

ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE SOLOS DA FORMAÇÃO PALERMO PARA UTILIZAÇÃO EM SELOS DE IMPERMEABILIZAÇÃO EM ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DE CARVÃO

Ronan Rosso Sartor (1), Adailton Antônio dos Santos (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)ronansartor@gmail.com (2)adailton@unesc.net

RESUMO

A região sul do estado de Santa Catarina deve grande parte de seu desenvolvimento à extração de carvão. Desde sua descoberta na região até a década de 90, a exploração foi estimulada por dificuldades de importação de outros combustíveis e por incentivos do governo federal. A abertura do mercado brasileiro à entrada de investimentos e matérias-primas importadas culminou na crise do setor, que hoje produz, quase que exclusivamente, para a geração de energia termelétrica. Herança dos tempos áureos da mineração, o passivo ambiental gerado é hoje motivo de grande preocupação. Na Região Carbonífera, como é conhecida a região onde a atividade de mineração foi bastante intensa, são 6432 hectares; 85% compõem o passivo ambiental atual. Os projetos de recuperação se preocupam principalmente em isolar a pirita, como comumente é chamado o rejeito do carvão, do contato com a água e com o oxigênio, agentes desencadeadores drenagem ácida. Para isto, são desenvolvidos projetos que incluem a construção de selo de impermeabilização, composto por solo compactado, que além de impedir que a água entre em contato com o rejeito, serve para receber a cobertura vegetal. No Brasil não há legislação específica para este tipo de tratamento, mas tornou-se consenso internacional a utilização de selos impermeabilizantes com coeficiente de permeabilidade menor ou igual 10^{-7} cm/s. A Formação Palermo é predominantemente composta por solos coesivos e com grande potencial impermeabilizante. Das amostras de solos desta Formação, 87,0% apresentaram comportamento condizente com as exigências internacionais. Em uma análise global, a análise estatística mostrou que solos da Formação Palermo podem ser utilizados como materiais para construção de selos de impermeabilização. De forma a refinar os dados, as amostras foram distribuídas de acordo com a classificação HRB, constituindo 3 grupos: A4, onde estão enquadrados 26,1% das mesmas, A6, representado por 43,5% e A7, com 30,4%. A análise estatística dos três grupos elucidou ainda mais as dúvidas sobre o comportamento de solos desta Formação, mostrando que, como esperado, os mesmos possuem com grau de confiança de 90% ($GC_{0,90}$), comportamento adequado à utilização, como camada de proteção, sobre áreas de depósito de rejeitos de carvão mineral.

Palavras-Chave: Formação Palermo, solos, permeabilidade, recuperação ambiental.

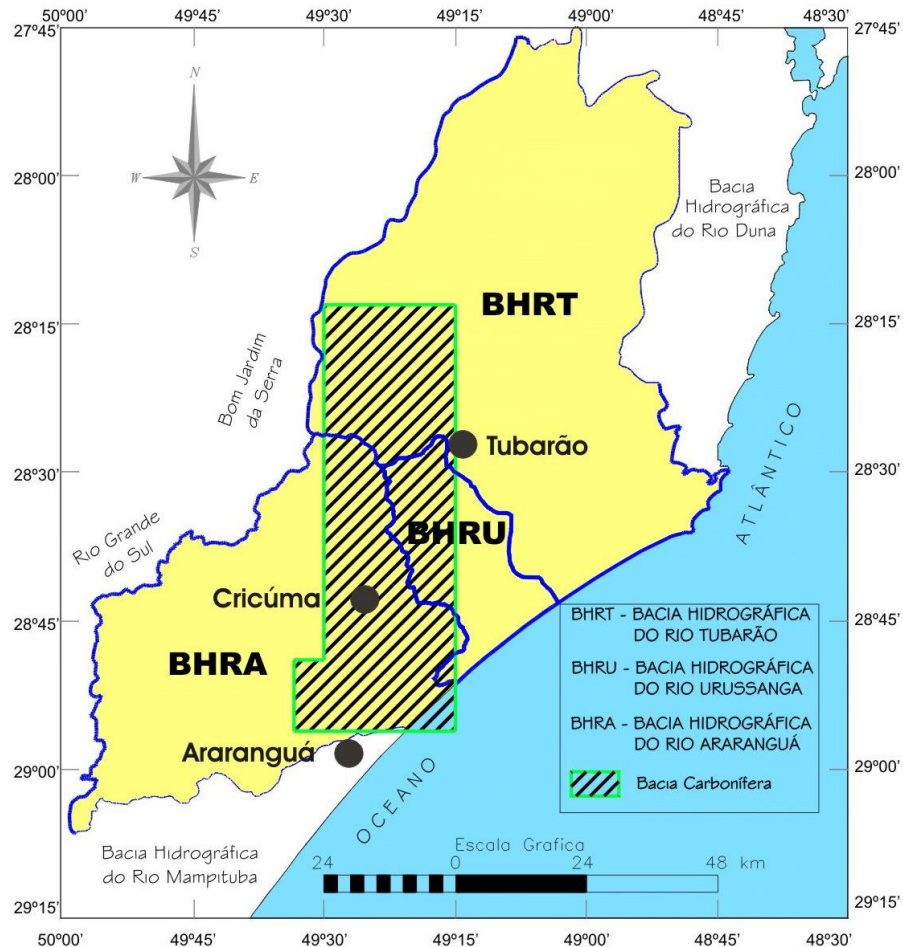
1. INTRODUÇÃO

No estado de Santa Catarina, a exploração do carvão assumiu caráter puramente capitalista e racional durante a Primeira Guerra Mundial [...], onde verificou-se um salto na produção do carvão bruto nunca antes visto na região. (GOULARTI, 2003 apud NUNES, 2009, p.12). Segundo a Associação Brasileira do Carvão Mineral (2013), o segundo surto veio no governo de Getúlio Vargas, com decreto determinando o consumo do carvão nacional e com a construção da CSN. A obrigatoriedade do consumo de carvão foi estabelecida em 10%, em 1931, aumentando esta cota para 20% em 1949. Em meados dos anos 80 começou a haver a gradual retirada dos subsídios à produção e ao consumo de carvão, que haviam começado na década de 70 (crises do petróleo).

A produção de carvão metalúrgico em Santa Catarina chegou a atingir um milhão de toneladas por ano correspondendo a cerca de 10% do consumo nacional em 1985 e cerca de 5% em 1990. Com o fechamento em definitivo do Lavador de Capivari e a desregulamentação do setor no governo Collor (fim da obrigatoriedade da compra de todo carvão metalúrgico nacional) a parcela de carvão nacional utilizada na siderurgia foi substituída pelo carvão importado. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010, p.11)

Atualmente, quase a totalidade do carvão produzido nas minas da região carbonífera do Estado é consumida pelo Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda, com uma pequena parte utilizada na indústria [...]. (GOULART, 2003 apud NUNES, 2009, p.14) A intensa exploração do carvão mineral gerou danos ambientais profundos, não só na cidade de Criciúma, mas em toda região carbonífera, mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Localização do Distrito Carbonífero de Santa Catarina.



Fonte: IPAT/UNESC, 2006, p. 26.

Por suas características, o aproveitamento do carvão catarinense no processo de beneficiamento é extremamente baixo, menos de 35%, e o restante são rejeitos. Devido, em parte, a essas características, à vaga legislação e à sua fraca aplicação até o início dos anos 80, a exploração do carvão mineral em Santa Catarina transformou-se em desastre ambiental. (JICA, SDM, FATMA, 1998 apud ZANETTE, 1999, p.51)

As atividades de mineração apresentam um grau de impacto ambiental de alta magnitude, devido às modificações físicas, químicas e bióticas provocadas nas áreas de influência direta (área de extração) e indireta (beneficiamento) do projeto. (IBAMA, 1990 apud SILVESTRINI, 2013)

Em se tratando do processo de extração e beneficiamento do carvão mineral, pode-se listar como danos ambientais a alteração da topografia original, mudanças no solo, o assoreamento e poluição dos rios, a emissão de poeiras e gases atmosféricos, o desmatamento, o afugentamento da fauna e a excessiva emissão de ruídos.

A execução de projetos ambientais para recuperação de áreas mineradas é uma prática relativamente recente em todo o mundo. Internacionalmente, os projetos desta natureza iniciaram-se, em maior escala, na década de 60, sendo executados os primeiros trabalhos no Brasil, em meados da década de 70. Estes que se constituíram principalmente na recomposição paisagística e recuperação da cobertura vegetal (CETEM, 2001 apud SILVESTRINI, 2013).

Os projetos de recuperação ambiental, principalmente em se tratando de depósitos de rejeitos a céu aberto, iniciam com o isolamento das fontes poluidoras. O contato da pirita com o oxigênio e a água potencializa os danos ambientais, e impermeabilizar os depósitos de estéreis é fundamental.

Seguido aos trabalhos de reconformação do terreno, para proteção dos estéreis à ação direta das intempéries, camadas de solo argiloso com 0,20 a 0,50 m de espessura são utilizadas na sua cobertura (Figura 2). Sobre os estéreis é ainda aplicada uma camada de calcário dolomítico, com a finalidade de minimizar a acidez do substrato, diminuindo assim a geração de drenagem ácida de mina (POLZ, 2008 apud SILVESTRINI, p.27).

Figura 2 – Perfil de solo construído em áreas de recuperação ambiental.



Fonte: IPAT/UNESC, 2002 apud SILVESTRINI, 2013, p.27

Quando o aterro atinge sua cota de encerramento, sobre a superfície final dos resíduos, é construída a cobertura ou revestimento superior, que tem a finalidade de evitar a entrada de água e a saída de gases da massa de resíduos, além de permitir a recomposição paisagística da área (BOSCOV, 2008, p.119). Este é o mesmo cuidado que se tem com áreas de depósitos de rejeito de carvão.

Permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele, sendo o seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade. (CAPUTO, 1988, p.66)

É praticamente consenso que, ao se utilizar solo compactado para impermeabilização, ele possua coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s (10^{-7} cm/s).

O valor do coeficiente de permeabilidade máximo de 10^{-9} m/s resulta da aplicação da lei de Darcy para percolação sobre gradiente hidráulico unitário através de uma camada de impermeabilização de 1 m de espessura, para garantir que o percolado demore no mínimo 30 anos para atravessar a camada, tempo após o qual o percolado, por hipótese, não seria mais poluente (POTTER e YOUNG, 1993 apud BOSCOV, 2008, p.127).

Boskov (2008, p.127) complementa dizendo que esse valor-limite de coeficiente de permeabilidade tornou-se referência para aterros de resíduos, adotado sem maiores questionamentos para a aceitação de materiais e aprovação de projetos.

No Brasil, não há ainda uma norma para critérios de projeto e execução de áreas de recuperação ambiental. O embasamento para a maior parte dos projetos vem das normas NBR 13.896/1997 – Aterros de resíduos não perigosos: Critérios para projeto, implantação e operação e NBR 10.157/1987 – Aterros de resíduos perigosos: Critérios para projeto, construção e operação.

Este trabalho tem por finalidade avaliar a condutividade hidráulica dos solos (k) da Formação Palermo que ocorrem na região sul do Estado de Santa Catarina, em particular no município de Criciúma, quanto ao atendimento do k exigido para selos de impermeabilização compactados na Energia Proctor Normal ($k \leq 10^{-7}$ cm/s). A importância de avaliar o comportamento hidráulico dos solos da referida Formação se deve ao fato dos mesmos se apresentarem em volume bastante significativo e por serem os solos mais utilizados em selos de impermeabilização.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A região sul de Santa Catarina caracteriza-se por presença maciça de solos da Formação Palermo. Segundo Krebs (2004), nas áreas dos municípios de Criciúma e Forquilha, ambos situados no sul, a espessura total dessa Formação chega a valores na ordem de 92 metros. Por isso, pôde-se utilizar dados de diversas jazidas

localizadas na referida região. As coordenadas *Universal Transversor Mercator* (UTM) dos pontos de coleta de amostras estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Coordenadas UTM das jazidas.

	Amostras	Coordenadas UTM			
Jazida A	CM-PV02	664.259,922	m E	6.827.879,774	m N
	CM-PV03	664.183,194	m E	6.827.769,414	m N
	CM-PV04	664.180,638	m E	6.827.891,804	m N
	CM-PV06	664.120,276	m E	6.827.899,322	m N
Jazida B	LB-AM01	665.009,000	m E	6.829.727,000	m N
	LB-AM02	666.018,000	m E	6.829.858,000	m N
Jazida C	PM-PV03AM-01	668.167,454	m E	6.825.756,624	m N
	PM-PV03AM-02	668.167,454	m E	6.825.756,624	m N
	PM-PV04	668.163,916	m E	6.825.651,378	m N
Jazida D	MAsa_01	656.895,000	m E	6.820.255,000	m N
	MAsa_02	656.776,000	m E	6.820.845,000	m N
	MAsa_03	657.418,000	m E	6.820.363,000	m N
	MAsa_04	657.420,000	m E	6.820.494,000	m N
Jazida E	MBsa_01	655.296,000	m E	6.815.546,000	m N
	Mbsa_02	655.260,000	m E	6.815.470,000	m N
	MBsa_03	655.155,000	m E	6.815.443,000	m N
	MBsa_04	655.182,000	m E	6.815.347,000	m N
	MBsa_05	655.183,000	m E	6.815.278,000	m N
	Mbsa_06	655.168,000	m E	6.815.222,000	m N
	MBsa_08	655.184,000	m E	6.815.150,000	m N
	Mbsa_09	654.419,000	m E	6.814.867,000	m N
	MBsa_10	654.301,000	m E	6.814.929,000	m N
	Jazida F	JPN_AM01	652.067,000	m E	6.849.829,00

Fonte: Ronan Rosso Sartor.

Das 23 amostras, 22 foram coletadas em jazidas localizadas na cidade de Criciúma. Apenas uma jazida, a Jazida F, está localizada na cidade de Treviso/SC, município que, ainda hoje, é caracterizado pela intensa exploração de carvão mineral. Os solos da Formação Palermo foram analisados em função de suas características físicas (granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e densidade real),

mecânicas (peso específico seco máximo e umidade ótima) e, em particular, de condutividade hidráulica (k). As características mecânicas e de condutividade hidráulica foram determinadas para o solo compactado na Energia Proctor Normal. As referidas características foram determinadas de acordo com as normas técnicas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Referências normativas para caracterização dos solos

ENSAIO	NORMA
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	
Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização	ABNT NBR 6457:1986
Solo - Análise granulométrica	ABNT NBR 7181:1984
Solo - Determinação do limite de liquidez	ABNT NBR 6459:1984
Solo - Determinação do limite de plasticidade	ABNT NBR 7180: 1984
Solos - Determinação da densidade real	DNER-ME 093/94
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	
Solo - Ensaio de compactação	ABNT NBR 7182:1986
ENSAIO DE PERMEABILIDADE	
Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável	ABNT NBR 14545:2000

Fonte: Ronan Rosso Sartor

Além dos resultados obtidos, através dos ensaios mostrados na Tabela 2, analisou-se o comportamento dos solos da Formação Palermo em relação ao índice de vazios (e), determinado pela razão entre a densidade real (δ) e o peso específico seco máximo ($\gamma_{s\text{ máx}}$), como mostra a equação 1.

$$e = \left(\frac{\delta}{\gamma_{s\text{ máx}}} \right) - 1 \quad (1)$$

Os parâmetros estudados foram analisados estatisticamente com intuito de determinar os valores com grau de confiança de 90% (GC_{90}), obtidos através da equação 2.

$$k(GC_{0,90}) = k_m - \frac{s \cdot t_{0,90}}{\sqrt{(n-1)}} \quad (2)$$

Onde: k_m - média aritmética das “ n ” amostras ensaiadas;

s - desvio padrão

n - número de amostras ensaiadas;

$t_{0,90}$ - coeficiente relativo ao intervalo de confiança de 90%.

O coeficiente $t_{0,90}$ foi retirado da Tabela 3.

Tabela 3 – Valores do percentil $t_{0,90}$ em função dos valores de n .

n	$t_{0,90}$	n	$t_{0,90}$	n	$t_{0,90}$
2	3,08	12	1,36	22	1,32
3	1,89	13	1,36	23	1,32
4	1,64	14	1,35	24	1,32
5	1,53	15	1,34	25	1,32
6	1,48	16	1,34	26	1,32
7	1,44	17	1,34	27	1,32
8	1,42	18	1,33	28	1,31
9	1,40	19	1,33	29	1,31
10	1,38	20	1,33	30	1,31
11	1,37	21	1,32	-	-

Fonte: Deinfra, 2002

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E HIDRÁULICA DOS SOLOS DA FORMAÇÃO PALERMO

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização física, mecânica e de condutividade hidráulica, bem como a classificação *Highway Research Board* (HRB) das amostras de solo objeto de estudo.

Tabela 4 – Caracterização física, mecânica e hidráulica dos solos da Formação Palermo.

AMOSTRA	γ_s máx (g/cm ³)	$w_{\text{ótima}}$ (%)	δ (g/cm ³)	e	K_{20} (cm/s)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	P_{p200}	HRB
MAAsa_02	1,630	18,70	2,650	0,63	3,53E-07	29,0	21,2	7,8	> 35	A4
MBsa_01	1,510	24,20	2,650	0,75	1,46E-07	19,6	15,1	4,5	> 35	A4
MBsa_06	1,580	18,80	2,630	0,66	5,30E-08	32,1	22,5	9,6	> 35	A4
MBsa_08	1,650	20,30	2,730	0,65	1,10E-07	30,8	20,8	10,0	> 35	A4
MBsa_10	1,620	21,00	2,700	0,67	1,15E-07	33,4	23,3	10,1	> 35	A4
PM-PV04	1,577	21,10	2,665	0,69	2,47E-06	0,0	0,0	0,0	85,5	A4
MAAsa_01	1,560	19,80	2,630	0,69	4,67E-07	32,2	21,6	10,6	> 35	A6
MAAsa_03	1,450	28,00	2,890	0,99	3,19E-07	38,2	26,0	12,2	> 35	A6
MAAsa_04	1,670	17,90	2,710	0,62	2,08E-07	29,4	16,0	13,4	> 35	A6
Mbsa_02	1,610	16,20	2,540	0,58	7,69E-09	29,9	18,9	11,0	> 35	A6
MBsa_03	1,620	20,40	2,720	0,68	1,02E-07	37,0	20,0	17,0	> 35	A6
MBsa_04	1,700	19,40	2,710	0,59	1,49E-07	33,1	19,9	13,2	> 35	A6
MBsa_05	1,660	20,20	2,730	0,64	1,01E-07	33,1	21,9	11,2	> 35	A6
MBsa_09	1,520	23,90	2,630	0,73	7,08E-08	36,2	25,1	11,1	> 35	A6
CM-PV02	1,676	18,50	2,657	0,59	5,83E-07	33,0	20,0	13,0	45,1	A6
PM-PV03AM-01	1,574	21,30	2,673	0,70	1,29E-06	39,0	27,0	12,0	97,6	A6
CM-PV04	1,590	22,50	2,640	0,66	4,85E-07	42,0	30,0	12,0	43,3	A7-5
CM-PV06	1,435	27,00	2,668	0,86	2,10E-07	56,0	33,0	23,0	98,6	A7-5
LB-AM02	1,455	26,50	2,710	0,86	5,22E-07	53,0	31,0	22,0	99,1	A7-5
CM-PV03	1,543	22,60	2,689	0,74	6,17E-07	47,0	29,0	18,0	97,9	A7-6
LB-AM01	1,572	23,30	2,680	0,70	1,74E-07	43,0	28,0	15,0	92,4	A7-6
JPN-AM01	1,560	24,11	2,640	0,69	1,60E-07	45,2	25,3	19,9	61,8	A7-6
PM-PV03AM02	1,603	19,90	2,714	0,69	2,07E-06	42,0	26,0	16,0	95,2	A7-6

Fonte: Ronan Rosso Sartor

Em uma análise primária, pode-se verificar que algumas amostras não apresentam o percentual exato de solo passante na peneira 200 (P_{p200}). No entanto, a denominação adotada ($P_{p200} > 35\%$) já é suficiente para que o solo seja enquadrado na classificação HRB.

A análise da tabela acima demonstra que os solos estudados são, em maior proporção, argilosos de alta plasticidade (A7-5 e A7-6), média plasticidade (A6) e em menor proporção, siltsos de baixa plasticidade a não plásticos (A4).

Variável de principal interesse no estudo desenvolvido, o coeficiente de permeabilidade (k), para amostras de solo compactadas na Energia Proctor Normal apresentou grande variação, com valores entre $1,29 \times 10^{-6}$ e $7,69 \times 10^{-9}$ cm/s.

Levando-se em consideração que para serem utilizados como selos de impermeabilização, os materiais precisam apresentar um $k \leq 10^{-7}$ cm/s, verifica-se que 87,0% das amostras atendem esta determinação.

Para definir o comportamento dos solos analisados, é apresentada na Tabela 5 a análise estatística dos resultados obtidos.

Tabela 5 – Tratamento estatístico dos parâmetros físicos, mecânicos e hidráulicos do solo da Formação Palermo.

	γ_s máx (g/cm ³)	$h_{ótima}$ (%)	δ (g/cm ³)	e	K_{20} (cm/s)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Número de amostras	23	23	23	23	23	23	23	23
Média (X_{MED})	1,581	21,55	2,68	0,70	5,12E-07	36,5	22,7	12,7
Desvio Padrão (S)	0,071	2,97	0,06	0,09	6,22E-07	11,0	6,6	5,1
$t_{0,90}$ de Student	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
GC_{0,90}	1,579	21,46	2,679	0,70	4,93E-07	36,13	22,48	12,6

Fonte: Ronan Rosso Sartor

Rostirolla (2012) verificou o comportamento físico e mecânico de 83 amostras de solo da Formação Palermo da região sul de Santa Catarina. Analisando-se os resultados estatísticos constantes na Tabela 5, constata-se que há um comportamento físico e mecânico dos solos estudados no presente trabalho, semelhantes aos obtidos por Rostirolla (2012), no que tange ao GC_{0,90}. A Tabela 6 apresenta um comparativo entre os valores obtidos neste estudo e os determinados por Rostirolla (2012).

Tabela 6 – Análise comparativa de parâmetros físicos e mecânicos com GC_{0,90}.

PARÂMETRO	Estudo	Rostirolla (2012)	Variação (%)
γ_s máx (g/cm ³)	1,579	1,558	1,35
$h_{ótima}$ (%)	21,46	21,63	-0,79
IP (%)	12,6	14,9	-15,48

Fonte: Ronan Rosso Sartor

Percebe-se que os valores de γ_s máx e umidade ótima ($h_{ótima}$) apresentam pequena variação; 1,35 e -0,79%, respectivamente. Já o valor de IP apresentou-se 15,48% inferior ao obtido por Rostirolla (2012), que foi 14,9%. No entanto, isso não altera a

classificação destes solos quanto à plasticidade, que, de acordo com Burmister apud Das (2007), em ambas as pesquisas, é média.

O índice de vazios obtido para as amostras compactadas na Energia Proctor Normal apresentou valor médio e $GC_{0,90}$ idênticos, ou seja, de 0,70, valor este que, a partir do que determina Internacional *Association for Engineering Geology and the Environment* - IAEG (1979), configura índice de vazios médio. A análise estatística permite afirmar que o valor com grau de confiança de 90% é de $4,93 \times 10^{-7}$ cm/s, confirmando o potencial impermeabilizante de solos desta Formação.

3.1.1. Caracterização do solo de acordo com a classificação HRB

A Tabela 7 apresenta a distribuição das 23 amostras de solo analisadas de acordo com a classificação HRB. Para critério de análise, as amostras classificadas como A7-5 e A7-6 foram agrupadas, configurando o grupo A7.

Tabela 7 – Distribuição das amostras de acordo com a classificação HRB.

HRB	QUANTIDADE	%
A4	6	26,1%
A6	10	43,5%
A7	7	30,4%
	23	100,0%

Fonte: Ronan Rosso Sartor

3.1.1.1. Caracterização dos solos do grupo A4

A Tabela 8 apresenta os resultados dos ensaios dos solos do grupo A4 e o tratamento estatístico dos parâmetros geotécnicos dos solos deste grupo.

Tabela 8 – Caracterização física, mecânica e hidráulica dos solos do grupo A4.

AMOSTRA	γ_s máx (g/cm ³)	$h_{ótima}$ (%)	δ (g/cm ³)	e	K_{20} (cm/s)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Pp_{200}	HRB
MA _{sa} _02	1,630	18,7	2,650	0,63	3,53E-07	29,0	21,2	7,8	> 35	A4
MB _{sa} _01	1,510	24,2	2,650	0,75	1,46E-07	19,6	15,1	4,5	> 35	A4
MB _{sa} _06	1,580	18,8	2,630	0,66	5,30E-08	32,1	22,5	9,6	> 35	A4
MB _{sa} _08	1,650	20,3	2,730	0,65	1,10E-07	30,8	20,8	10,0	> 35	A4
MB _{sa} _10	1,620	21,0	2,700	0,67	1,15E-07	33,4	23,3	10,1	> 35	A4
PM-PV04	1,577	21,1	2,665	0,69	2,47E-06	0,0	0,0	0,0	85,5	A4
Número de amostras	6	6	6	6	6	6	6	6		
Média (X_{MED})	1,595	20,68	2,671	0,68	5,41E-07	24,2	17,2	7,0	-	-
Desvio Padrão (S)	0,046	1,84	0,034	0,04	8,68E-07	11,7	8,1	3,7		
$t_{0,90}$ de Student	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48		
GC_{0,90}	1,588	20,41	2,666	0,67	4,13E-07	22,4	15,9	6,5	-	-

Fonte: Ronan Rosso Sartor

Visto que Rostirolla (2012) também analisou o comportamento físico e mecânico das amostras de acordo com a classificação HRB, lançou-se mão dos dados publicados por ele para fazer um comparativo com os resultados obtidos neste trabalho, os quais encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Análise comparativa de parâmetros físicos e mecânicos com GC_{0,90} para solos do grupo A4.

PARÂMETRO	Estudo	Rostirolla (2012)	Variação (%)
γ_s máx (g/cm ³)	1,588	1,651	-3,83
$h_{ótima}$ (%)	20,41	15,67	30,26
IP (%)	6,5	3,9	64,26

Fonte: Ronan Rosso Sartor

O comportamento dos solos do grupo A4, quanto ao γ_s máx, apresentou valor 3,83% inferior ao obtido por Rostirolla (2012). No entanto, as variações de $h_{ótima}$ e IP são elevadas, chegando a 64,26% para os valores de IP. Tal diferença entre os valores de IP faz com que, baseando-se no que sugere Burmister apud Das (2007), os solos A4 deste trabalho apresentem plasticidade baixa, enquanto os analisados por Rostirolla (2012) sejam classificados como ligeiramente plásticos.

O índice de vazios, que está diretamente associado ao coeficiente de permeabilidade, apresentou valor com GC_{0,90} de 0,67, configurando, segundo IAE (1979), solo de média permeabilidade. O potencial de impermeabilização dos solos

compactados do grupo A4 é comprovado através do valor de k com $GC_{0,90}$, que é $4,13 \times 10^{-7}$ cm/s.

3.1.1.2. Caracterização dos solos do grupo A6

Os solos do grupo A6 são os de maior representatividade neste estudo, onde 43,5% do total das amostras enquadram-se nesta classificação. Na tabela 10 são mostrados os resultados dos ensaios físicos, mecânicos e hidráulico realizados nas amostras pertencentes a este grupo.

Tabela 10 – Caracterização física, mecânica e hidráulica dos solos do grupo A6.

AMOSTRA	γ_s máx (g/cm ³)	$h_{ótima}$ (%)	δ (g/cm ³)	e	K_{20} (cm/s)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	P_{p200}	HRB
MA _{sa} _01	1,560	19,8	2,630	0,69	4,67E-07	32,2	21,6	10,6	> 35	A6
MA _{sa} _03	1,450	28,0	2,890	0,99	3,19E-07	38,2	26,0	12,2	> 35	A6
MA _{sa} _04	1,670	17,9	2,710	0,62	2,08E-07	29,4	16,0	13,4	> 35	A6
Mb _{sa} _02	1,610	16,2	2,540	0,58	7,69E-09	29,9	18,9	11,0	> 35	A6
MB _{sa} _03	1,620	20,4	2,720	0,68	1,02E-07	37,0	20,0	17,0	> 35	A6
MB _{sa} _04	1,700	19,4	2,710	0,59	1,49E-07	33,1	19,9	13,2	> 35	A6
MB _{sa} _05	1,660	20,2	2,730	0,64	1,01E-07	33,1	21,9	11,2	> 35	A6
MB _{sa} _09	1,520	23,9	2,630	0,73	7,08E-08	36,2	25,1	11,1	> 35	A6
CM-PV02	1,676	18,5	2,657	0,59	5,83E-07	33,0	20,0	13,0	45,1	A6
PM-PV03AM-01	1,574	21,3	2,673	0,70	1,29E-06	39,0	27,0	12,0	97,6	A6
Número de amostras	10	10	10	10	10	10	10	10		
Média (X_{MED})	1,604	20,56	2,689	0,68	3,30E-07	34,1	21,6	12,5	-	-
Desvio Padrão (S)	0,075	3,15	0,086	0,12	3,64E-07	3,2	3,3	1,8		
$t_{0,90}$ de Student	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38		
$GC_{0,90}$	1,598	20,32	2,682	0,67	3,02E-07	33,9	21,4	12,3	-	-

Fonte: Ronan Rosso Sartor

Baseado nos estudos de Rostirolla (2012), analisou-se a variação dos parâmetros físicos e mecânicos expostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Análise comparativa de parâmetros físicos e mecânicos com $GC_{0,90}$ para solos do grupo A6.

PARÂMETRO	Estudo	Rostirolla (2012)	Variação (%)
γ_s máx (g/cm ³)	1,598	1,582	1,03
$h_{ótima}$ (%)	20,32	19,6	3,61
IP (%)	12,3	19,2	-35,86

Fonte: Ronan Rosso Sartor

As amostras de solo da Formação Palermo classificadas como A6 pela classificação HRB, apresentaram comportamento mecânico semelhante em ambas as pesquisas. Prova disso é a pequena variação dos valores de $\gamma_{sm\acute{a}x}$ e de $h_{\acute{o}tima}$, que não ultrapassou 3,61%. Os valores de IP, apesar de apresentarem grande variação entre si (35,86%) são classificados, segundo Burmister apud Das (2007), como solos de plasticidade média.

Coincidentemente, o valor do índice de vazios com $GC_{0,90}$ dos solos do grupo A6 foi exatamente o mesmo obtido para o grupo A4: 0,67. A capacidade de impermeabilização dos solos do grupo A6 é justificada pelo valor com $CG_{0,90}$ de $3,02 \times 10^{-7}$ cm/s.

3.1.1.3. Caracterização dos solos do grupo A7

Os solos da Formação Palermo enquadrados no grupo A7 da classificação HRB, que correspondem a 30,4% das amostras, foram analisados e suas características estão detalhadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Caracterização física, mecânica e hidráulica dos solos do grupo A7

AMOSTRA	γ_s máx (g/cm ³)	$h_{\acute{o}tima}$ (%)	δ (g/cm ³)	e	K_{20} (cm/s)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	P_{p200}	HRB
CM-PV04	1,590	22,5	2,640	0,66	4,85E-07	42,0	30,0	12,0	43,3	A7-5
CM-PV06	1,435	27,0	2,668	0,86	2,10E-07	56,0	33,0	23,0	98,6	A7-5
LB-AM02	1,455	26,5	2,710	0,86	5,22E-07	53,0	31,0	22,0	99,1	A7-5
CM-PV03	1,543	22,6	2,689	0,74	6,17E-07	47,0	29,0	18,0	97,9	A7-6
LB-AM01	1,572	23,3	2,680	0,70	1,74E-07	43,0	28,0	15,0	92,4	A7-6
JPN-AM01	1,560	24,1	2,640	0,69	1,60E-07	45,2	25,3	19,9	61,8	A7-6
PM-PV03AM02	1,603	19,9	2,714	0,69	2,07E-06	42,0	26,0	16,0	95,2	A7-6
Número de amostras	7	7	7	7	7	7	7	7		
Média (X_{MED})	1,537	23,70	2,677	0,75	6,05E-07	46,9	28,9	18,0	-	-
Desvio Padrão (S)	0,061	2,27	0,028	0,08	6,22E-07	5,2	2,5	3,7		
$t_{0,90}$ de Student	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44		
$GC_{0,90}$	1,530	23,43	2,674	0,74	5,31E-07	46,3	28,6	17,5	-	-

Fonte: Ronan Rosso Sartor

Comparando-se os dados de caracterização física e mecânica supracitados com os obtidos por Rostirolla (2012), elaborou-se a Tabela 13.

Tabela 13 – Análise comparativa de parâmetros físicos e mecânicos com $GC_{0,90}$ para solos do grupo A7.

PARÂMETRO	Estudo	Rostirolla (2012)	Variação (%)
$\gamma_{s\text{ máx}}$ (g/cm^3)	1,530	1,409	8,55
$h_{\text{ótima}}$ (%)	23,43	27,27	-14,1
IP (%)	17,5	20,7	-15,2

Fonte: Ronan Rosso Sartor

A variação de 8,55% observada na comparação dos valores de $\gamma_{smáx}$ é relativamente pequena. Observa-se que a $h_{\text{ótima}}$, outro parâmetro relacionado ao comportamento mecânico dos solos, não apresentou o mesmo comportamento, ficando, inclusive, inferior ao observado por Rostirolla (2012). Em relação ao IP, a classificação de Busmister (1949) permite considerar que os solos do grupo A7 analisados neste estudo apresentam plasticidade média, enquanto a pesquisa de Rostirolla (2012) sugere comportamento altamente plástico.

O índice de vazios para solos do grupo A7, com $GC_{0,90}$, foi de 0,74, que, segundo IAEG (1979) é característico de solos de média porosidade. Associando-se os valores índice de vazios aos valores de coeficiente de permeabilidade, percebe-se que estes parâmetros estão diretamente associados, visto que os solos do grupo A7 apresentaram, além do maior valor de índice de vazios (e), o maior k com $GC_{0,90}$: $5,31 \times 10^{-7}$ cm/s. A capacidade de impermeabilização dos solos deste grupo é justificada pelo valor de k .

4. CONCLUSÕES

Em relação às propriedades físicas e mecânicas, a maior parte dos atributos do solo se aproxima dos dados obtidos nos estudos de Rostirolla (2012).

A Tabela 14 apresenta o resumo das principais características, com $GC_{0,90}$, dos solos da Formação Palermo.

Tabela 14 – Resumo dos parâmetros do solo da Formação Palermo.

HRB	REPRESENTATIVIDADE	e	k ₂₀ (cm/s)
A4	26,1%	0,67	4,13E-07
A6	43,5%	0,67	3,02E-07
A7	30,4%	0,74	5,31E-07
Formação Palermo	100,0%	0,70	4,93E-07

Fonte: Ronan Rosso Sartor

Das 23 amostras, 26,1% foram enquadradas no grupo A4 da classificação HRB, 43,5% no grupo A6 e 30,4% no grupo A7. Dentre estes três grupos, o grupo A6 foi o que apresentou o menor coeficiente de permeabilidade, associado a um índice de vazios de 0,67. Solos do grupo A4, coincidentemente, apresentaram valor de índice de vazios com $GC_{0,90}$ idêntico ao valor verificado para solos do grupo A6. O k para solos do grupo A4 foi o segundo menor: $4,13 \times 10^{-7}$ cm/s. O maior valor de coeficiente de permeabilidade foi obtido para solos do grupo A7, que apresentaram também, o maior valor de índice de vazios. Todos os grupos apresentaram valores de k na casa de 10^{-7} cm/s, atendendo o que recomendam Potter e Young apud Boscov (2008). A análise global confirma este valor, com os solos da Formação Palermo apresentando k, com 90% de confiança, de $4,93 \times 10^{-7}$ cm/s

A conclusão a respeito das propriedades impermeabilizantes dos solos desta Formação faz com que, ao se constatar que o solo em análise pertence à Formação Palermo, antevê-se que o mesmo pode ser aplicado em áreas de recuperação.

Para ampliar a confiabilidade dos dados, sugere-se que seja criado um banco de dados com valores de permeabilidade de solos das mais diversas formações geológicas que ocorrem na região sul do estado. Outra possibilidade a ser considerada é elaborar equações que correlacionem atributos físicos e mecânicos com o coeficiente de permeabilidade.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL (Brasil). **História do Carvão no Brasil**: Os ciclos do carvão na região carbonífera de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=8&i_area=4>. Acesso em: 09 jun. 2013.

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 247 p.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 3.v

DAS, Braja M.. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson, 2007. 561 p.

IPAT/UNESC. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2006. **Diagnóstico Ambiental de Áreas Degradadas pela mineração de carvão. Mina A e Mina B (Criciúma, SC) e Depósitos de Rejeito - Módulos I e II (Forquilha, SC)**. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Relatório técnico. Criciúma, 405 p.

KREBS, A.S.J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC**. Florianópolis, UFSC, Departamento de geografia, 2004. v.1. 375 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Emissão de gases de efeito estufa no setor energético: Emissões Fugitivas na mineração e beneficiamento do carvão mineral**. Brasília, 2010. 81 p.

NUNES, Rafael Pizzolo. **Utilização de composto orgânico no cultivo de espécies herbáceas, com vistas ao seu potencial uso em recuperação de áreas degradadas pela mineração do carvão**. 2009. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009.

ROSTIROLLA, Rafael Casagrande. **Determinação dos parâmetros físicos e mecânicos dos solos da Formação Palermo e Rio Bonito do Município de Criciúma**. 2012. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2012.

SILVESTRINI, Tiago Alexandre Manenti. **Projeto de recuperação de áreas degradadas pela mineração a céu aberto: Possíveis implicações dos "usos futuros" aplicados às áreas visando a segurança e estabilidade dos solos construídos**. 2013. 71 f. Monografia (Especialista) - Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

ZANETTE, Vanilde Citadini. **Diagnóstico ambiental da região carbonífera no sul de Santa Catarina: Recuperação de áreas degradadas pela mineração do carvão. Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v. 5, n. 2, p.51-61, dez. 1999. Anual.