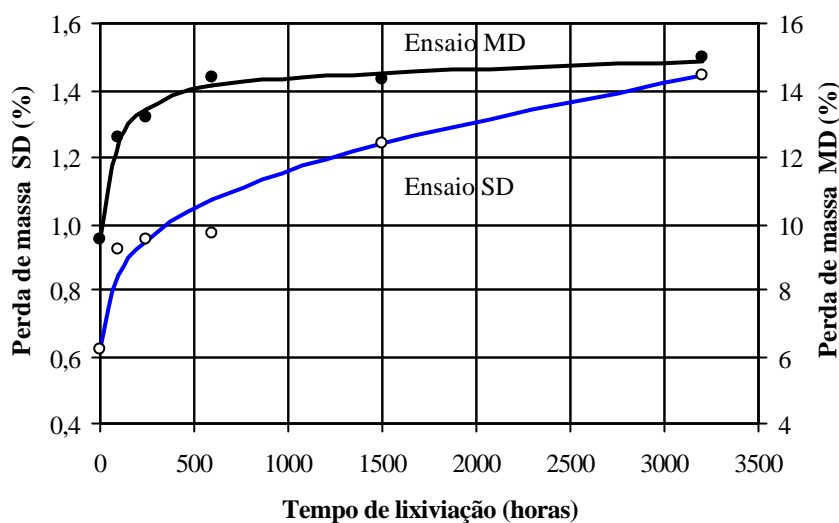


Figura 6.17 - Variação da perda de massa do basalto no ensaio MD e no quinto ciclo do ensaio SD em função do tempo de lixiviação.

6.3. Ensaios no enrocamento como meio granular

A alteração do basalto provoca a modificação da granulometria do enrocamento da Barragem de Marimbondo. Verifica-se visualmente no campo, grande quantidade de finos (partículas com diâmetro nominal menor que 4,76mm) e de blocos de basalto com dimensão mais reduzida (fragmentados). A modificação granulométrica deve provocar modificações do comportamento mecânico do enrocamento. Todavia, devido à questões executivas, não foi possível determinar a granulometria atual do enrocamento de Marimbondo.

Em laboratório, ao contrário do esperado, não se observa produção de finos e modificações significativas na granulometria das amostras submetidas à alteração por lixiviação contínua ou por ciclos de umidade.

Vale lembrar que a identificação do material e dos ensaios em corpos de prova de enrocamento segue a convenção de nomenclatura apresentada no item 5.2.

6.3.1. Densidade específica das partículas do enrocamento

Os valores de densidade específica aparente das partículas G_{ap} correspondente ao enrocamento como meio granular (Tabela 6.12) foram determinados considerando os valores de peso específico aparente das partículas indicados na Tabela 6.3 e a porcentagem de massa M das n frações presentes na granulometria total. Para isso utilizou-se a seguinte expressão:

$$G_{ap} = \left(\frac{M_1 G_{ap1}}{100} + \frac{M_2 G_{ap2}}{100} + \dots + \frac{M_n G_{apn}}{100} \right) \quad (6.8)$$

Tabela 6.12 - Valores de peso específico aparente das partículas G_{ap} para os maciços de enrocamento.

Material	Local	Alteração	Peso específico real das partículas do enrocamento G_{ap}						
			$d_{50}=103$	$d_{50}=136$	$d_{50}=26$	$d_{50}=22$	$d_{50}=16$	$d_{50}=12$	$d_{50}=8$
Basalto	Barragem de. Marimbondo	25 anos	2,79	-	2,76	-	-	2,73	-
	Pedreira Rio Grande	0 anos	2,86	-	2,82	2,79	2,80	2,79	2,78
Granito	Barragem de Serra da Mesa	São	2,62	2,61	2,58	2,56	-	-	-

valores de d_{50} em milímetros

A avaliação dos efeitos da alteração no peso específico do maciço de enrocamento é feita considerando os valores dos pesos específicos secos máximos g_{max} e mínimos g_{min} , indicados na Tabela 5.2. As Figuras 6.18 e 6.19 ilustram a variação de g_{max} e g_{min} com o diâmetro d_{50} , considerando corpos de prova com granulometrias paralelas aos enrocamentos de Marimbondo e Serra da Mesa, respectivamente. A diferença fundamental entre tais granulometrias é a presença significativa de finos no enrocamento de granito de Serra da Mesa.

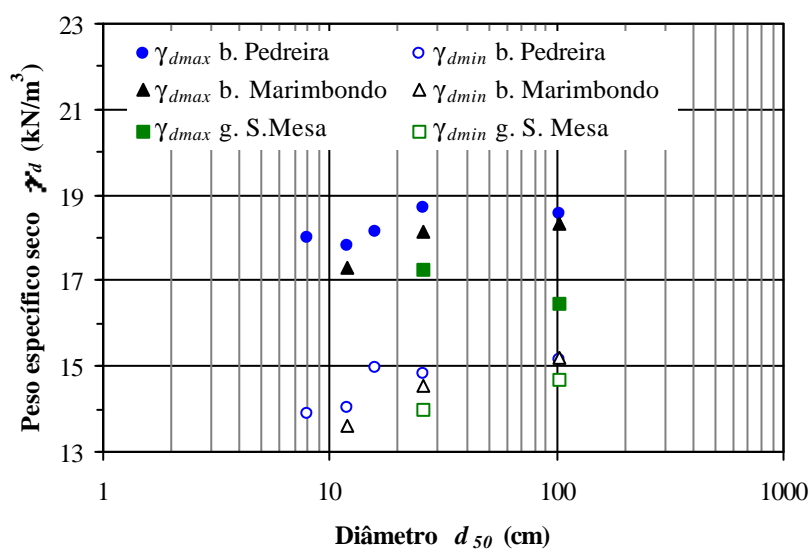


Figura 6.18 - Variação de g_{max} e g_{min} dos enrocamentos em função de d_{50} - Granulometria paralela a do enrocamento de Marimbondo.

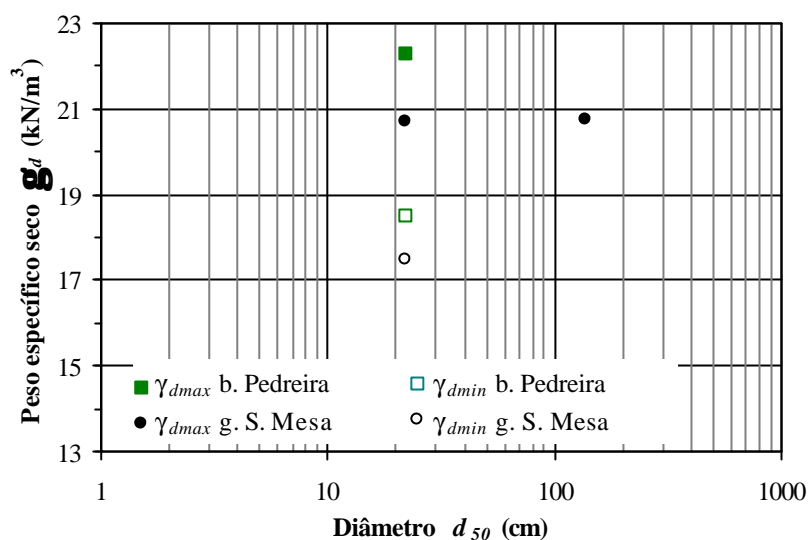


Figura 6.19 - Variação de g_{dmax} e g_{dmin} dos enrocamentos em função de d_{50} - Granulometria paralela a do enrocamento de Serra da Mesa.

Os estados de densidade máximo e mínimo dos enrocamentos de basalto são pouco afetados pelo valor do diâmetro médio d_{50} .

Nota-se também que os valores de g_{dmax} e g_{dmin} dos enrocamentos de basalto de Marimbondo são ligeiramente menores que os do enrocamento de basalto da Pedreira. Tal aspecto está relacionado com a maior densidade das partículas de basalto da Pedreira.

Verifica-se o aumento de 20 a 25% nos valores de g_{dmax} e g_{dmin} nos enrocamentos com granulometria 22 (paralela ao enrocamento de Serra da Mesa) em relação aos de granulometria 26 (paralela ao enrocamento de Marimbondo). Este aumento é devido à presença dos finos que preenchem os vazios do enrocamento de Serra da Mesa.

A Figura 6.20 apresenta as variações de g_{dmax} com g_{dmin} e dos índices de vazios máximos e_{max} com os índices de vazios mínimos e_{min} . O valor da relação g_{dmin} / g_{dmax} é de $0,81 \pm 0,03$ e o valor da relação e_{min} / e_{max} é de $0,58 \pm 0,07$. O valor da relação e_{min} / e_{max} é inferior ao valor de 0,8 sugerido por Veiga Pinto (1979).

6.3.2. Absorção

Na determinação dos valores da absorção correspondente ao maciço de enrocamento foram considerados os valores de absorção das partículas A_n e a porcentagem de massa M_n das n frações presentes na granulometria total. Para isso utilizou-se a seguinte expressão:

$$\text{Absorção} = \left(\frac{M_1 A_1}{100} + \frac{M_2 A_2}{100} + \dots + \frac{M_n A_n}{100} \right) \quad (6.9)$$

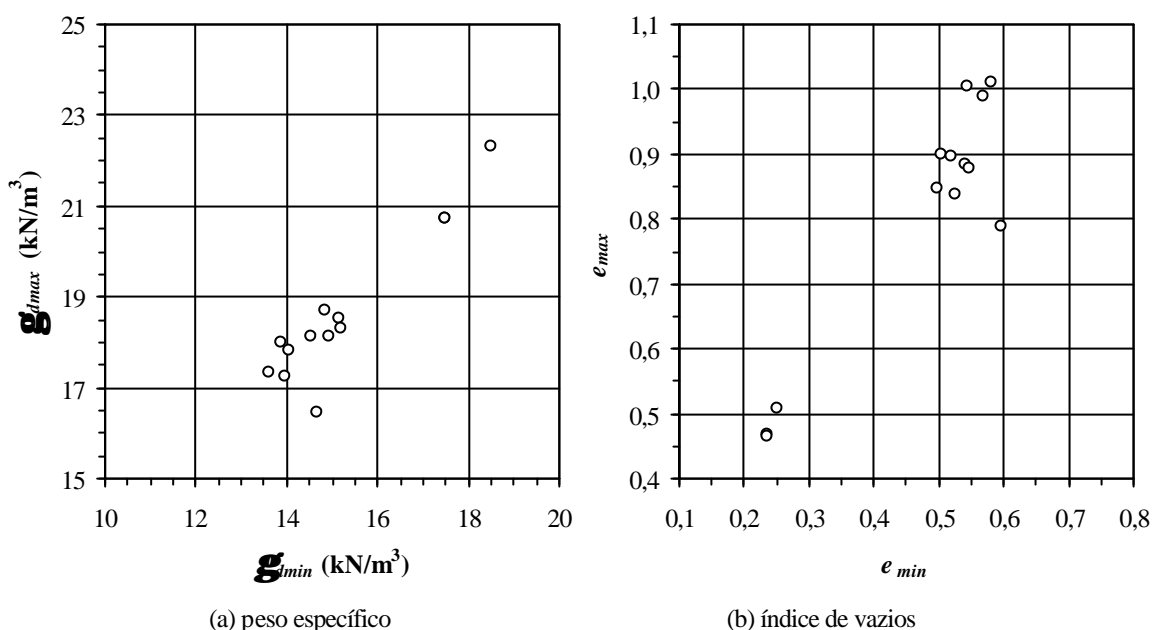


Figura 6.20 - Variações de g_{max} com g_{min} e e_{max} com e_{min} dos enrocamentos.

A Tabela 6.13 apresenta os valores de absorção dos enrocamentos considerados no presente trabalho. Verifica-se o aumento da absorção com a redução do diâmetro médio das partículas do enrocamento. Este comportamento está relacionado com a superfície específica do material, a qual aumenta com a redução do diâmetro das partículas.

Tabela 6.13 - Valores de absorção dos enrocamentos em função das granulometrias consideradas no trabalho.

Material	Local	Alteração	Absorção (%)						
			$d_{50}=103$	$d_{50}=136$	$d_{50}=26$	$d_{50}=22$	$d_{50}=16$	$d_{50}=12$	$d_{50}=8$
Basalto	Barragem de Marimbondo	25 anos	0,74	-	1,52	-	1,90	2,14	-
	Pedreira Rio Grande	0 anos	0,37	-	1,00	1,16	1,30	1,50	1,35
Granito	Barragem de Serra da Mesa	São	0,29	0,34	0,42	0,46	-	-	-

valores de d_{50} em milímetros

6.3.3. Ângulo de talude natural

A metodologia utilizada para a determinação do ângulo de talude natural f_{nat} foi apresentada no item 5.6.1. A Tabela 6.14 apresenta a média dos valores do ângulo f_{nat} . Os resultados podem indicar que o ângulo f_{nat} aumenta com a dimensão média das partículas. No entanto, há influência de outros fatores, tais como, a densidade relativa e a forma das partículas, que também podem contribuir para esta tendência de aumento.

Os valores indicados na tabela são relativamente baixos. Todavia, estes valores podem indicar o limite inferior da ângulo de resistência ao cisalhamento dos enrocamentos.

Tabela 6.14 - Valores de inclinação de talude natural com a horizontal.

Material	Local	Alteração	Ângulo de talude natural f_{nat} (graus)				
			$d_{50}=26$	$d_{50}=22$	$d_{50}=16$	$d_{50}=12$	$d_{50}=8$
Basalto	Barragem de Marimbondo	25 anos	38,6	-	-	36,7	-
	Pedreira Rio Grande	0 anos	38,8	35,7	37,6	37,5	36,8
Granito	Barragem de Serra da Mesa	São	37,9	35,7	-	-	-

valores de d_{50} em milímetros

6.3.4. Compressão unidimensional

A metodologia de execução dos ensaios de compressão unidimensional e as características iniciais dos corpos de prova são apresentadas no item 5.6.2. Os resultados dos ensaios são apresentados no Apêndice III.1.

Os ensaios foram executados em dois equipamentos de compressão unidimensional descritos no item 5.6.2: um com câmara de compressão cilíndrica de diâmetro interno e altura iguais a 1,0m (UNI₁₀₀) e outro de seção horizontal quadrada de lado 0,3m e altura de 0,2m (UNI₃₀).

Durante a execução dos ensaios, observou-se que as deformações verticais ocorrem imediatamente após a aplicação do carregamento.

Nos enrocamentos densos ocorre redução do módulo de compressibilidade M com a tensão efetiva vertical para $s'_v < 0,9\text{MPa}$ nos basaltos e $0,5\text{MPa}$ no granito (Figura 6.21b). O módulo M é definido como a tangente da curva tensão s'_v vs. deformação vertical e_v . A redução do módulo M é mais acentuada para o enrocamento de basalto da Pedreira Rio Grande. Este comportamento está relacionado com o fraturamento das partículas discutida no

item 2.2.1. Entretanto, sob tensões maiores ou iguais a 0,9MPa nos basaltos e 0,5MPa no granito, os módulos de compressibilidade se tornam aproximadamente constantes. É importante destacar que o ensaio Gd136 (granito de Serra da Mesa com granulometria de diâmetro d_{50} igual a 136mm) foi executado na mesma câmara de compressão UNI₁₀₀ dos demais ensaios realizados neste trabalho (Figura 5.14).

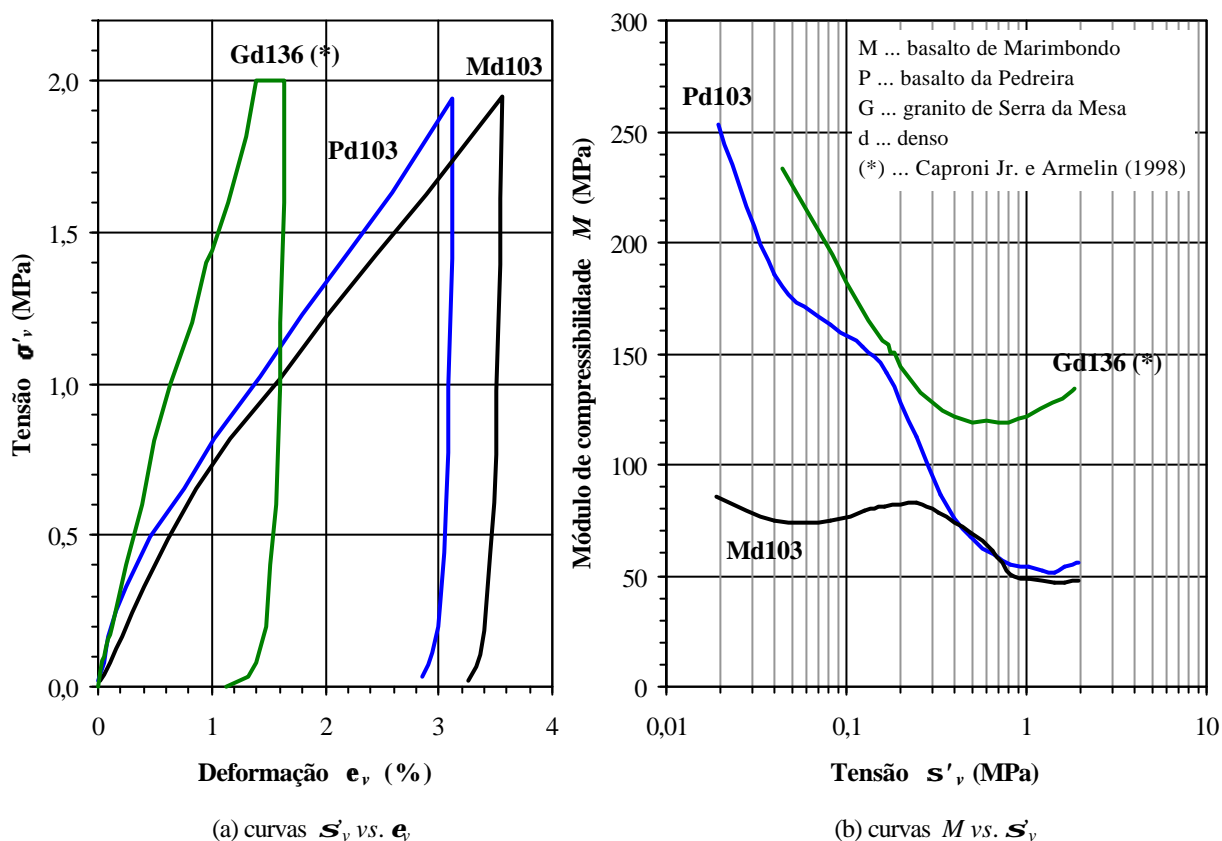


Figura 6.21 - Curvas σ'_v vs. ϵ_v e M vs. s'_v dos enrocamentos densos, com $d_{50} = 103$ e 136mm.

As curvas de σ'_v vs. ϵ_v dos enrocamentos densos com granulometria de diâmetro d_{50} iguais a 103 e 136mm (Figura 6.21a) são caracterizadas pela não-linearidade. Assim como no comportamento característico dos enrocamentos discutido no item 2.2.1, verifica-se que tais curvas são compostas por três regiões distintas: duas lineares (inicial e final) e uma não-linear, côncava para baixo, intercalando as duas lineares. A região não-linear sugere um ponto de inflexão da curva σ'_v vs. ϵ_v (Veiga Pinto, 1983). Tal ponto pode indicar o início do rearranjo das partículas do enrocamento devido ao fraturamento dos blocos originais provocada pelo aumento do nível de tensões.

Nos níveis de tensão s'_v maiores que 1,5MPa no basalto da Pedreira e 0,8MPa no granito, o valor do módulo M cresce gradativamente (Figura 6.21b), principalmente no enrocamento de granito. Isto sugere que, em tais níveis de tensões, os rearranjos provocados por rupturas de partícula, não geram grandes modificações da estrutura granular do maciço de enrocamento. Além disto, espera-se que exista uma melhor distribuição das tensões nos contatos entre as partículas, reduzindo o fraturamento. Este comportamento é relacionado às propriedades das partículas (litologia, forma, resistência e tamanho) e do maciço de enrocamento (densidade e granulometria). Ressalta-se também a possível influência do equipamento de ensaio no comportamento mecânico. Neste caso, o atrito entre as partículas e as paredes da câmara contribui significativamente para a redução da compressibilidade de enrocamentos sob compressão unidimensional e conseqüente aumento do módulo M .

Considerando os corpos de prova de enrocamento da Pedreira e de Marimbondo, no estado fofo (Figura 6.22), observa-se que, nos níveis de tensão s'_v inferiores a 0,2MPa, as compressibilidades são semelhantes. No entanto, nas tensões mais elevadas, o enrocamento fofo de Marimbondo é mais compressível que o da Pedreira.

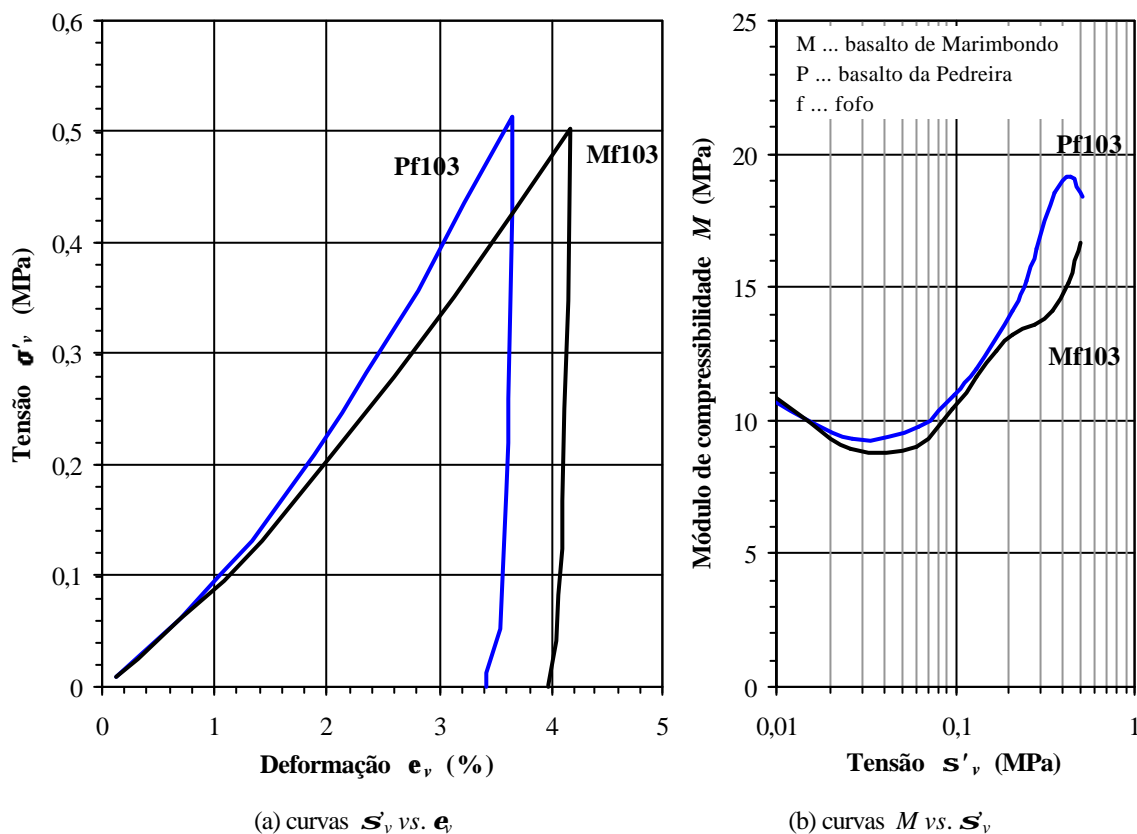


Figura 6.22 - Curvas s'_v vs. e_v e M vs. s'_v dos enrocamentos fofos, com $d_{50} = 103\text{mm}$.

O estado de densidade dos corpos de prova influencia a compressibilidade dos enrocamentos. Ao contrário dos enrocamentos densos (Figura 6.21), observa-se a redução da compressibilidade com o nível de tensão \mathbf{s}'_v nos enrocamentos fofos (Figura 6.22). Este comportamento não indica, necessariamente, que não haja fraturamento das partículas nos enrocamentos fofos, mas que o mecanismo de deformação esteja relacionado principalmente com o deslocamento relativo das partículas ou fraturamento de contatos e, em menor intensidade, com o fraturamento das partículas.

6.3.4.1 Efeito de escala

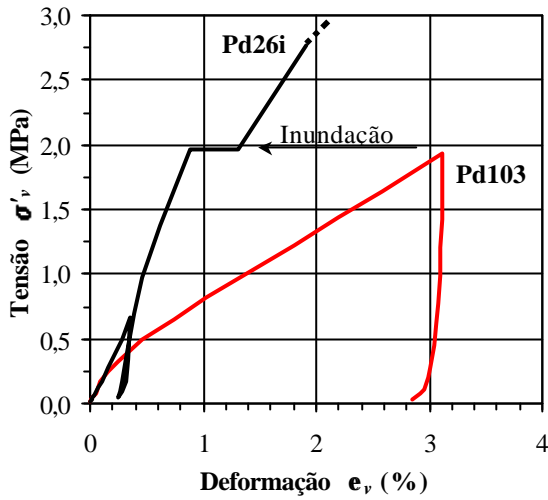
Para a avaliação do efeito de escala foram utilizadas duas câmaras de compressão unidimensional UNI₁₀₀ e UNI₃₀ (descritas no item 5.6.2).

Considerando a relação entre a dimensão mínima do corpo de prova D e a dimensão máxima das partículas d_{max} de aproximadamente cinco (Tabela 5.7), observa-se que os enrocamentos densos, ensaiados nas câmaras UNI₁₀₀ (granulometrias com $d_{50} = 103$ e 136mm) e UNI₃₀ (granulometrias com $d_{50} = 26$ e 22mm), apresentam comportamento semelhante somente em níveis de tensões \mathbf{s}'_v inferiores a 0,1MPa (Figura 6.23). Este nível de tensão corresponde a aproximadamente 6m de aterro de enrocamento, o que pode ser considerado um nível de tensão muito baixo para estes materiais. Em tensões mais elevadas ($> 0,1$ MPa), a compressibilidade do material na câmara UNI₁₀₀ é maior que na câmara UNI₃₀.

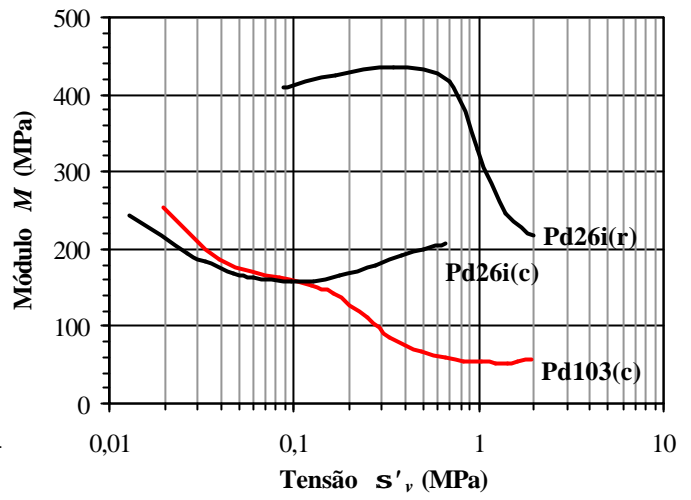
Considerando a mesma ordem de grandeza para a relação $D/d_{max} \cong 5$, observa-se semelhança de comportamento dos enrocamentos fofos, ensaiados em ambas as câmaras (Figura 6.24). No entanto, na fase de carregamento, os enrocamentos ensaiados na câmara UNI₁₀₀ apresentam-se mais compressíveis que os enrocamentos ensaiados na câmara UNI₃₀. O valor do módulo M na câmara UNI₁₀₀ é cerca de 10 a 20MPa maior que o valor de M na câmara UNI₃₀.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 6.23 e 6.24, pode-se determinar o fator de escala F , definido como a relação entre as deformações verticais \mathbf{e}_v , obtidas nos ensaios em enrocamentos de granulometrias paralelas nas câmaras UNI₁₀₀ e UNI₃₀, para o mesmo nível de tensão \mathbf{s}'_v , ou seja:

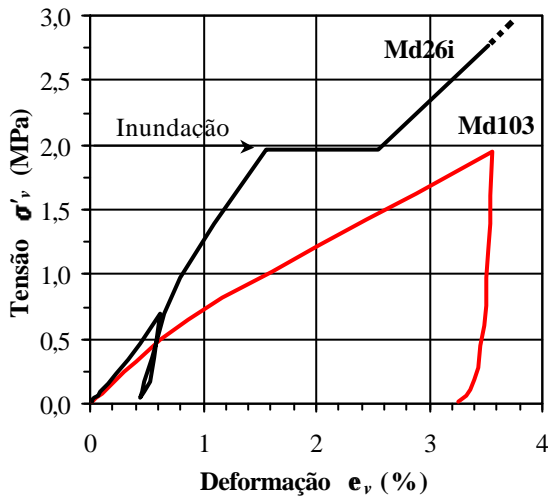
$$F = \frac{\mathbf{e}_v \text{ na câmara UNI}_{100}}{\mathbf{e}_v \text{ na câmara UNI}_{30}} \quad (6.10)$$



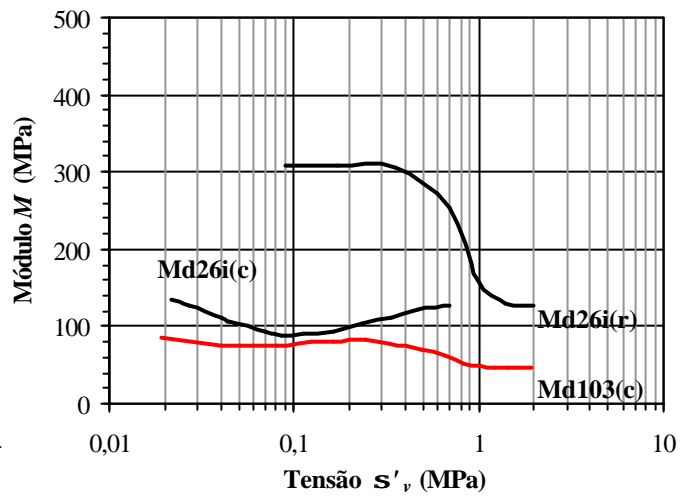
(a) curvas s'_v vs. e_v - basalto de Pedreira



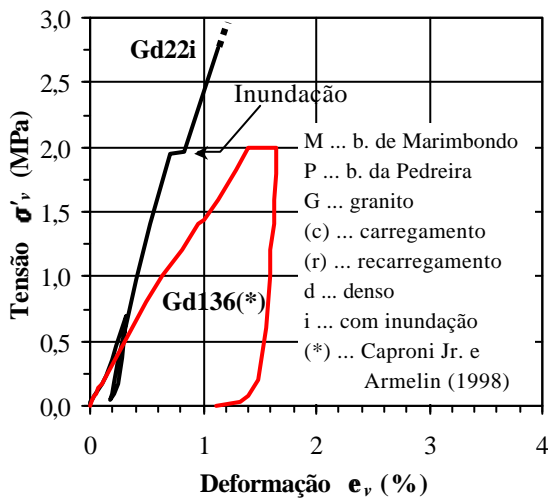
(b) curvas M vs. s'_v - basalto de Pedreira



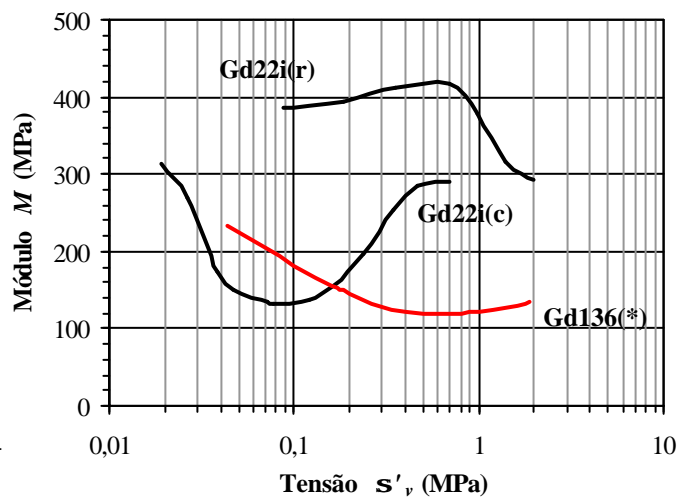
(c) curvas s'_v vs. e_v - basalto de Marimbondo



(d) curvas M vs. s'_v - basalto de Marimbondo



(e) curvas s'_v vs. e_v - granito de S. da Mesa



(f) curvas M vs. s'_v - granito de S. da Mesa

Figura 6.23 - Curvas s'_v vs. e_v e M vs. s'_v dos enrocamentos densos ensaiados nas câmaras UNI₁₀₀ ($d_{50} = 103$ e 136 mm) e UNI₃₀ ($d_{50} = 26$ e 22 mm) - Efeito de escala.

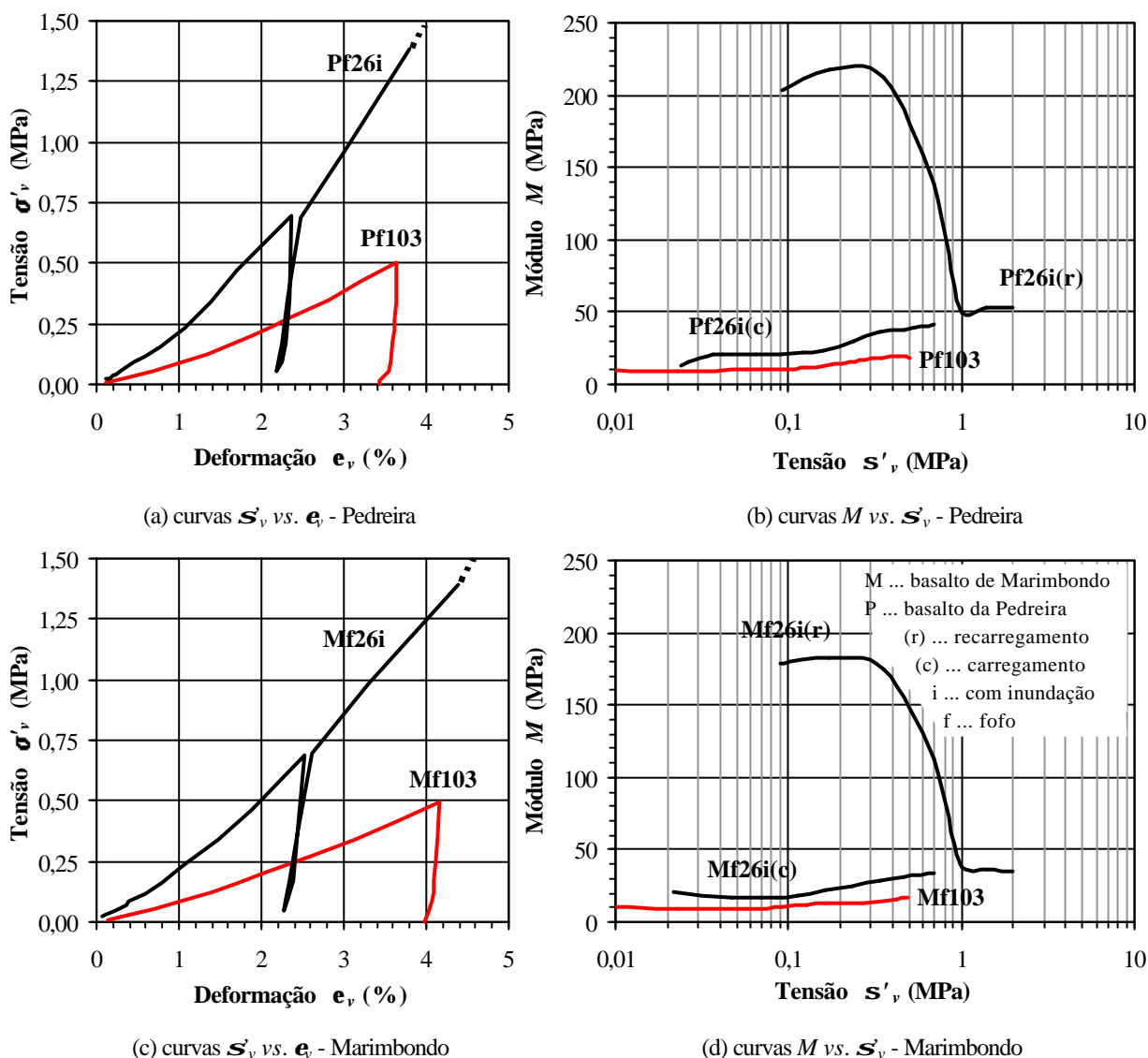


Figura 6.24 - Curvas s'_v vs. e_v e M vs. s'_v dos enrocamentos fofos ensaiados nas câmaras UNI₁₀₀ ($d_{50} = 103\text{mm}$) e UNI₃₀ ($d_{50} = 26\text{mm}$) - Efeito de escala.

A Figura 6.25 mostra a variação do fator de escala F com a tensão s'_v . Apesar da dispersão dos resultados, observa-se a redução do valor de F com a tensão s'_v nos enrocamentos fofos, excetuando o trecho crescente para s'_v maior que 1,5MPa do enrocamento de Marimbondo. Nos enrocamentos densos de basalto da Pedreira e de granito de Serra da Mesa, o fator de escala F é aproximadamente constante para s'_v inferior a 0,1MPa, e crescente a partir deste valor. No enrocamento de Marimbondo denso, o valor de F decresce com o nível tensão para s'_v inferior a 0,3MPa, mostrando um comportamento

distinto dos enrocamentos densos de basalto da Pedreira e de granito de Serra da Mesa. Acima deste nível de tensão, o fator F de Marimbondo é crescente.

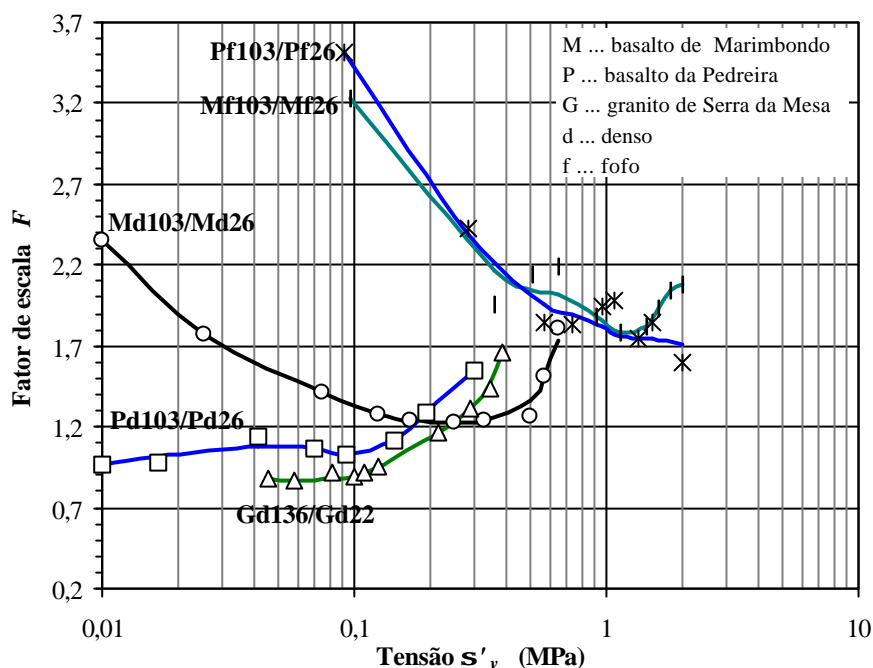


Figura 6.25 - Variação do fator de escala F com a tensão s'_v nos ensaios de compressão unidimensional.

A análise das variações do fator F com o nível de tensão permite concluir que, além do efeito de escala dos equipamentos, o comportamento do material é afetado pelo atrito entre as partículas e as paredes internas das câmaras. Como descrito no item 5.6.2, as paredes da câmara UNI_{100} são comprimidas junto com o corpo de prova, reduzindo o atrito, ao contrário da câmara UNI_{30} , cujas paredes indeformáveis oferecem, eventualmente, maior atrito em tensões mais elevadas. O aumento do atrito entre as paredes da câmara UNI_{30} e as partículas aumenta o valor do fator F .

É importante notar que a avaliação do efeito de escala nos ensaios de compressão unidimensional é dificultada principalmente pelas diferenças de projeto entre as duas câmaras, sobretudo, no caso de enrocamentos densos. No entanto, pode-se considerar que os ensaios executados na câmara UNI_{30} sejam representativos para fins de avaliação qualitativa do comportamento dos enrocamentos. Deve-se ressaltar que estas avaliações são mais coerentes quando são comparados resultados de ensaios em um mesmo tipo de câmara.

6.3.4.2 Carregamento, descarregamento e recarregamento

Nos ensaios na câmara UNI₃₀, foram executadas fases de descarregamento e recarregamento. Das curvas σ'_v vs. ϵ_v dos ensaios unidimensionais apresentadas no Apêndice III.1, observa-se que durante o descarregamento e recarregamento até o nível de tensão do início do descarregamento (tensão de pré-carregamento), o material tem comportamento aproximadamente linear, com módulo de compressibilidade superior ao da fase de carregamento. Após a tensão de pré-carregamento, o comportamento do material tende ao mesmo comportamento da fase de carregamento inicial do ensaio.

Os enrocamentos apresentam deformações ϵ_v predominantemente plásticas. Este comportamento é justificado pelo fraturamento e conseqüente rearranjo das partículas que geram deformações não recuperáveis e constituem a principal componente de deformação dos enrocamentos. A compressibilidade na fase de descarregamento é ligeiramente superior que no recarregamento. No entanto, tendo em vista a influência do atrito interno entre as partículas e as paredes da câmara, discutida no item 6.3.4.1, pode-se considerar que os módulos são aproximadamente iguais.

Verifica-se ainda das Figuras 6.23b, 6.23d e 6.23f que o módulo de compressibilidade M dos enrocamentos densos na fase de recarregamento é cerca de 2 a 3 vezes maior que o módulo M do material no carregamento inicial. No entanto, nos enrocamentos fofos, o valor de M no recarregamento pode ser dez vezes maior que no carregamento (Figuras 6.24a e 6.24c).

6.3.4.3 Fraturamento das partículas

Nos ensaios de compressão unidimensional executados na câmara UNI₁₀₀, foi determinado o grau de fraturamento das partículas B_g , definido por Marsal (1973a) e apresentados na Tabela 6.15. Os valores de B_g sugerem que os enrocamentos densos sofrem maior fraturamento que os fofos. Além disto o processo de alteração do basalto não provoca modificações significativas no fraturamento dos enrocamentos densos. Nos fofos, observa-se o aumento do fraturamento com a alteração do basalto.

Destaca-se que os valores de B_g para os enrocamentos densos podem não indicar apropriadamente o efeito da alteração no fraturamento das partículas. O valor de B_g está sujeito ao fraturamento que ocorre durante os processos de moldagem (densificação) do corpo de prova no ensaio de compressão unidimensional (item 2.2.2.1). Durante a densificação,

pode ocorrer a ruptura dos contatos e/ou das partículas menos resistentes, restando somente as de maior resistência. No basalto alterado, os contatos e partículas que se rompem durante a densificação são, provavelmente, os que sofrem perda de resistência devido à alteração da rocha (itens 6.2.5 e 6.2.6). Assim, os contatos entre partículas e as partículas que não se rompem durante o carregamento unidimensional são possivelmente representativos do estado mais intacto do basalto.

Tabela 6.15 - Compressão unidimensional: fator de fraturamento B_g .

Material			Amostra	B_g (%)
Tipo	Origem	Alteração		
Basalto	Marimbondo	Campo (25 anos)	Md103	37,31
			Mf103	10,37
	Pedreira Rio Grande	Intacta (0 anos)	Pd103	38,86
			Pf103	8,26
Granito	Serra da Mesa	São	Sd136	2,23 (*)

(*) Caproni Jr. e Armelin (1998)

O fraturamento do enrocamento de granito é menor que o dos enrocamentos de basalto. Tal redução pode ser devido tanto à litologia da rocha quanto à porcentagem de finos presentes na granulometria de $d_{50} = 136\text{mm}$.

Fez-se também a determinação dos valores de B_g dos ensaios executados no equipamento UNI₃₀. Todavia, os valores obtidos mostram variação dispersa e pouco conclusiva e, por isso, não são apresentados.

6.3.4.4 Litologia

A litologia influencia significativamente na compressibilidade dos enrocamentos densos (Figuras 6.21 e 6.23), enquanto que nos fofos tal influência é pouco representativa (Figuras 6.22 e 6.24). A Figura 6.26 apresenta, para fins de comparação da influência da litologia na compressibilidade, as curvas M vs. \mathbf{s}'_v dos enrocamentos de basalto e de granito, densos e fofos, ensaiados na câmara UNI₃₀ com mesma granulometria ($d_{50} = 26\text{mm}$). Os enrocamentos densos e os fofos de basalto da Pedreira e de Marimbondo mostram valores do módulo M maiores que do granito, indicando a menor compressibilidade dos basaltos. Além disto, o basalto da Pedreira é menos compressível que o de Marimbondo. Este comportamento está relacionado com a forma e a resistência das partículas (o basalto da Pedreira apresenta

partículas mais resistentes e angulosas que as partículas de basalto de Marimbondo e de granito de Serra da Mesa).

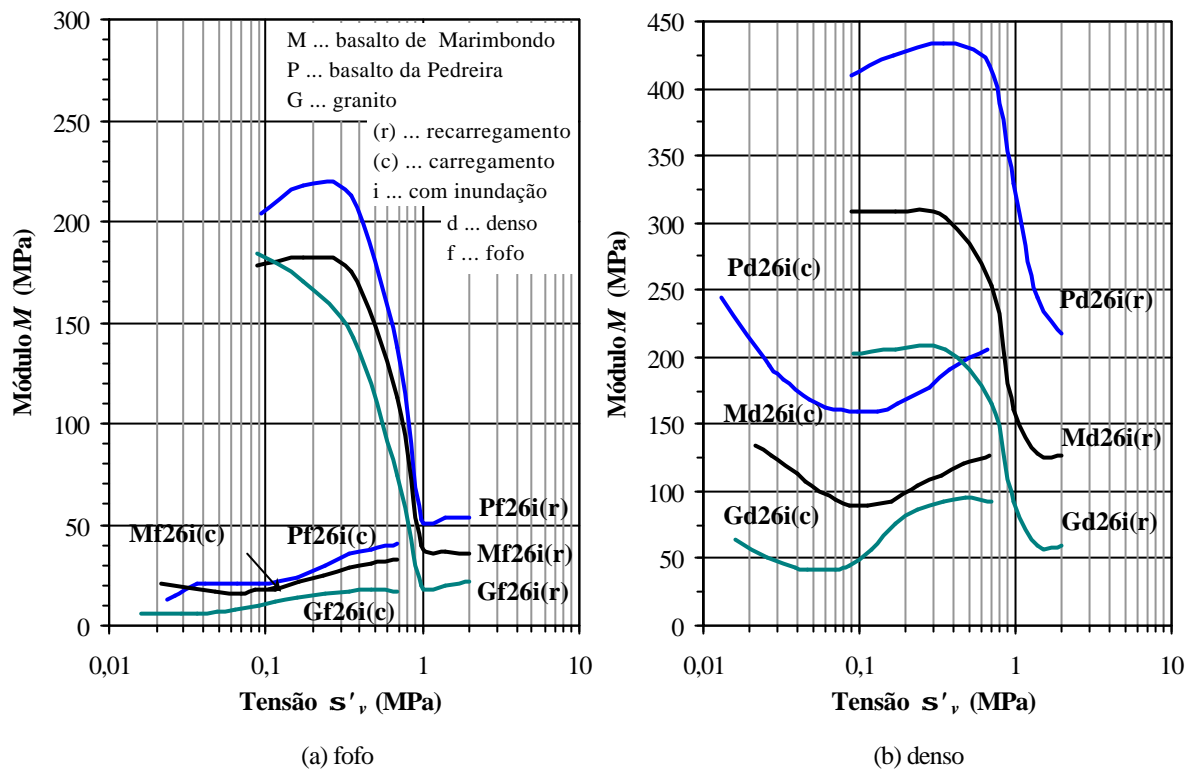


Figura 6.26 - Curvas M vs. s'_v - Efeito da litologia dos enrocamentos de basalto e de granito, densos e fofos ($d_{50} = 26\text{mm}$).

6.3.4.5 Alteração do enrocamento

O enrocamento denso de basalto de Marimbondo apresenta maior deformabilidade que o enrocamento de basalto da Pedreira, para nível de tensão s'_v inferior a 0,3MPa (Figura 6.21). Acima desta tensão, os módulos M do basalto da Pedreira e de Marimbondo são similares. Tal fato é explicado pela alteração do material de preenchimento, eventual propagação de fissuras e presença da capa de alteração nas partículas de basalto de Marimbondo, que provocam a ruptura dos contatos entre as partículas e a ruptura das próprias partículas nos níveis de tensão s'_v inferiores a 0,3MPa. Assim, acima deste nível de tensão, espera-se que a resistência mobilizada pelo enrocamento seja relativa a um material menos alterado e menos fissurado. O material corresponde a parte central dos blocos de basalto de Marimbondo que ainda é um basalto intacto.

Observa-se da Figura 6.21a que, para níveis de tensão \mathbf{s}'_v inferiores a 1MPa, a alteração natural do basalto provoca a redução da não-linearidade da curva \mathbf{s}'_v vs. \mathbf{e}_v .

Nos corpos de prova densos, ensaiados na câmara UNI₃₀, a alteração do basalto provoca uma redução uniforme no módulo M da ordem de 70 a 75MPa, enquanto nos fofos, a redução é pouco representativa (Figura 6.26).

As Figuras 6.27 e 6.28 mostram a variação do módulo M com a tensão efetiva vertical \mathbf{s}'_v dos basaltos da Pedreira, de Marimbondo e dos alterados no laboratório por lixiviação e ciclos de umidade. Vale destacar que, para uma melhor visualização das curvas mostradas nas Figuras 6.27 e 6.28, optou-se por gráficos com a tensão \mathbf{s}'_v em escala linear, diferentemente da logarítmica utilizada no restante dos gráficos apresentados neste trabalho.

Das Figuras verifica-se que a alteração no laboratório provoca o aumento da compressibilidade do enrocamento de basalto. Tal aumento é mais significativo nos enrocamentos densos. Para níveis de tensão \mathbf{s}'_v inferiores a 0,1MPa e níveis de lixiviação contínua superiores a 240 horas, não se observa valores elevados do módulo M , como verificado no basalto intacto da Pedreira. Este comportamento pode ser justificado pela microfissuração superficial dos fragmentos alterados no laboratório com mais de 240 horas de lixiviação (Figuras 6.1 a 6.5). Neste caso, as microfissuras podem propiciar a ruptura dos contatos sob baixos níveis de tensão.

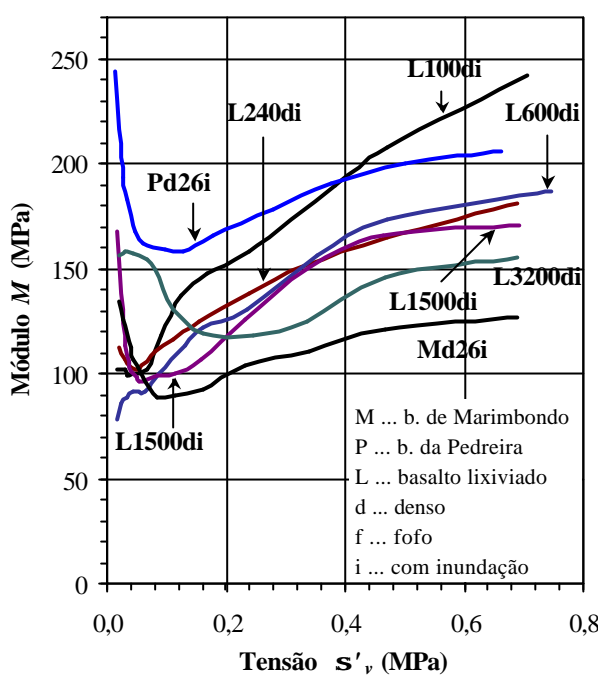
Nas Figuras 6.27b, 6.27d e 6.28 nota-se que a alteração no laboratório provoca o aumento da compressibilidade na fase de recarregamento dos enrocamentos densos e fofos, reduzindo o valor do módulo de compressibilidade M . Nota-se ainda que a variação do módulo M com o tempo de lixiviação ou os ciclos de umidade é função da tensão vertical efetiva.

Finalmente, conclui-se que o comportamento do enrocamento alterado no laboratório tende para o comportamento do enrocamento alterado naturalmente no campo (Marimbondo).

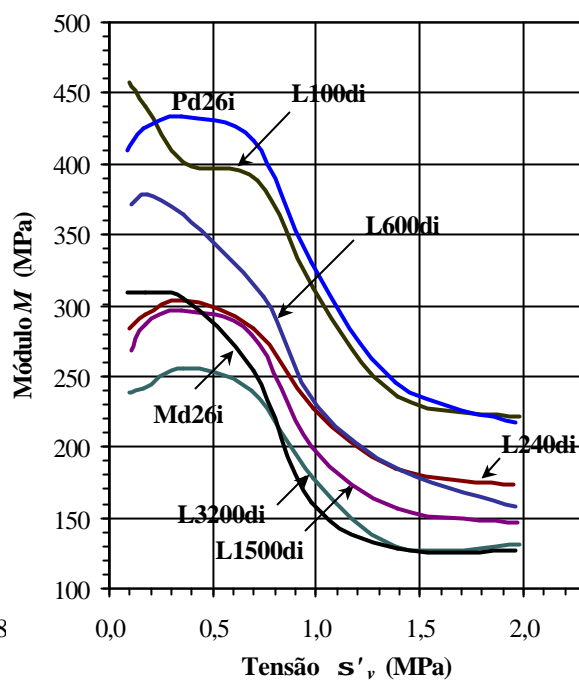
6.3.4.6 *Saturação por submersão e inundação do enrocamento*

Foram executados ensaios em corpos de prova saturados por submersão bem como ensaios com fase de inundação do corpo de prova sob carregamento vertical constante.

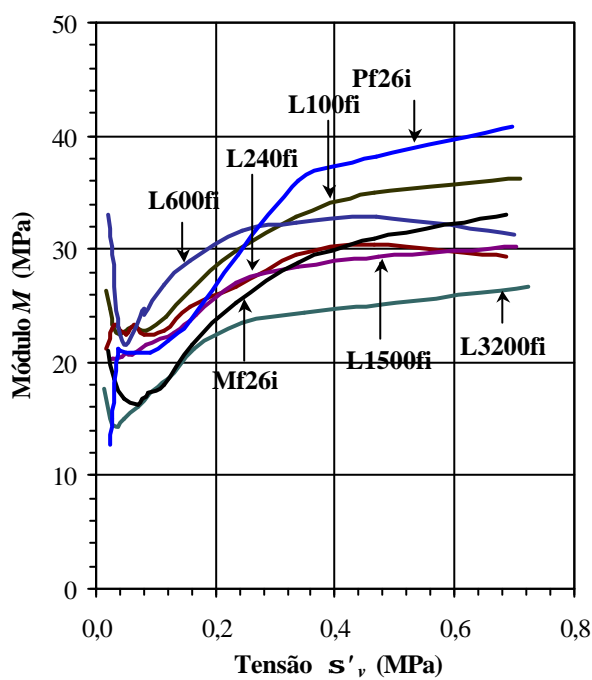
A saturação por submersão da rocha provoca o aumento da compressibilidade do enrocamento, tal como mostrado na Figura 6.29.



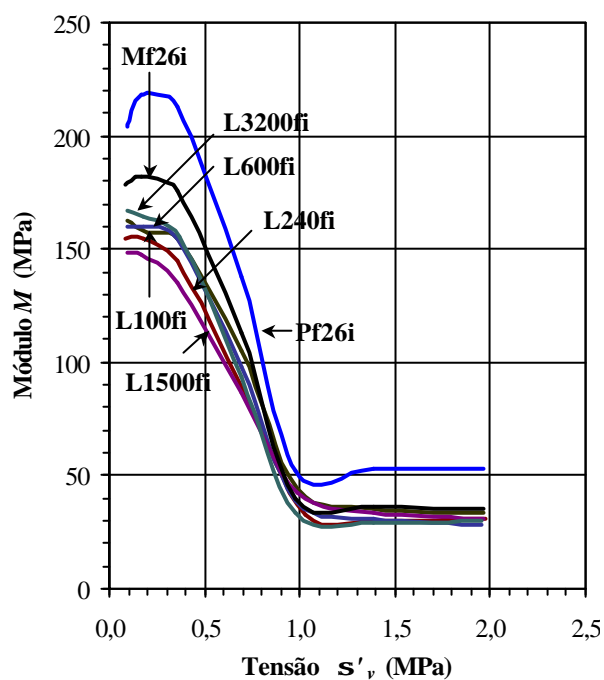
(a) denso - fase de carregamento



(b) denso - fase de recarregamento



(c) fofo - fase de carregamento



(d) fofo - fase de recarregamento

Figura 6.27 - Curvas M vs. s'_v dos enrocamentos de basalto da Pedreira, de Marimbondo e lixiviados, $d_{50} = 26\text{mm}$ - Efeito da alteração por lixiviação.

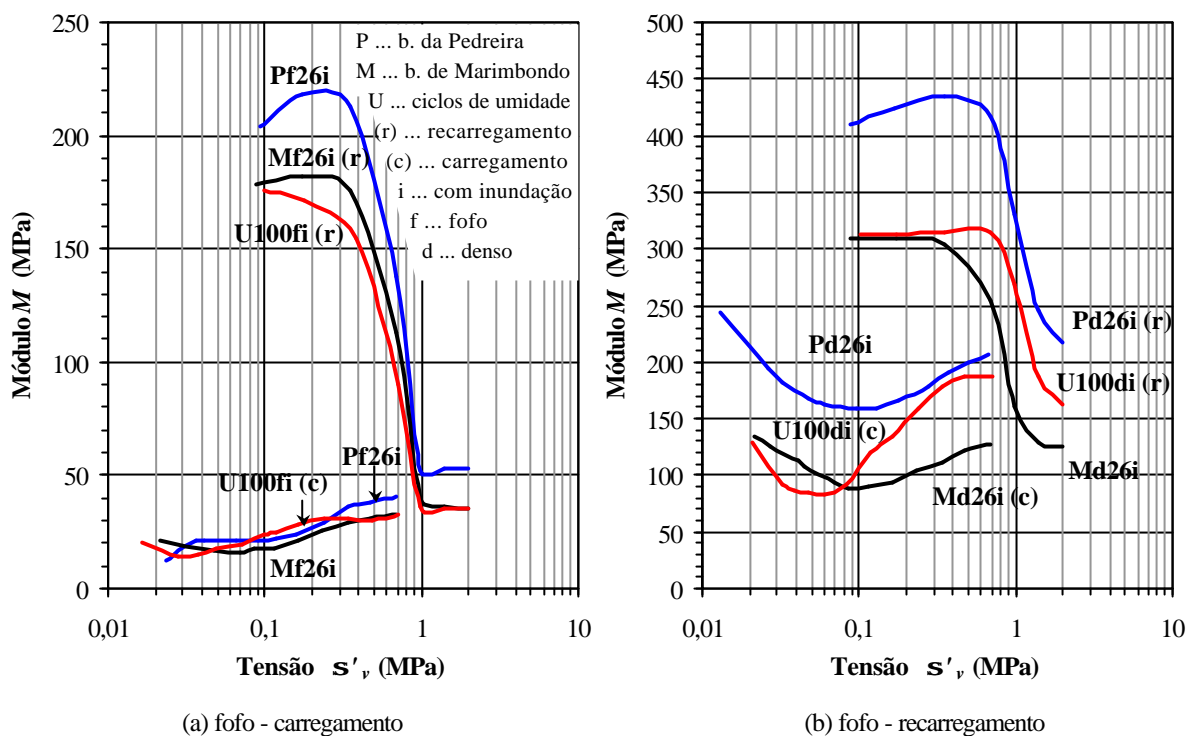


Figura 6.28 - Curvas M vs. s'_v dos enrocamentos de basalto da Pedreira, de Marimbondo e com ciclos de umidade, $d_{50} = 26\text{mm}$ - Efeito da alteração por ciclos de umidade.

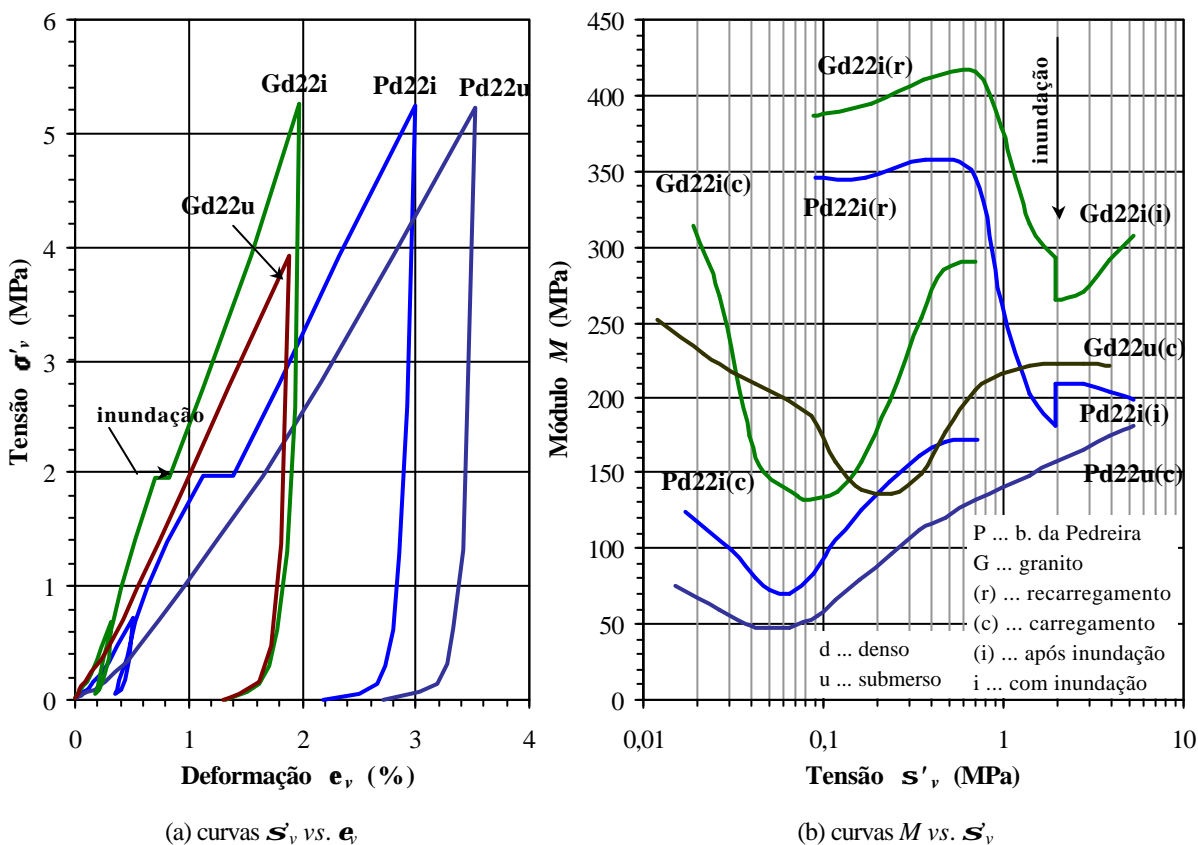


Figura 6.29 - Curvas s'_v vs. e_v e M vs. s'_v dos enrocamentos densos de basalto da Pedreira e de granito, $d_{50} = 22\text{mm}$ - Efeito da inundação e submersão.

Da Figura 6.29a verifica-se que o processo de inundação não provoca o deslocamento da curva \mathbf{s}'_v vs. \mathbf{e}_v do enrocamento seco para a curva do mesmo enrocamento ensaiado sob condição saturada por submersão, como sugerido por Nobani e Duncan (1972) e apresentado na Figura 2.12.

A Figura 6.30 mostra o acréscimo de deformação axial sob tensão axial constante, decorrente da inundação do corpo de prova durante o ensaio de compressão unidimensional. Este acréscimo é denominado colapso e corresponde ao incremento percentual em relação à deformação axial no momento da inundação do corpo de prova. Destaca-se que a inundação dos corpos de prova foi feita para $\mathbf{s}'_v \cong 2000\text{kPa}$. Verifica-se que a alteração natural provoca o aumento do colapso. No entanto, a análise dos efeitos da inundação do material alterado no laboratório, tanto os lixiviados quanto os com ciclos de umidade, não é conclusiva.

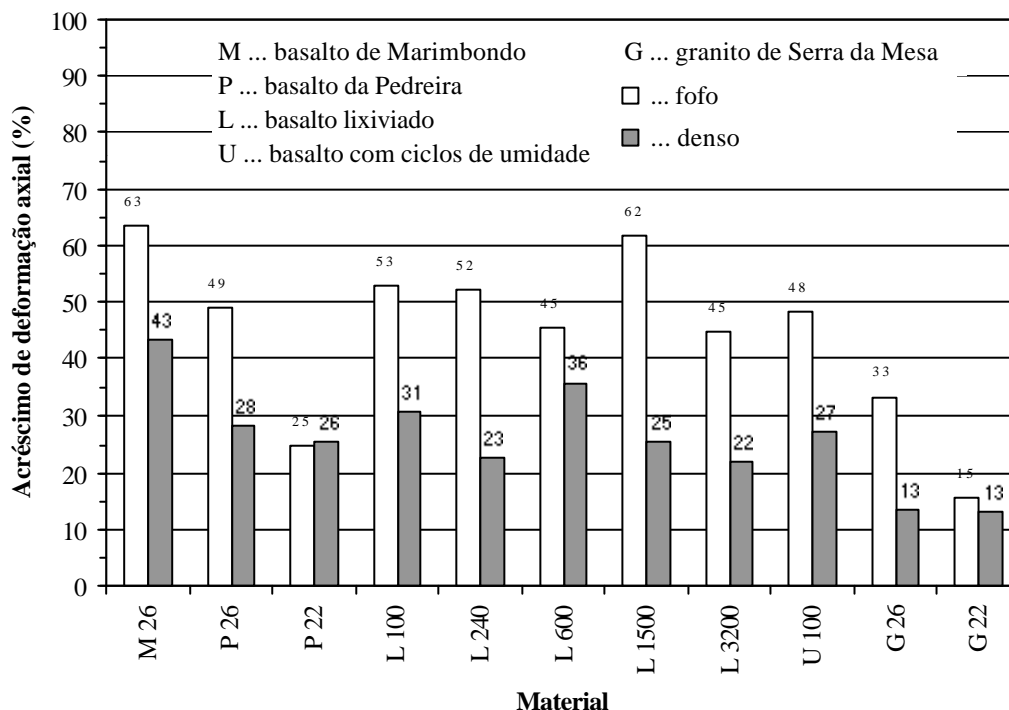


Figura 6.30 - Variação de acréscimo de deformação axial nos enrocamentos de basalto e granito ensaiados na câmara UNI₃₀.

A Figura 6.31 indica uma redução do módulo M devido à inundação do corpo de prova. Tal redução foi obtida através da diferença entre os módulos M determinados nos estágios de carga imediatamente antes e imediatamente depois da inundação. Nos enrocamentos densos, ocorre a redução do módulo M , exceto no ensaio P22. Nos enrocamentos fofos, ocorre o aumento do módulo M , exceto no ensaio G22.