

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O programa experimental constou da realização de ensaios de caracterização geotécnica, condutividade hidráulica, cisalhamento direto, resistência à compressão simples e contração para determinação do comportamento físico-mecânico-hidráulico do material de estudo. Adicionalmente foram realizados ensaios químicos e mineralógicos para auxiliar na compreensão do comportamento do material. A Tabela 13 lista os ensaios realizados no programa experimental.

Tabela 13: Programa Experimental.

Programa Experimental	Nº de ensaios
Ensaio Geotécnicos	
Determinação da Densidade dos Grãos (Gs)	01
Granulometria (Peneiramento + Sedimentação)	01
Limites de Consistência (LL e LP)	01
Teor de Matéria Orgânica	01
Cisalhamento Direto	42
Condutividade Hidráulica	15
Compressão Simples	15
Compactação (Cilindro pequeno)	39
Compactação (Cilindro grande)	14
Ensaio Mineralógicos	
Difração de Raios X	03
Microscopia Eletrônica de Varredura	05
Ensaio Químicos	
pH	01
Fluorescência de Raios X	01

4.1.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A Figura 67 apresenta a curva de distribuição granulométrica obtida no ensaio de granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação), com adição do defloculante hexametáfosfato de sódio. E a seguir, na Tabela 14, tem-se um resumo das frações que compõem o solo estudado.

O valor de Gs, obtido para o solo estudado foi de 2,50 Mg/m³. Esse valor é bastante baixo se comparado com os valores apresentados para os principais minerais, tais como: quartzo (2,7), caulinita (2,66 - 2,92), ilita (2,80 - 2,83) e esmectita (2,45).

A amostra de solo apresentou quantidade elevada de finos 99,6 %, um indicativo que sugere que o material possa ser um bom material para construção de barreiras minerais de aterros sanitários, visto que materiais com elevada quantidade de finos apresentam baixos valores de condutividade hidráulica.

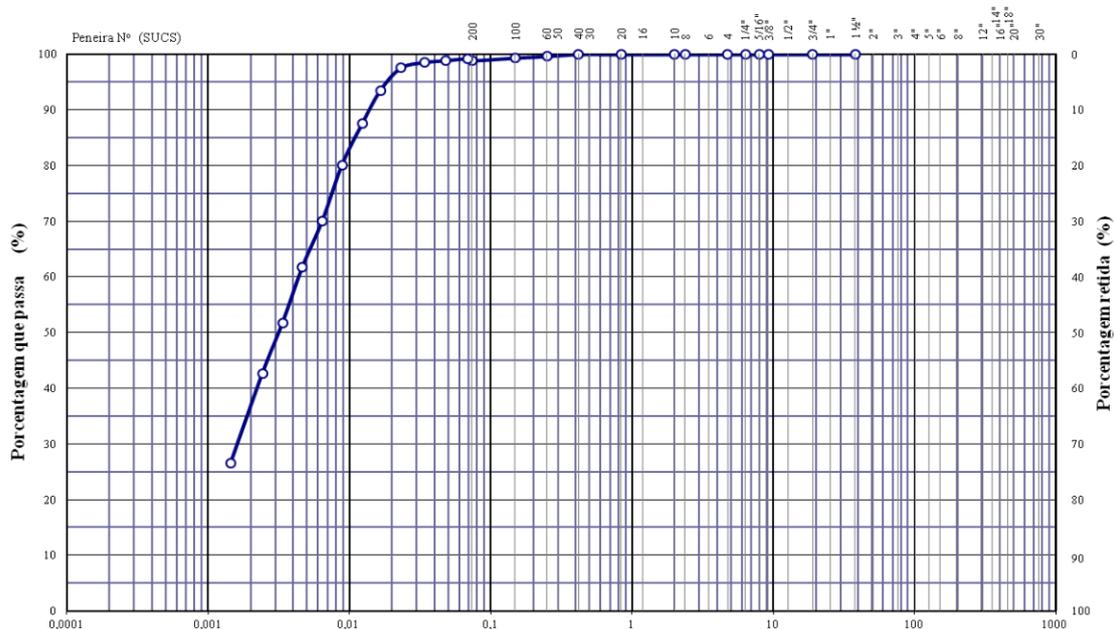


Figura 68: Curva granulométrica do solo em estudo.

Tabela 14: Resumo das características granulométricas dos materiais, em porcentagem.

Amostra	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
Solo Siltoso	0,0	0,0	0,4	0,4	63,5	35,7

Os limites de consistência (liquidez e plasticidade) foram obtidos a partir da execução dos ensaios especificados. Com estes dados foi calculado o índice de plasticidade (dado pela diferença de ambos os limites) e a atividade do material, que estão reunidos na Tabela 15.

Tabela 15: Limites de Consistência (%), índice de plasticidade e atividade.

	Solo Siltoso
Limite de Liquidez (WL)	64,2
Limite de Plasticidade (WP)	35,8
Índice de Plasticidade (IP)	28,4
Índice de Atividade (I_a)	0,79

Os limites de consistência indicam a influência da fração argila no comportamento dos solos. A atividade, por sua vez, é função da composição mineralógica da fração argila. Quanto à atividade dos materiais em estudo, de acordo com a fração argila, um solo se classifica da seguinte forma:

- $I_a < 0,75$: inativo

- $1,25 > I_a > 0,75$: atividade normal
- $I_a > 1,25$: ativo

Utilizando o critério de Skempton (*apud* Lambe e Whitmann, 1979), o solo apresentou uma atividade normal.

Com os dados de LL, IP (Tabela 15) e da análise granulométrica (Tabela 14) o solo foi classificado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), com emprego da norma D 2487 (ASTM, 2011).

Segundo este sistema de classificação, o solo possui granulometria fina (50,0 % ou mais da massa do solo passa na peneira #200), entrando com os valores do Limite de Liquidez e do Índice de Plasticidade na Carta de Plasticidade do SUCS pode-se classifica-lo. Na Figura 68 apresenta-se a Carta de Plasticidade do SUCS, com o posicionamento do solo em análise.

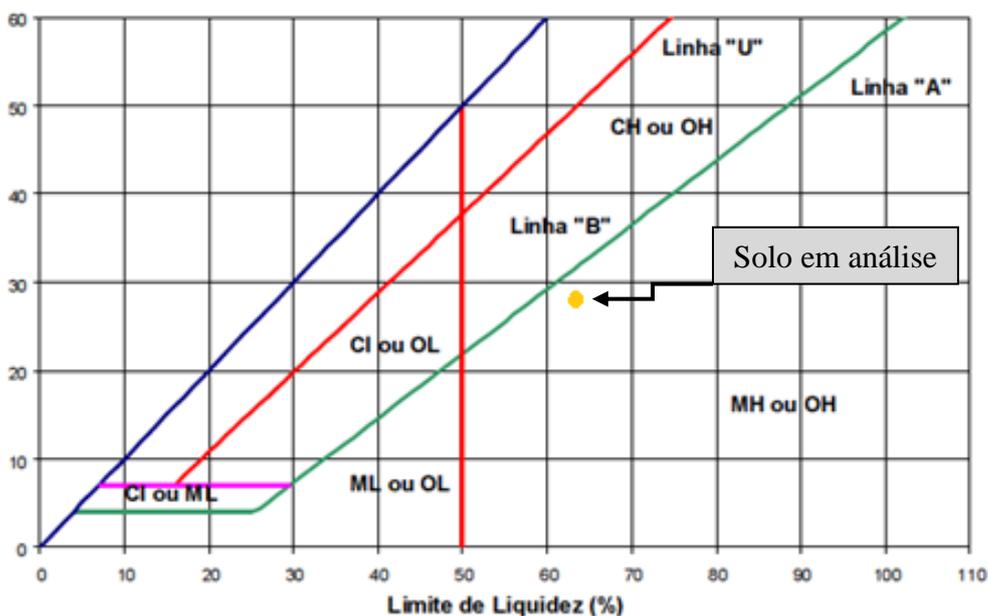


Figura 69: Carta de Plasticidade de Casagrande.

A amostra de solo é classificada como um Silte muito plástico (MH).

Esta classificação como silte muito plástico (MH) mostra que, de acordo com os valores sugeridos pela CETESB (1993), o solo pode não proporcionar valores de condutividade inferiores ao especificado, fator exigido para a construção de barreiras minerais com solos compactados para base de aterros sanitários.

Contudo, ressalta-se que este fator não restringe o uso do solo como material de construção de barreiras minerais, sendo considerado com um fator preliminar de escolha de solos. Desta forma o trabalho de caracterização do solo foi completado, como proposto inicialmente.

4.2.

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Com os resultados do ensaio de Azul de Metileno foram obtidos os valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e de Superfície Específica (SE), cujos resultados estão reunidos na Tabela 16.

Tabela 16: Capacidade de Troca Catiônica e Superfície Específica.

Parâmetros	Resultados
CTC – Capacidade de Troca Catiônica	5,88 meq/100g
SE – Superfície Específica	45,92 m ² /g

Através do Ensaio de Azul de Metileno o *Laboratories des Ponts et Chaussées* (LCPC, 1979) caracterizou alguns tipos de solos, obtendo valores para a superfície específica de alguns argilominerais, cujos valores encontrados estão reunidos na Tabela 17.

Tabela 17: Superfície específica de alguns argilominerais, LCPC (1979).

Tipo de Argila	Superfície Específica (m ² /g)
Montmorilonita	800
Vermiculite	200
Ilita	40 – 60
Caulinita	5 – 20

O valor de superfície específica determinado sugere a presença do argilomineral ilita na composição do solo. Verificou-se ainda um valor bem baixo para a Capacidade de Troca Catiônica. Segundo Stevenson (1985), citado por de Paula (1999), esse valor de CTC é pouco superior ao valor típico de solos caulínicos conforme ilustra a Tabela 18.

Tabela 18: CTC para alguns argilominerais, adaptado de Stevenson (1985)

Tipo de Argila	CTC (meq/100g)
Montmorilonita	80 – 150
Ilita	30 – 40
Caulinita	3 – 5

Outro fator que pode ter influenciado os resultados da CTC e Superfície Específica é a presença da matéria orgânica no solo. Segundo Sparks (1996), *apud* Costa (2002), a presença de matéria orgânica mesmo que inferior a 1,0 % exerce influência significativa nas reações no solo, pois seus valores típicos de CTC e

Superfície Específica são 150 a 300 meq/100g e 800 a 900 m²/g, respectivamente. A Tabela 19 apresenta os resultados do teor de matéria orgânica e pH do solo.

Tabela 19: Teor de Matéria Orgânica e pH.

Parâmetros	Resultados
Teor de Matéria Orgânica	2,73 %
pH	6,8

O baixo valor de pH pode ser relacionado com a precipitação pluviométrica da região onde se localiza a jazida que forneceu o solo também contribuiu para a lixiviação das bases, resultando em solos com pH mais baixos.

O ensaio de Fluorescência de Raios X forneceu uma análise semiquantitativa das concentrações de óxidos e elementos presentes no solo e, além disso, através do resultado do espectro obtido (Figura 69) pelo ensaio foi possível uma análise qualitativa dos compostos presentes no solo.

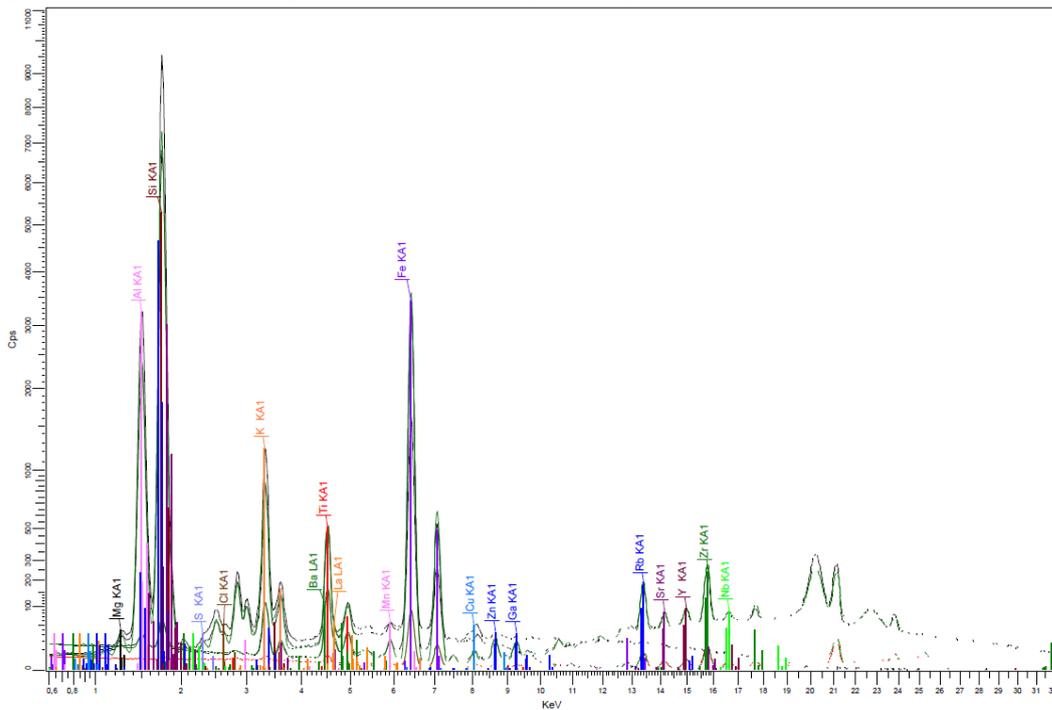


Figura 70: Análise qualitativa, espectro experimental do solo.

As porcentagens dos principais compostos químicos presente na amostra de solo são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20: Concentrações dos principais óxidos e elementos do solo.

Óxidos		Elementos	
Fórmula	Concentração (%)	Fórmula	Concentração (%)
SiO ₂	57,6	O	48,4
Al ₂ O ₃	30,5	Si	26,9
Fe ₂ O ₃	5,41	Al	16,1
K ₂ O	3,25	Fe	3,79
TiO ₂	1,44	K	2,7
MgO	1,34	Ti	0,86
ZrO ₂	0,065	Mg	0,807
SO ₃	0,0614	Zr	0,0481
BaO	0,0528	Ba	0,0472

A predominância de SiO₂, correspondente a 57,6 % do total da amostra, deve-se ao fato de que esta é a formulação química do mineral quartzo, que é o mineral mais abundante na amostra. O quartzo é um mineral quimicamente inerte, o que para a aplicação desejada não é interessante, pois não é ativo, ou seja, para fins de retenção de contaminantes não apresenta interesse. Mas, por outro lado, o quartzo pode conferir uma elevada resistência.

A amostra também apresentou elevada concentração de óxido de alumínio (Al₂O₃), correspondendo a 30,5 %, e em menores quantidades os óxidos de ferro (Fe₂O₃), com 5,41 %, óxido de potássio (K₂O) e óxido de titânio (TiO₂) que pode ser um dos responsáveis por conferir ao solo pontos de coloração alaranjada.

Alguns óxidos são importantes para a adsorção de metais presentes no lixiviado. Com relação aos óxidos de alumínio e de ferro, por exemplo, no entanto não se pode concluir que o solo apresente ou não potencial de retenção de contaminantes, sendo necessário a realização de ensaios adicionais não abrangidos neste estudo (ensaios de difusão, coluna e adsorção).

Foram selecionadas algumas amostras para realização de ensaios de microscopia eletrônica a fim de observar a morfologia dos constituintes do solo. Mas neste ensaio também é possível, através de um analisador de energia dispersiva (EDS), identificar os constituintes químicos do material. O aparelho não detecta o oxigênio, mas é de grande serventia na identificação preliminar dos constituintes do solo. Na Tabela 21 se apresenta os resultados das análises realizadas por meio desta técnica. Observa-se que os valores são bastante próximos, o que era esperado, visto que o material utilizado é o mesmo.

Tabela 21: Elementos presentes em alguns corpos de prova.

Elementos	Porcentagem (%)		
	P 01 - EN	P 05 - EI	P 05 - EM
Alumínio	25.1	26.4	23.0
Silício	41.9	52.0	40.2
Potássio	4.4	10.9	6.3
Titânio	2.0	1.3	2.2
Ferro	26.6	9.3	28.2

4.3.

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Os difratogramas do solo indicam que ele é composto principalmente pelos minerais silicatados ilita/mica e caulinita. Estes minerais fazem parte de todas as frações do solo, visto que são encontrados em todas as lâminas (observe a Figura 73). Este resultado é compatível com aqueles obtidos com o ensaio de Azul de Metileno, que indicava a presença destes minerais.

Comparando as intensidades dos picos, observa-se, de forma geral, maior intensidade nos correspondentes ao mineral quartzo, seguido dos da caulinita, e com menor intensidade os da ilita/mica. Sendo que os picos da caulinita e da ilita/mica aumentaram nas lâminas cujo material é passante na peneira #200 e #400, respectivamente, em relação ao da amostra total (passante na peneira #40).

A intensidade pode dar uma ideia da proporção entre os minerais presentes, ou seja, se um mineral apresenta pico mais intenso que o outro, provavelmente este existe em maior quantidade no solo. Com isso infere-se que nestas frações estão mais presentes.

Já a agudez e a simetria indicam o grau de cristalinidade do mineral. A princípio, foi considerado que o pico I/M correspondia apenas ao argilomineral ilita, no entanto, devido à detecção da simetria destes picos em todos os difratogramas, supõe-se que este indique a presença de uma ilita bem cristalizada e de uma mica.

Nas Figuras 70 a 72, apresentam-se os difratogramas obtidos para cada uma das lâminas analisadas separadamente.

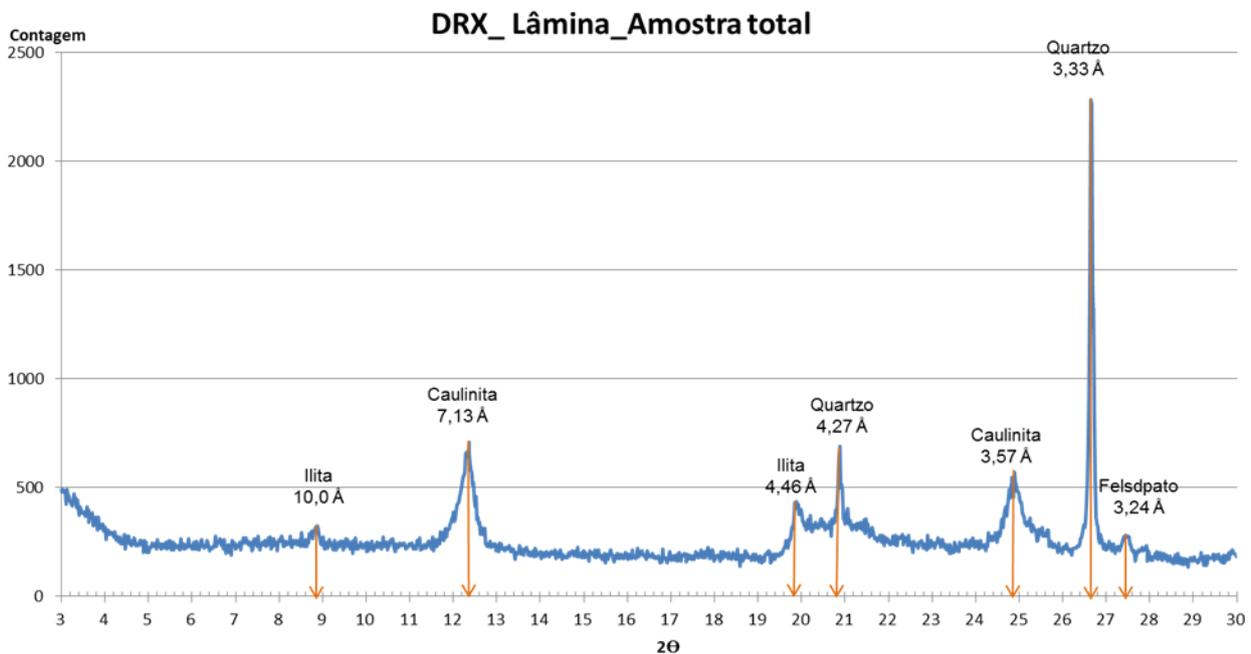


Figura 71: Difratograma da amostra de solo natural.

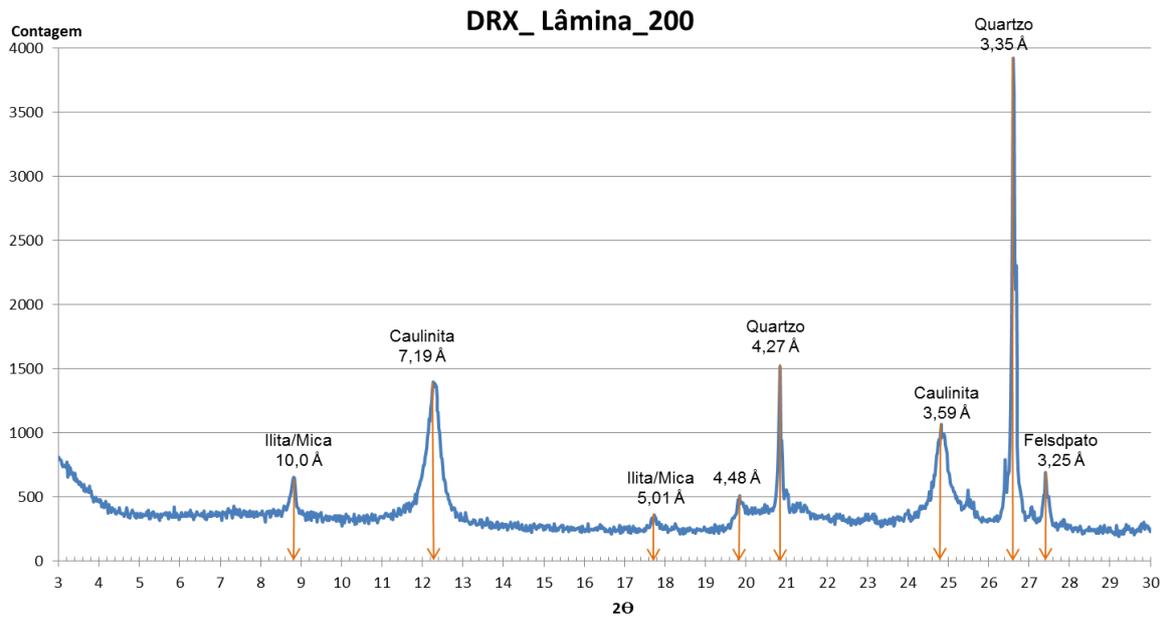


Figura 72: Difratoograma da amostra de solo passante na peneira #200.

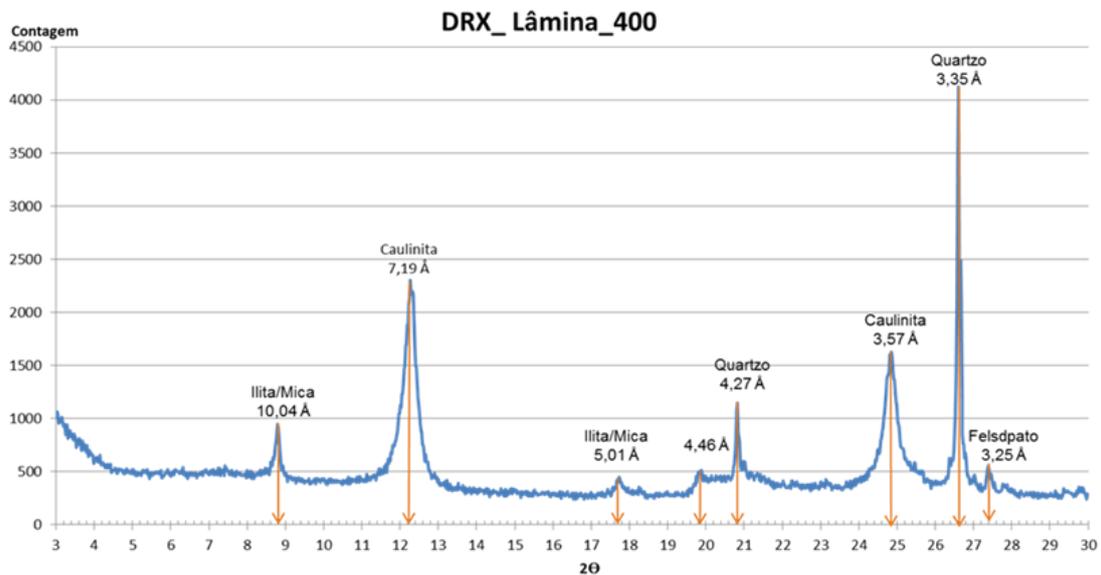
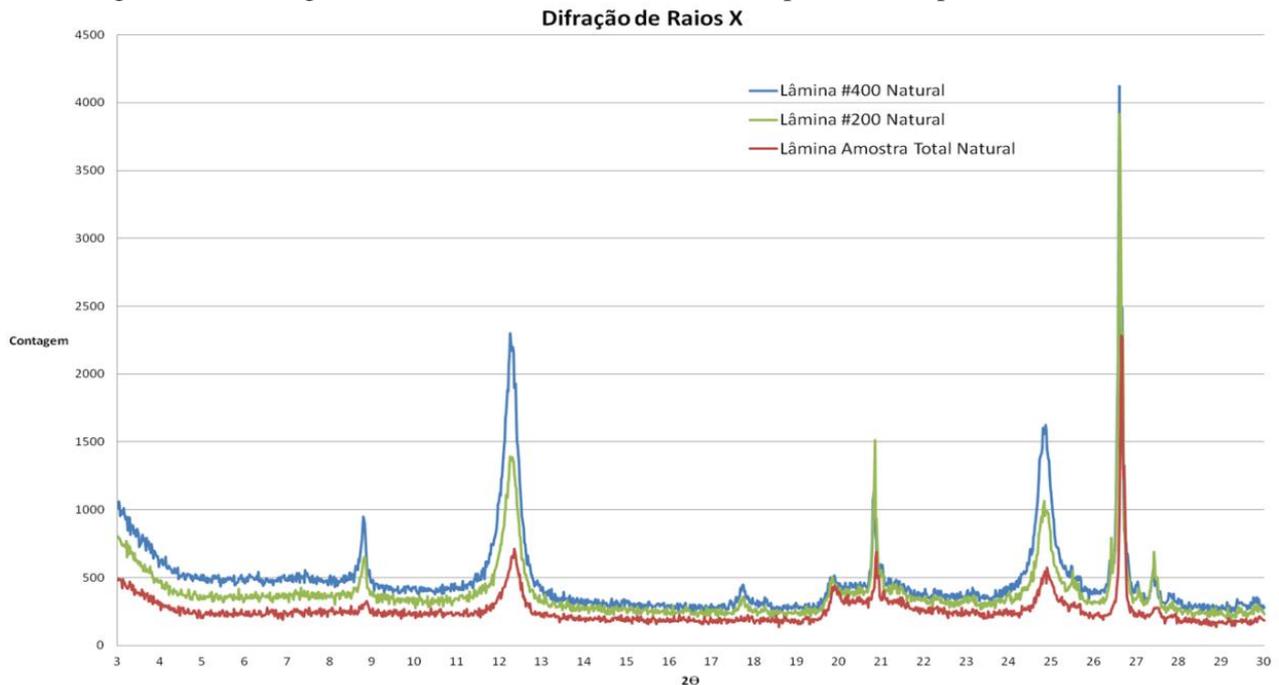


Figura 73: Difratoograma da amostra de solo passante na peneira #400.

Figura 74: Difratomogramas reunidos, amostra total, material passante nas peneiras #200 e



#400.

4.4.

ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

4.4.1.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO COM REUSO

A realização de ensaios de compactação com reuso do material foi uma forma de economizar material, devido aos altos custos de transporte deste. Esses primeiros ensaios tiveram como objetivo principal a definição dos valores de umidade ótima para cada energia de compactação, que serviria de base para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios posteriores.

A Figura 74 apresenta as curvas de compactação do solo realizadas com reuso de material.

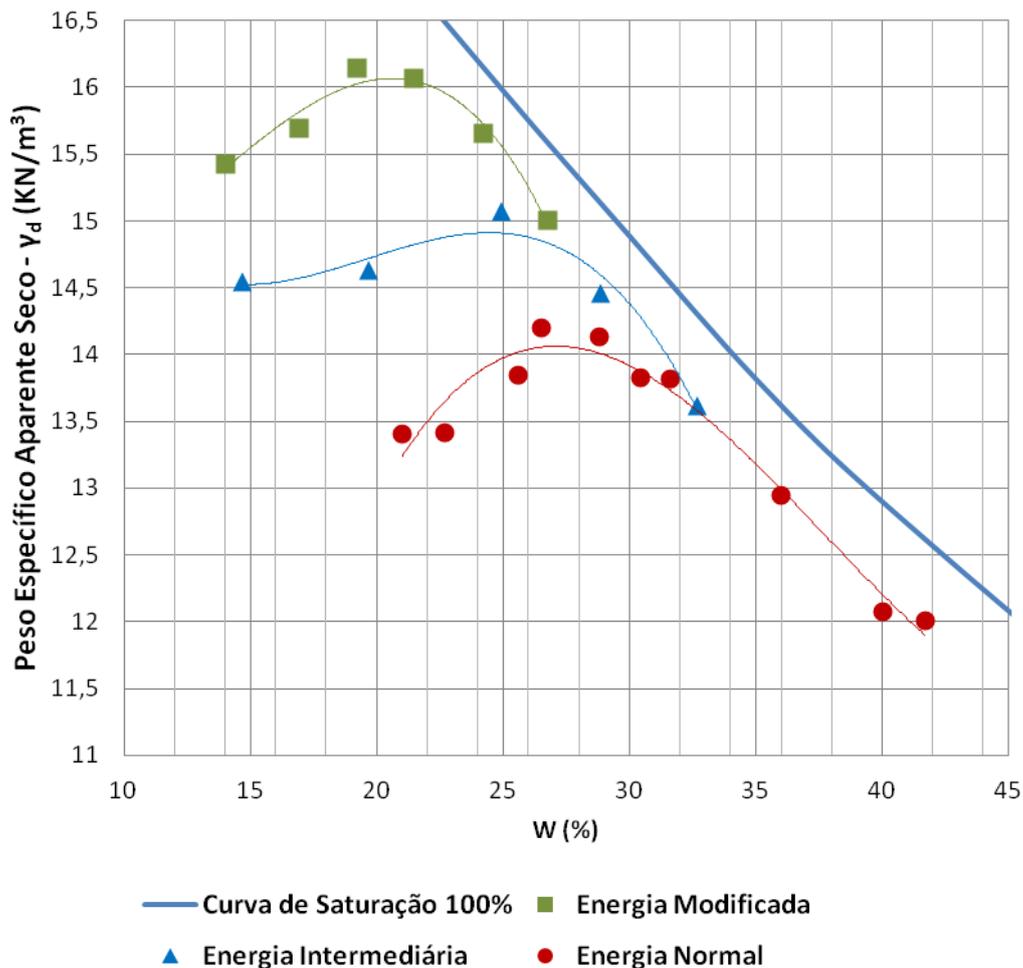


Figura 75: Curvas de compactação com diferentes energias, com reuso de material.

Os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo obtidos com reuso de material estão reunidos na Tabela 22.

Tabela 22: Valores de Umidade Ótima e $\gamma_{d \text{ máx}}$, para os ensaios com reuso.

	Energia de Compactação		
	Normal	Intermediária	Modificada
Umidade Ótima (%)	27,0	25,0	20,0
$\gamma_{d \text{ máx}}$ (KN/m ³)	14,1	14,9	16,1

4.4.2.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO SEM REUSO

Com os valores de Umidade Ótima, definidos para cada energia (Tabela 20), procedeu-se a compactação dos corpos de prova que seriam utilizados nos ensaios de condutividade hidráulica e compressão simples.

Foram compactados de 6 (seis) a 7 (sete) corpos de provas sem reuso para cada energia de compactação. Seguiu-se a seguinte regra: dois ou três corpos de prova com valor de umidade abaixo do valor de umidade ótima, dois ou três

corpos de prova com umidade acima do valor da umidade ótima, e um corpo de prova na umidade ótima.

A Figura 75 apresenta as curvas de compactação do solo realizadas sem reuso de material.

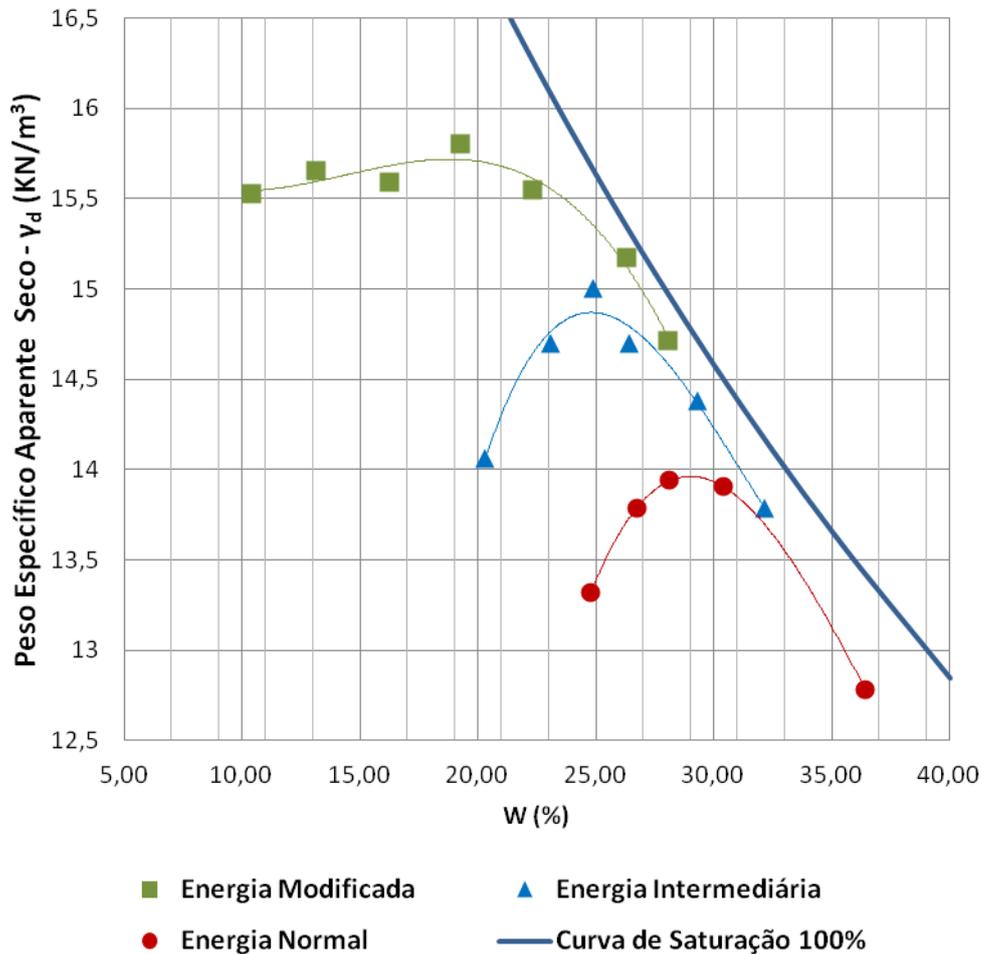


Figura 76: Curvas de compactação com diferentes energias, sem reuso de material.

Os valores de umidade ótima e peso específico seco máximo obtidos para os ensaios de compactação sem reuso de material estão reunidos na Tabela 23.

Tabela 23: Valores de Umidade Ótima e $\gamma_{d \text{ máx}}$, para os ensaios sem reuso.

	Energia de Compactação		
	Normal	Intermediária	Modificada
Umidade Ótima (%)	28,0	25,0	19,5
$\gamma_{d \text{ máx}}$ (KN/m^3)	13,9	14,8	15,8

Como resultado adicional deste trabalho, aproveitando-se dos resultados dos ensaios de compactação com e sem reuso, foram reunidos os dados na Tabela 24, onde se verificou que a variação do valor de Umidade Ótima foi maior para as energias do Proctor Normal (1,0 %) e do Proctor Modificada (0,5 %) e não significativo para a energia do Proctor Intermediária. O mesmo comportamento

foi observado com relação ao valor do peso específico aparente seco máximo com pequena variação.

Tabela 24: Resumo dos valores de Umidade Ótima e $\gamma_{d \text{ máx}}$, para os ensaios com e sem reuso.

	Energia de Compactação					
	Normal		Intermediária		Modificada	
	Com reuso	Sem reuso	Com reuso	Sem reuso	Com reuso	Sem reuso
Umidade Ótima (%)	27	28	25	25	20	19,5
$\gamma_{d \text{ máx}}$ (KN/m ³)	14,1	13,9	14,9	14,8	16,1	15,8

Para avaliar o efeito do procedimento de compactação utilizado (com e sem reuso de material) reuniram-se todas as curvas de compactação em um único gráfico, mostrado na Figura 82, onde se pode verificar que houve pouca variação dos valores da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo.

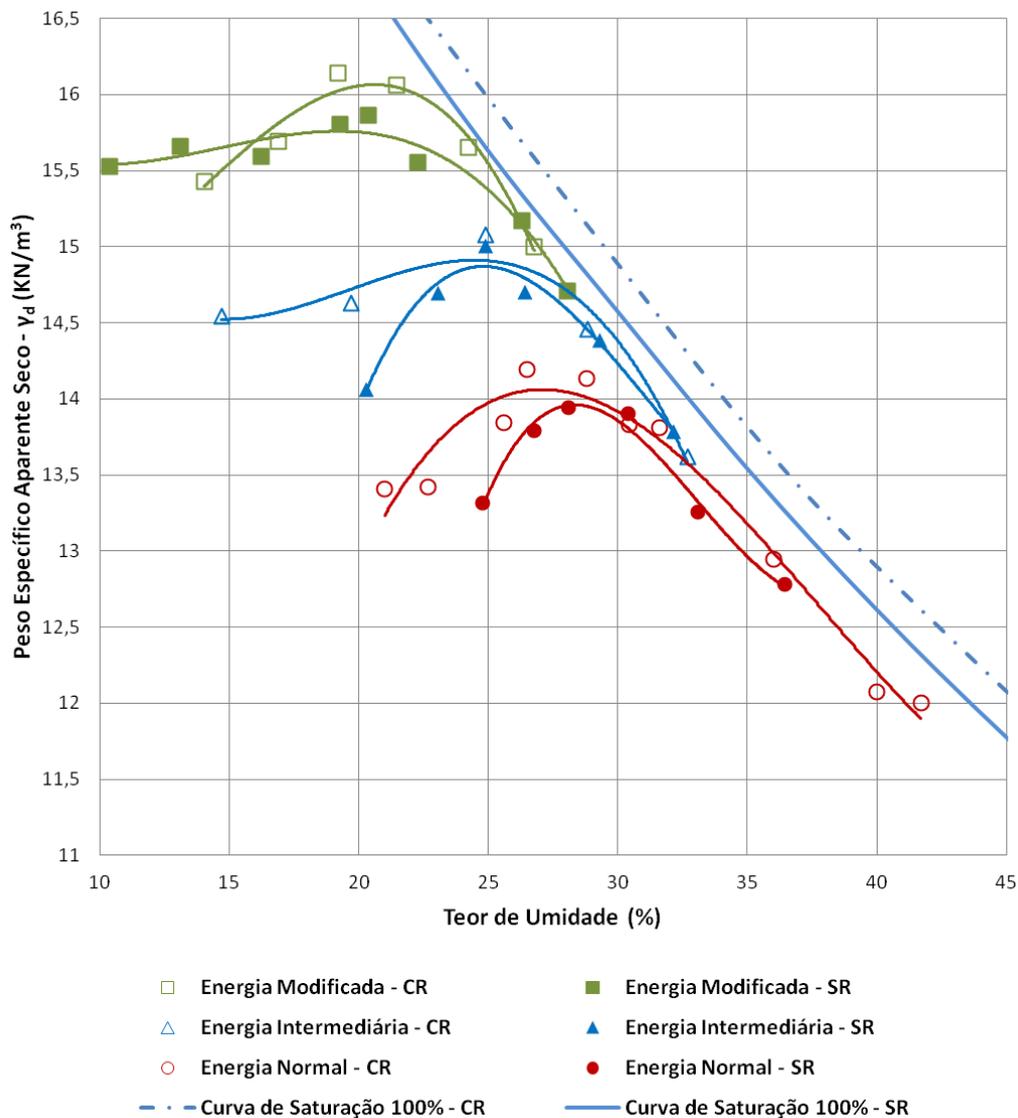


Figura 77: Curvas de compactação com e sem reuso.

4.5.

ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Foram realizados ensaios de condutividade hidráulica em 15 amostras de solo apresentando diferentes teores de umidade, nas energias do Proctor Normal, Intermediária e Modificada. Todos os ensaios foram realizados em permeâmetro de parede flexível e em triplicata, sendo apresentado neste item apenas o valor médio da condutividade hidráulica.

Para cada corpo de prova ensaiado foram determinados os seguintes parâmetros: teor de umidade de moldagem (W_{mold}), peso específico aparente seco (γ_{do}), grau de compactação (GC), índice de vazios (e), tensão efetiva (σ'), gradiente hidráulico (i), parâmetro B e o valor médio da condutividade hidráulica.

A Tabela 25 mostra as condições iniciais, os parâmetros dos ensaios e os resultados médios da condutividade hidráulica para os corpos de prova moldados na Energia do Proctor Normal.

Tabela 25: Condições iniciais, parâmetros de ensaio e condutividade hidráulica das amostras compactadas na Energia do Proctor Normal.

Amostra	W_{mold} (%)	γ_{d} (KN/m ³)	GC (%)	e	σ'	i	B	$k_{\text{médio}}$ (m/s)
P 01	23,49	13,32	95,47	0,72	6,20	20,68	0,98	$2,38 \times 10^{-8}$
P 02	26,77	13,79	98,85	0,82	6,50	20,51	0,97	$2,98 \times 10^{-8}$
P 03	30,41	13,91	99,68	0,80	6,20	20,41	0,99	$2,74 \times 10^{-8}$
P 04	33,38	13,94	95,03	0,86	6,50	20,15	0,98	$1,50 \times 10^{-8}$
P 05	36,47	12,78	91,64	0,88	6,15	20,26	0,99	$1,54 \times 10^{-9}$

Pode-se observar na Figura 85 que nenhum dos corpos de prova avaliados apresentou valor de condutividade hidráulica abaixo da linha de condutividade hidráulica mínima ($k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s), contudo, no ponto mais úmido (36,47 %) obteve-se o valor mais baixo com $1,54 \times 10^{-9}$ m/s, bem próximo ao limite preestabelecido para barreiras minerais.

Ainda na Figura 77 constata-se que dois pontos que possuem valores aproximados de peso específico (P01 e P 04) apresentam valores de condutividade hidráulica diferentes, sendo menor para o ponto mais úmido, o que mostra a influência da umidade de compactação na condutividade hidráulica.

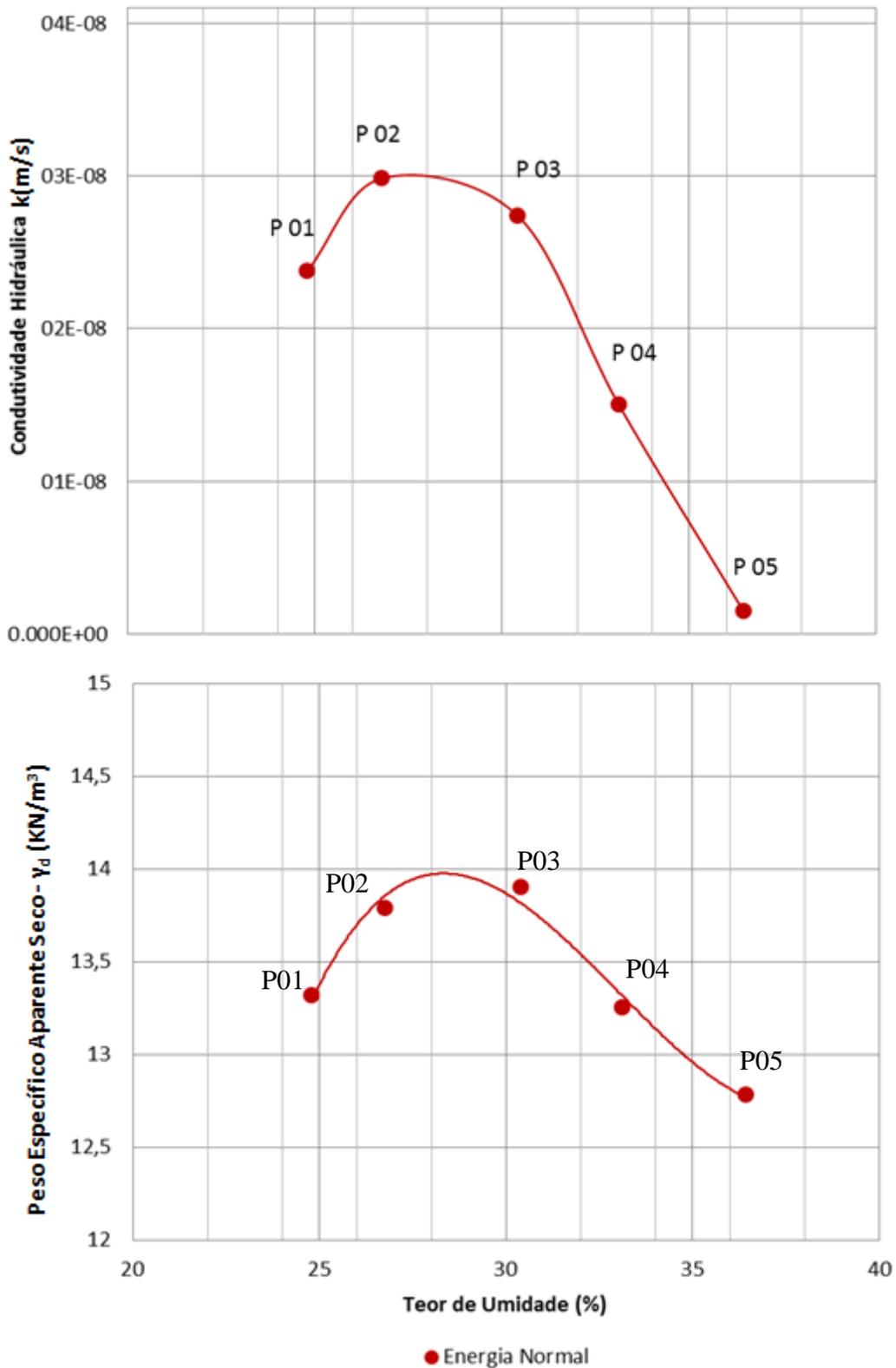


Figura 78: Variação da condutividade hidráulica do solo compactado na Energia do Proctor Normal.

As Figuras 78 e 79 apresentam o resultado das análises de MEV para os pontos P01 e P05 da curva de compactação, com aumento de 100 (cem) vezes o que nos permite observar a macroestrutura do solo.

No ponto P01, moldado no ramo seco da curva de compactação, veem-se os grumos do solo; já no ponto P05, moldado no ramo úmido não se observa a formação de grumos, reduzindo os macro poros do solo.

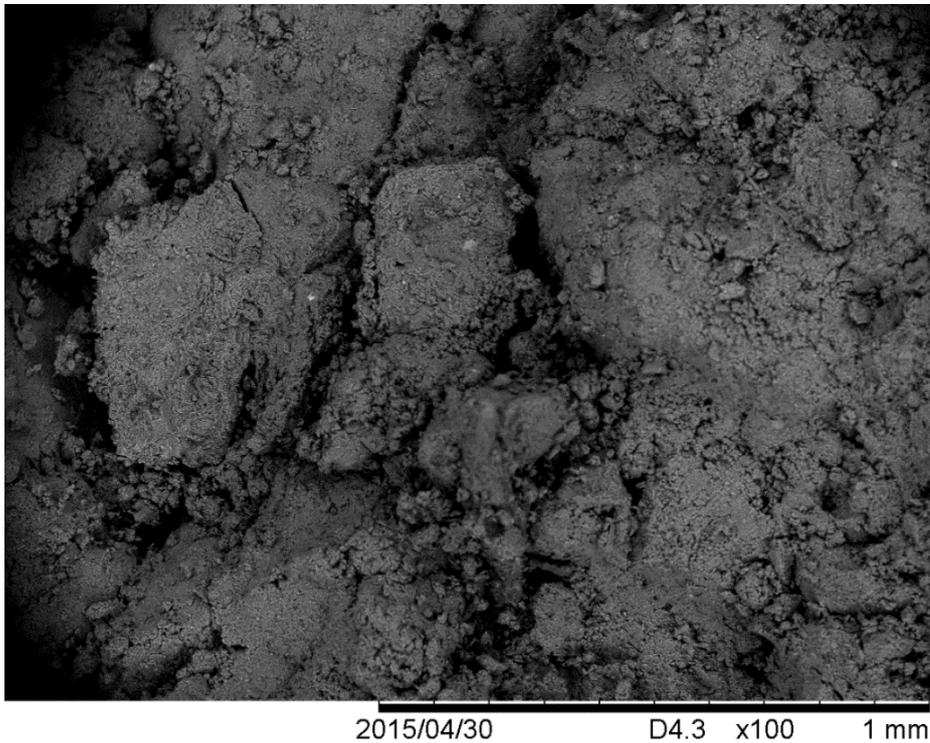


Figura 79: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto P01.

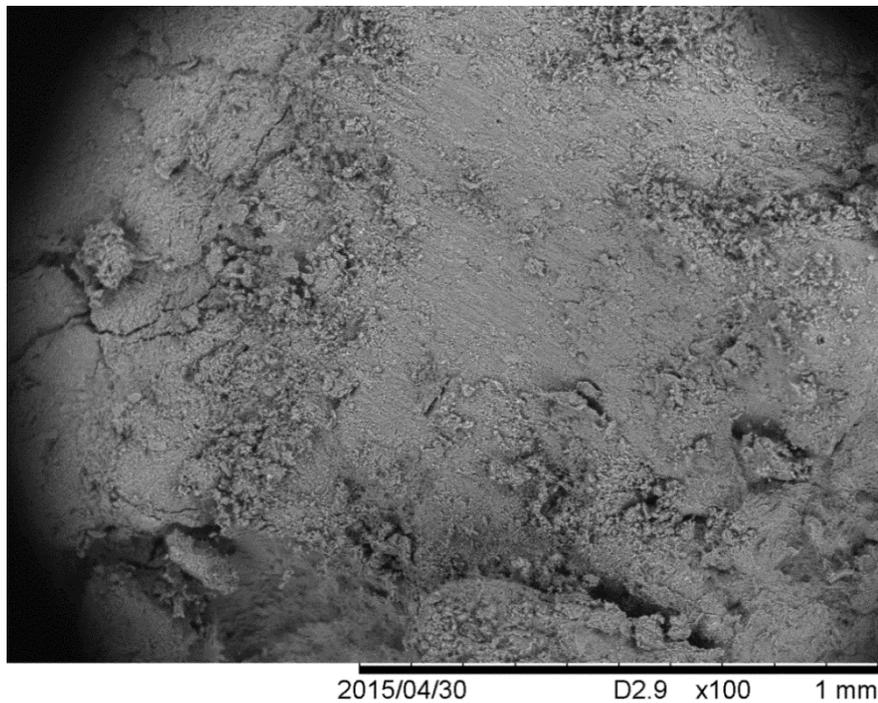


Figura 80: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto P05.

As Figuras 80 e 81, por sua vez, apresentam o resultado da análise de MEV realizado nas mesmas amostras, P01 e P05, mas com um aumento de 4000 (quatro mil) vezes, possibilitando avaliar a microestrutura do solo. Observa-se que com o acréscimo do teor de umidade na compactação ocorreu a redução dos espaços vazios do solo.

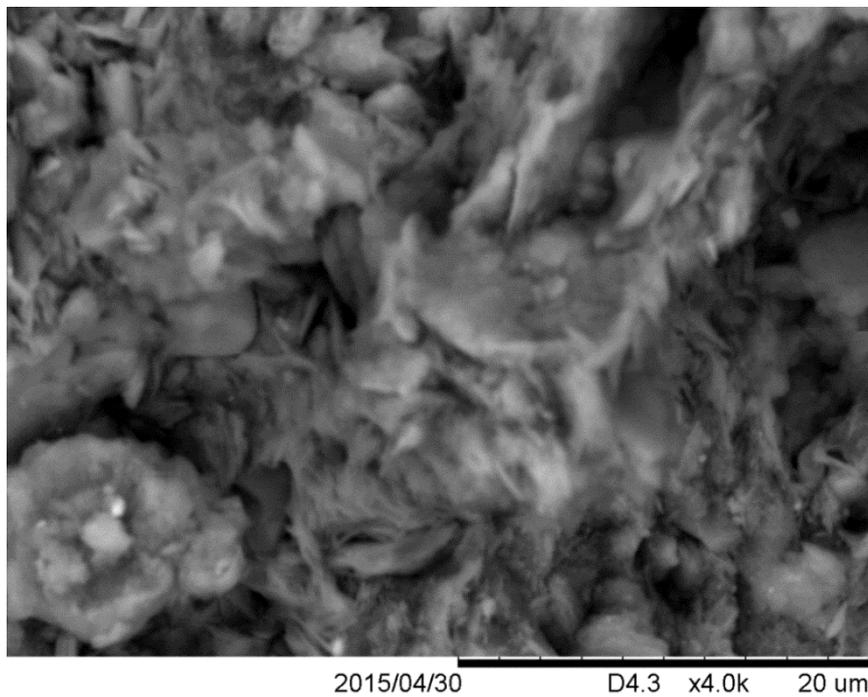


Figura 81: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto P01.

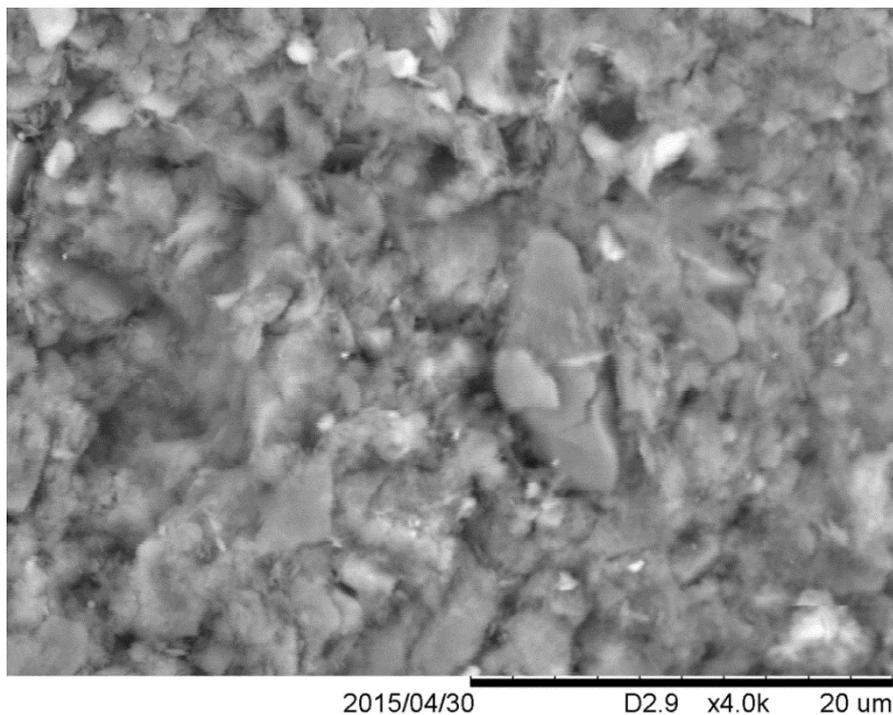


Figura 82: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto P05.

As análises realizadas com o auxílio dos resultados das análises de MEV podem servir de base para explicar a redução em 15 (quinze) vezes o valor da condutividade hidráulica entre os dois pontos extremos da curva de compactação.

A Tabela 26 mostra as condições iniciais, os parâmetros dos ensaios e os resultados médios da condutividade hidráulica para os corpos de prova moldados na Energia do Proctor Intermediária.

Tabela 26: Condições iniciais, parâmetros de ensaio e condutividade hidráulica das amostras compactadas na Energia do Proctor Intermediária.

Amostra	W _{mold} (%)	γ _d (KN/m ³)	GC (%)	e	σ'	i	B	K _{sat} médio (m/s)
P 01	20,30	14,06	95,34	0,68	6,10	20,08	0,98	1,91 x10 ⁻⁸
P 02	23,06	14,70	99,64	0,68	7,00	20,84	0,98	5,18 x10 ⁻⁹
P 03	26,41	14,70	99,67	0,65	12,34	40,25	0,98	7,07 x10 ⁻¹⁰
P 04	29,32	14,38	97,51	0,70	12,35	40,53	0,98	3,86 x10 ⁻⁹
P 05	32,17	13,78	93,46	0,77	12,32	40,72	0,96	1,59 x10 ⁻⁹

A Figura 82 mostra a variação da condutividade hidráulica obtida para os ensaios onde os corpos de prova foram moldados com a energia do Proctor intermediária.

Pode-se observar que um ponto ficou abaixo do limite mínimo de condutividade hidráulica ($k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s), este ponto apresenta teor de umidade pouco acima do teor de umidade ótimo (1,41 %). Os dois pontos mais úmidos apresentaram valores de condutividade hidráulica bem próximos do valor mínimo.

Analisando-se os valores de condutividade hidráulica para estes ensaios verifica-se uma grande variação deste parâmetro, a diferença obtida entre os valores máximos (P01) e mínimos (P03) foi de 27 (vinte e sete) vezes e a diferença entre o ponto mais seco (P01) e o ponto mais úmido (P05) foi de 12 (doze) vezes.

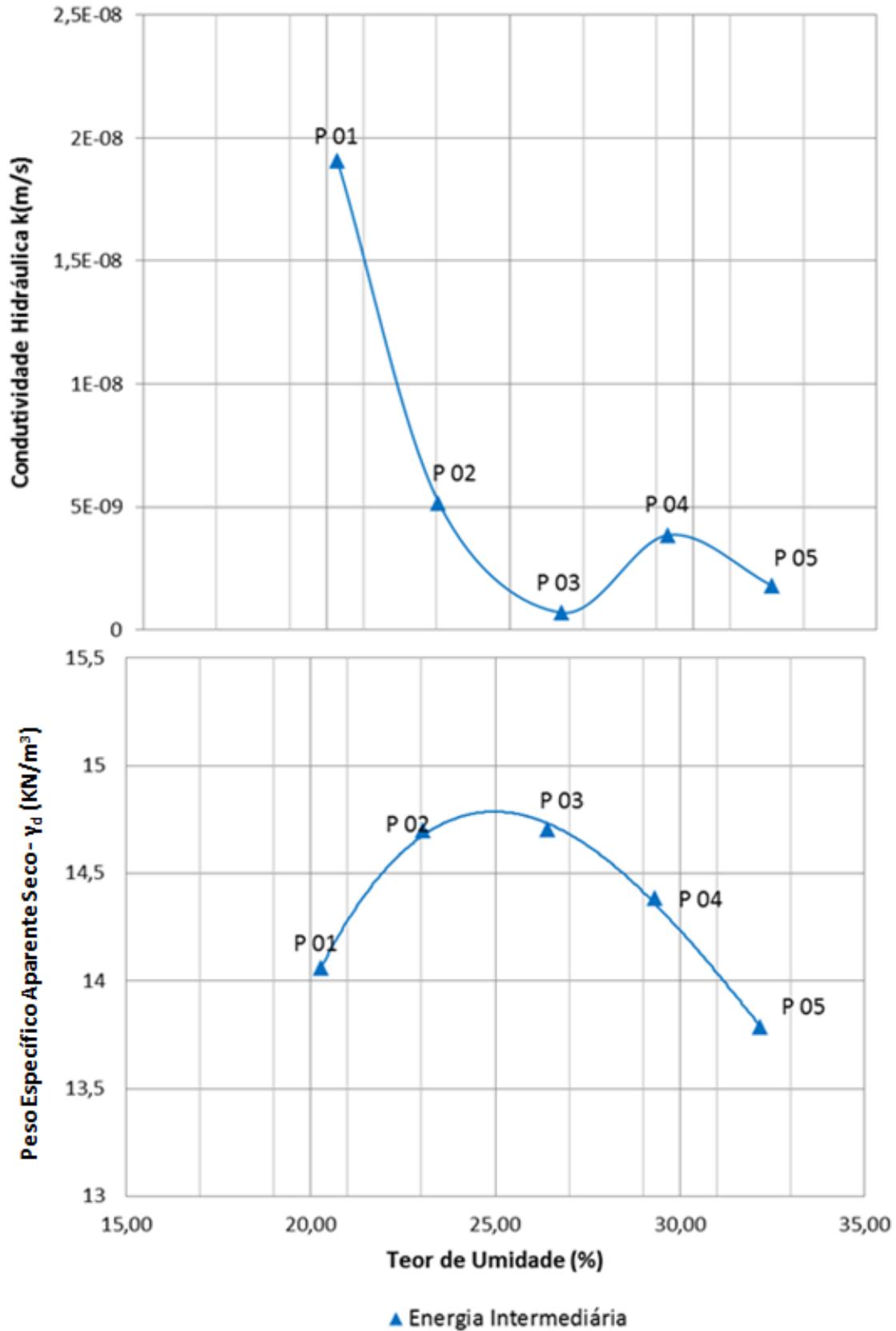


Figura 83: Condutividade hidráulica do solo compactado na Energia do Proctor Intermediária.

A Tabela 27 apresenta um resumo das condições iniciais, dos parâmetros de ensaio e os resultados médios da condutividade hidráulica para os corpos de prova moldados na Energia do Proctor Modificada.

Tabela 27: Condições iniciais, parâmetros de ensaio e condutividade hidráulica das amostras compactadas na Energia do Proctor Modificada.

Amostra	W_{mold} (%)	γ_d (KN/m ³)	GC (%)	e	σ'	i	B	$k_{satmédio}$ (m/s)
P 01	16,24	15,594	98,63	0,55	13,56	50,64	0,95	$3,53 \times 10^{-9}$
P 02	19,27	15,802	99,95	0,52	14,38	41,32	0,96	$2,05 \times 10^{-9}$
P 03	22,30	15,551	98,36	0,57	12,34	41,16	0,96	$2,30 \times 10^{-9}$
P 04	26,32	15,172	95,96	-	14,07	44,73	0,97	$4,89 \times 10^{-10}$
P 05	28,06	14,711	93,05	0,66	14,77	38,16	0,96	$3,58 \times 10^{-10}$

A Figura 83 reúne os resultados destes ensaios relacionando a condutividade hidráulica com o teor de umidade dos corpos de prova moldados com energia do Proctor modificada.

Observa-se que dois ficaram abaixo do limite mínimo pré-estabelecido para barreiras minerais de fundo de aterros sanitários ($k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s), os pontos P04 (29,32 %) e P05 (32,17 %). Estes pontos foram moldados no ramo úmido, apresentado teor de umidade acima da umidade ótima, 6,82 e 8,56 %, respectivamente.

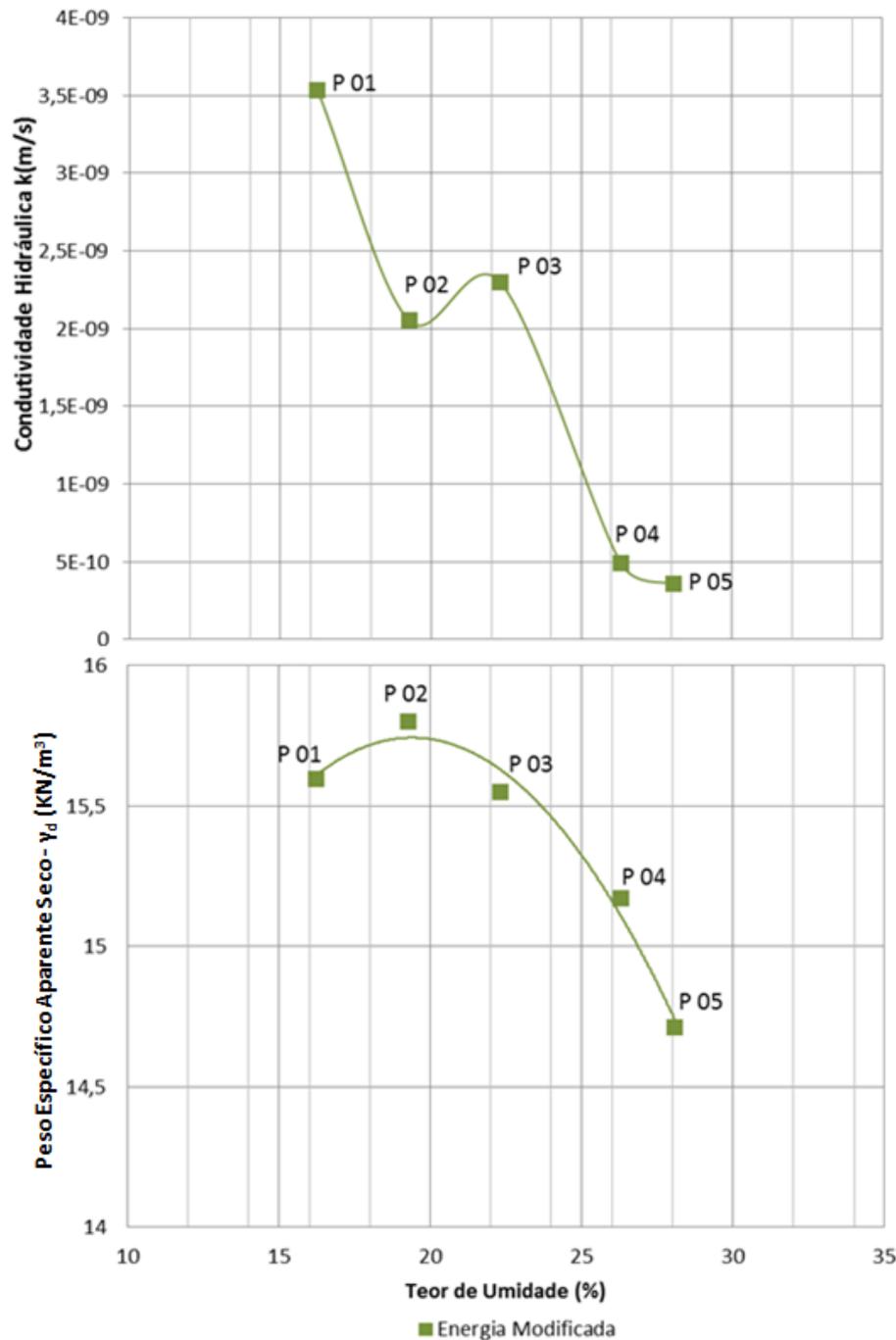


Figura 84: Conduktividade hidráulica do solo compactado na Energia do Proctor Modificada.

Para esta energia de compactação também foram realizadas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura para analisar a micro e macroestrutura do solo. Os pontos escolhidos foram os extremos em relação à umidade, ou seja, o ponto mais seco (P01) e o ponto mais úmido (P05).

As Figuras 84 e 85 apresentam os resultados das análises MEV com ampliação de 100 (cem) e as Figuras 86 e 87 mostram os resultados com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes. Pode-se verificar que não houve grande variação na macroestrutura e microestrutura do solo, embora se possa notar que para o ponto P01 há uma maior formação de pequenos grumos.

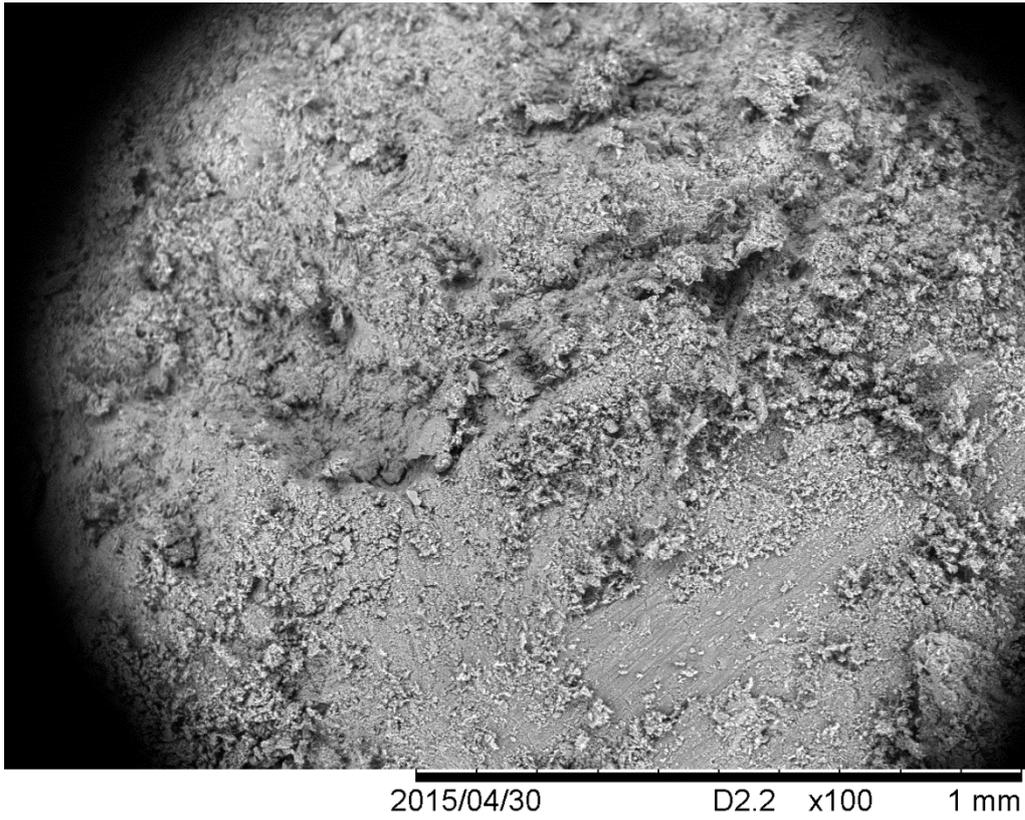


Figura 85: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto P01, Energia do Proctor Modificada.

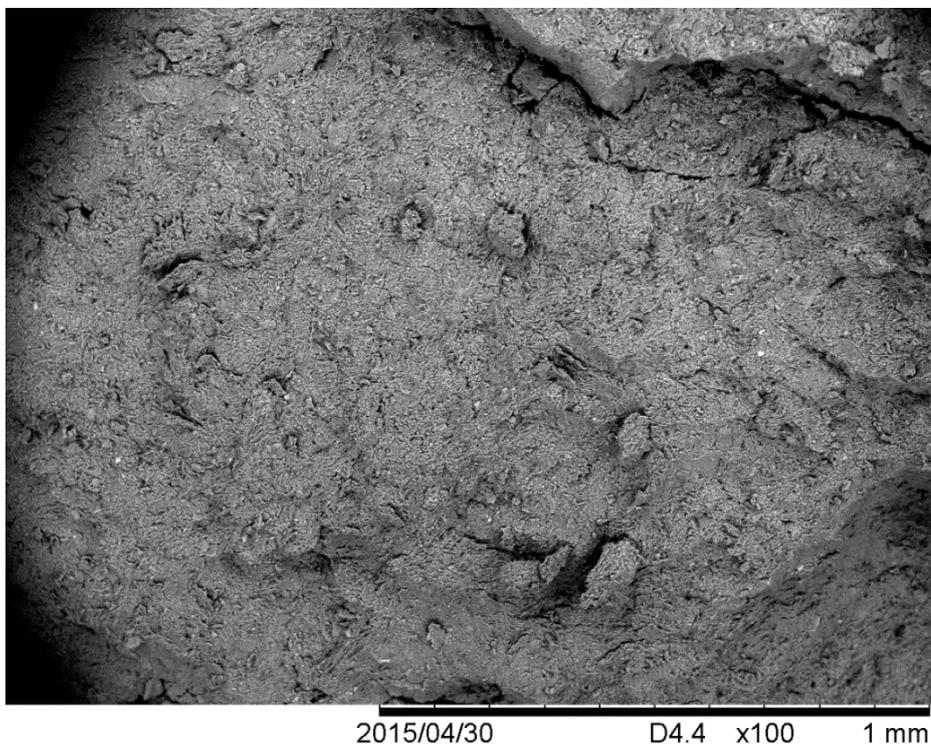


Figura 86: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto P05, Energia do Proctor Modificada.

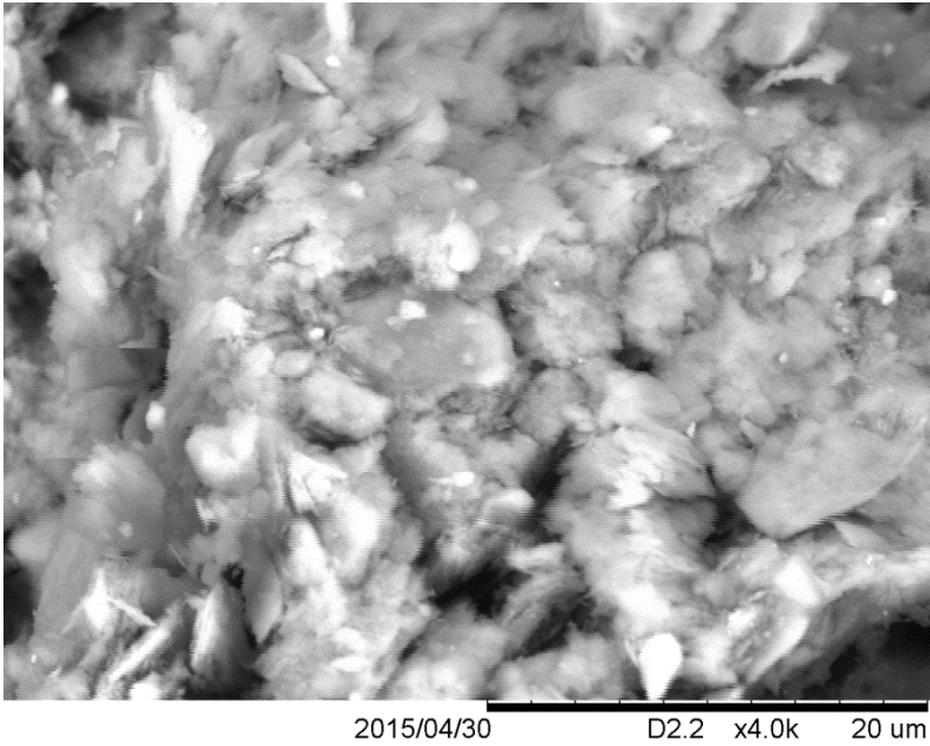


Figura 87: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto P01, Energia do Proctor Modificada.

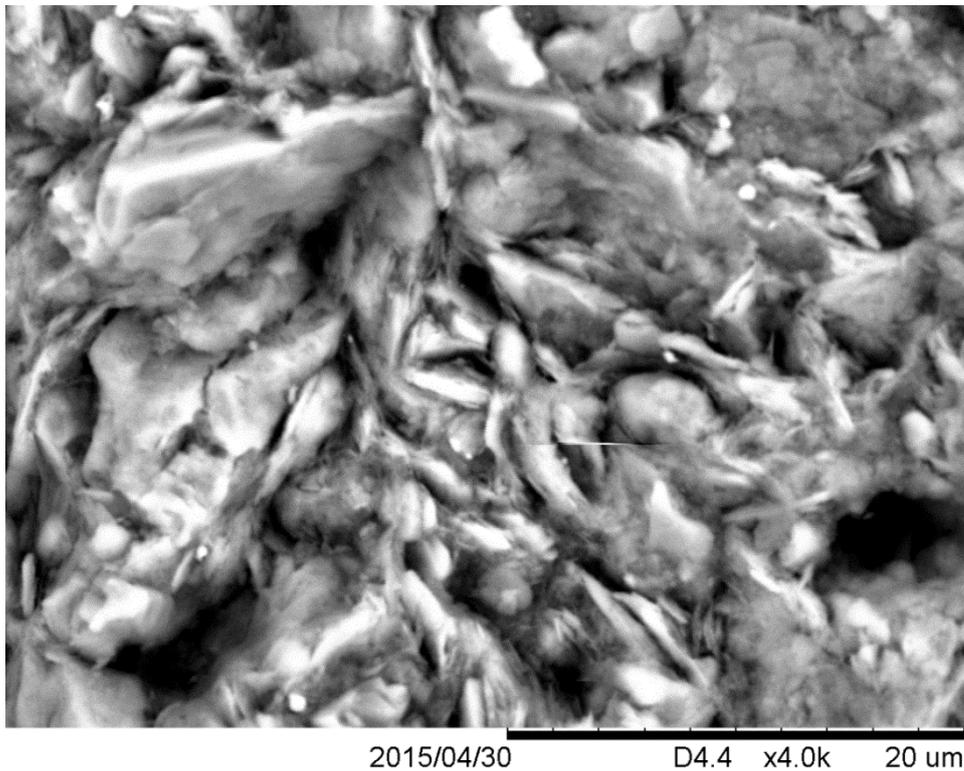


Figura 88: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto P05, Energia do Proctor Modificada.

A Figura 88 reúne os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica para as três energias de compactação em relação ao teor de umidade de moldagem dos corpos de prova. Nela pode-se verificar uma tendência de redução dos valores de condutividade hidráulica com o acréscimo do teor de umidade para todas as energias de compactação. Verificou-se ainda uma influência mais notável para a Energia do Proctor Normal e menor para a Energia do Proctor Modificada.

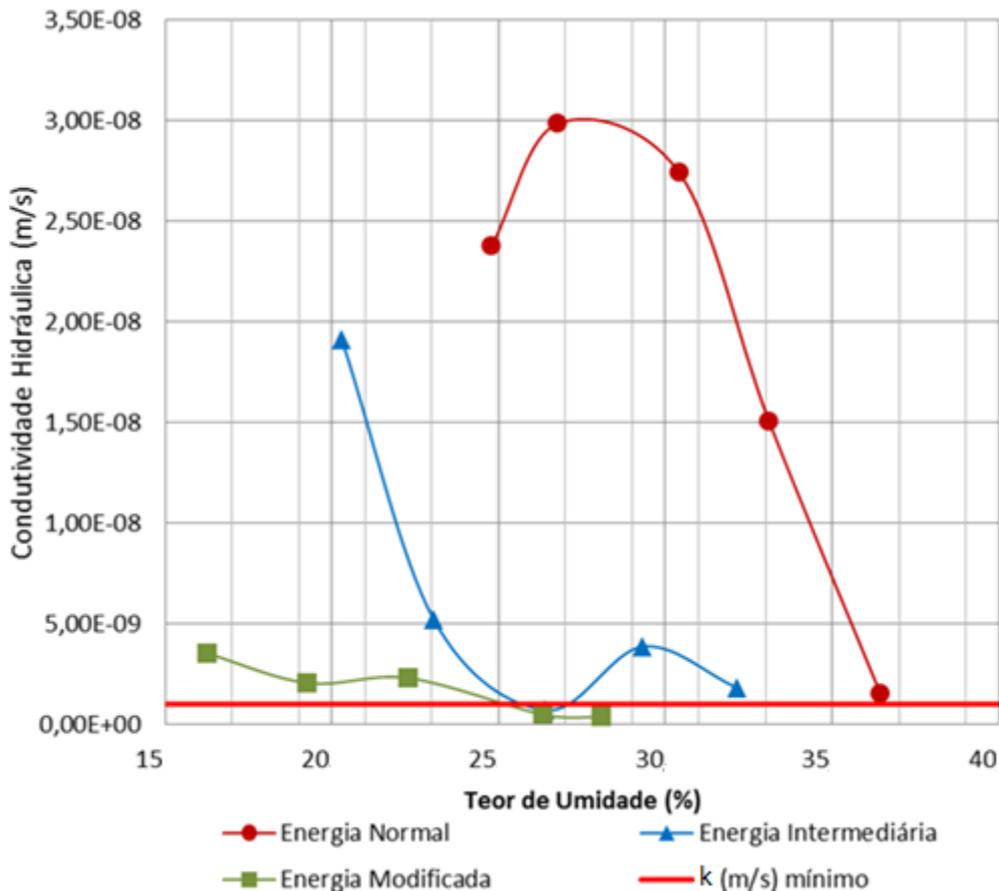


Figura 89: Condutividade hidráulica do solo nas energias do Proctor normal, intermediária e modificada em função do teor de umidade de moldagem.

A Figura 89 apresenta uma nova forma de visualizar os resultados vistos na Figura 88, contudo em relação ao valor da umidade ótima. Nela verifica-se que os corpos de prova moldados com teor de umidade acima da umidade ótima, em geral, apresentaram valores mais baixos de condutividade hidráulica que os moldados abaixo do valor de umidade ótima.

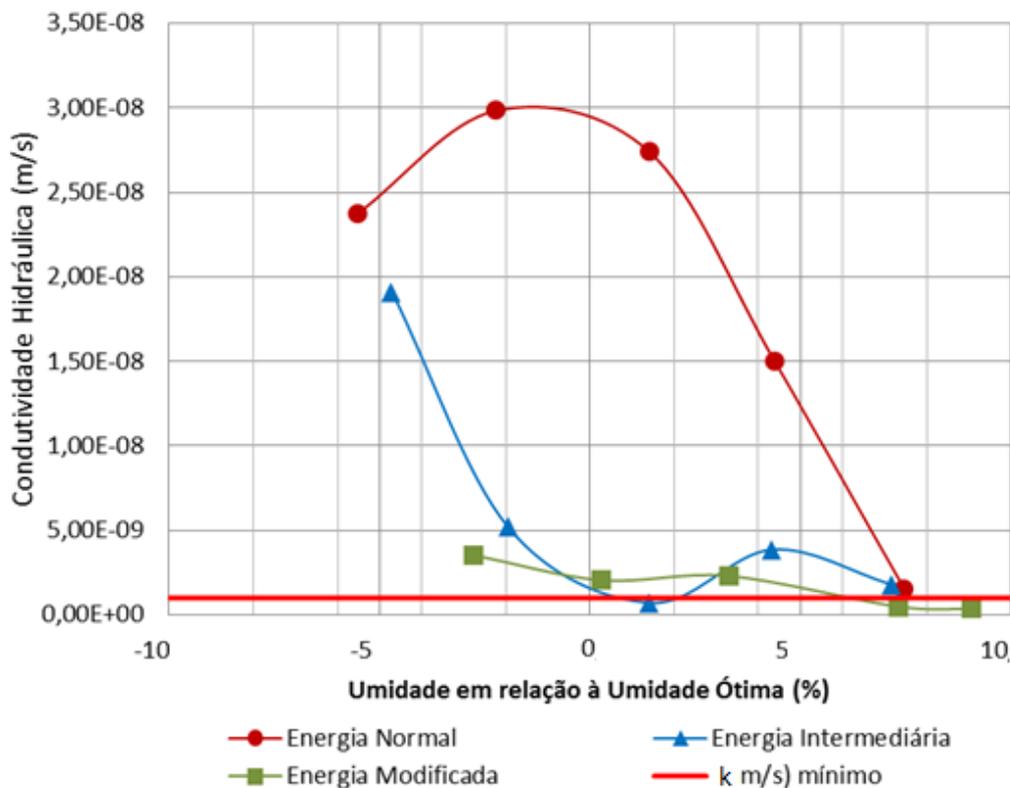


Figura 90: Condutividade hidráulica do solo nas energias do Proctor normal, intermediária e modificada em relação ao teor de umidade ótima.

Os valores de condutividade hidráulica obtidos para os corpos de prova compactados com Energia do Proctor Normal não apresentaram grande variação para os pontos moldados com valor de umidade abaixo da umidade ótima, mas para os corpos de prova moldados acima da umidade ótima a variação foi de uma ordem de grandeza.

Para a Energia do Proctor Intermediária a redução da condutividade hidráulica deu-se a partir do primeiro ponto do ramo seco até o ramo úmido. Para a Energia do Proctor Modificada, foi observado o mesmo comportamento encontrado para a Energia do Proctor Intermediária, ou seja, houve redução do valor da condutividade deste os primeiros pontos compactados, mas vale lembrar que para esta energia foram escolhidos menos pontos no ramo seco que as demais energias.

Aproveitando os resultados das análises de MEV realizados foi possível observar o efeito do aumento da energia de compactação sobre a condutividade hidráulica (vide Figura 90) tanto no ramo seco, com os pontos 'A' e 'B', como para o ramo úmido, através dos pontos 'C' e 'D'.

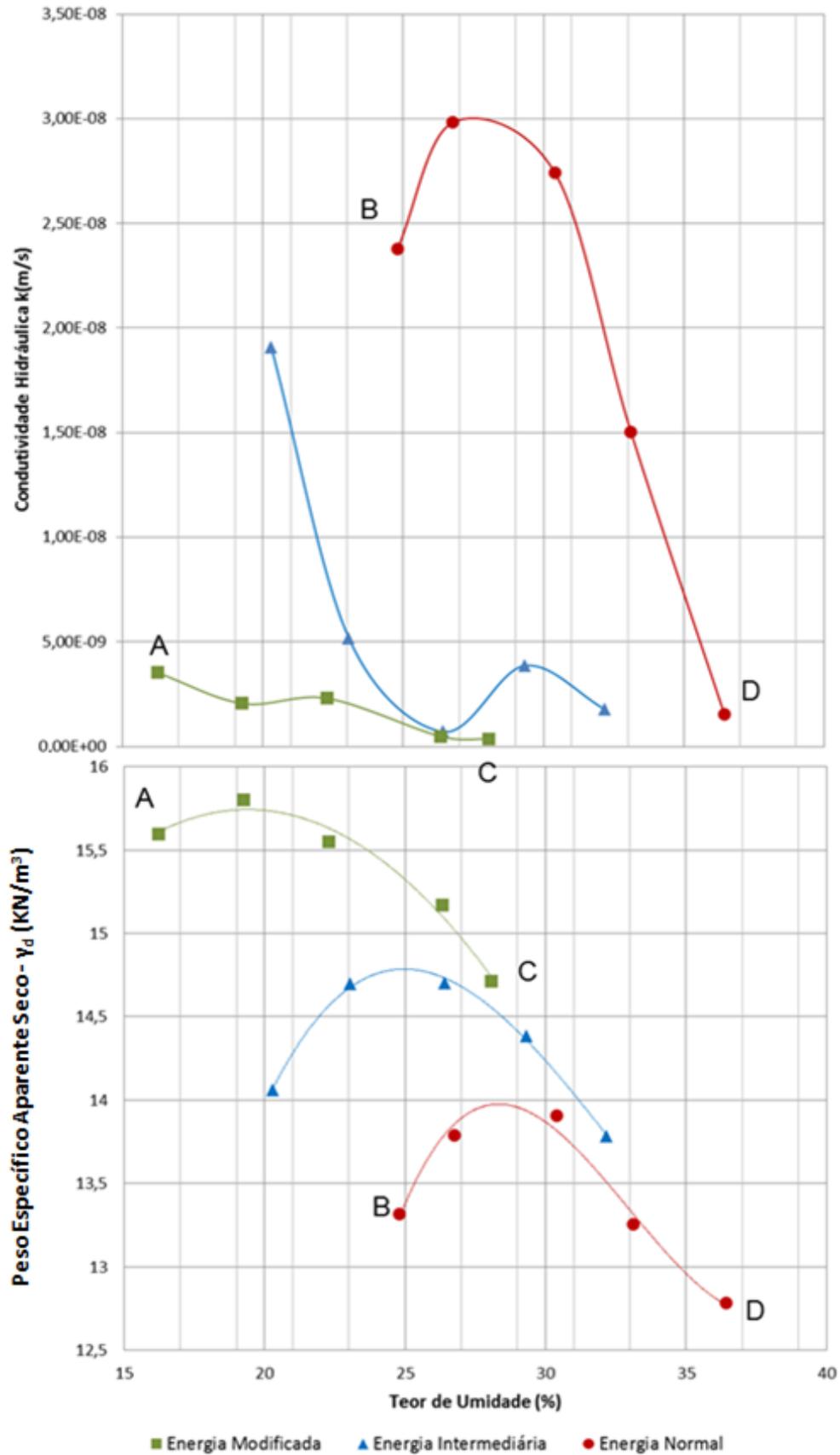


Figura 91: Variação da condutividade hidráulica devido à variação da energia de compactação.

Utilizando-se os resultados das análises de MEV dos pontos 'A' e 'B', é possível verificar que o aumento da energia de compactação no ramo seco promoveu a redução dos macro poros do solo, o que é notável nas Figuras 91 e 92 (com ampliação de 100 vezes) e também diminuição dos vazios do solo (Figura 93 e 94). A redução do valor da condutividade hidráulica entre os pontos 'A' e 'B' foi de 6,7 vezes.

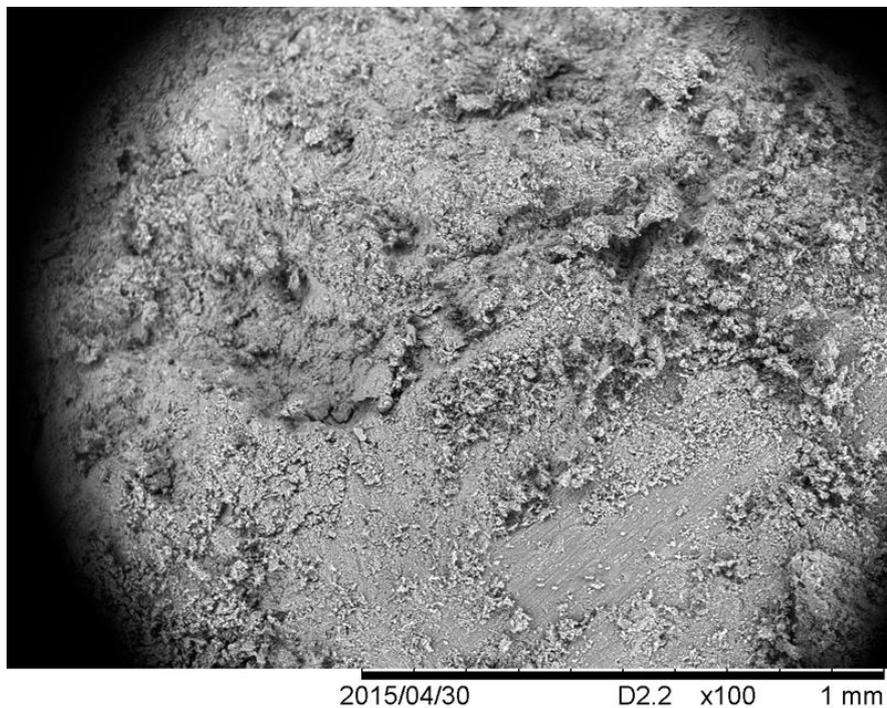


Figura 92: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto A.

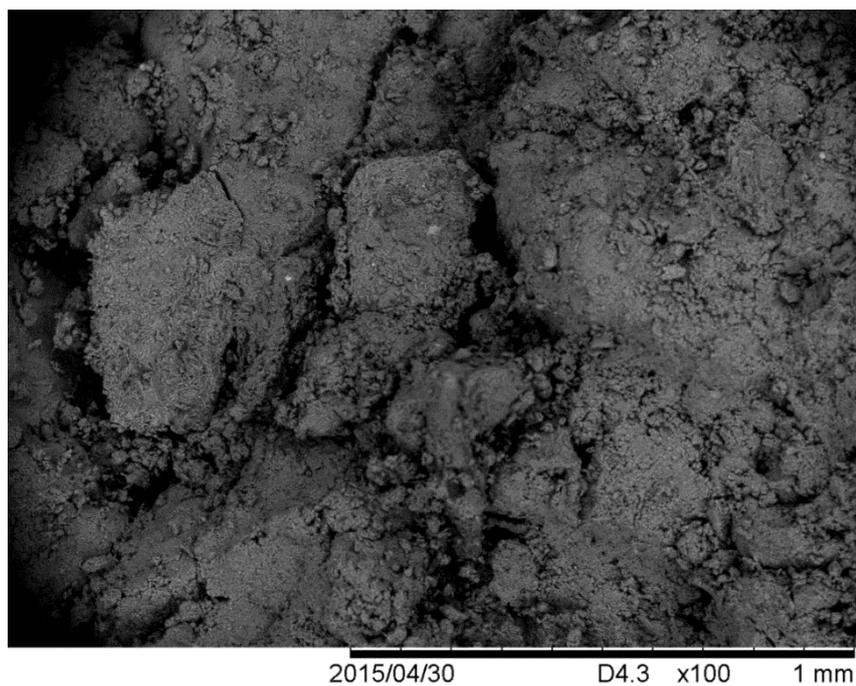


Figura 93: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto B.

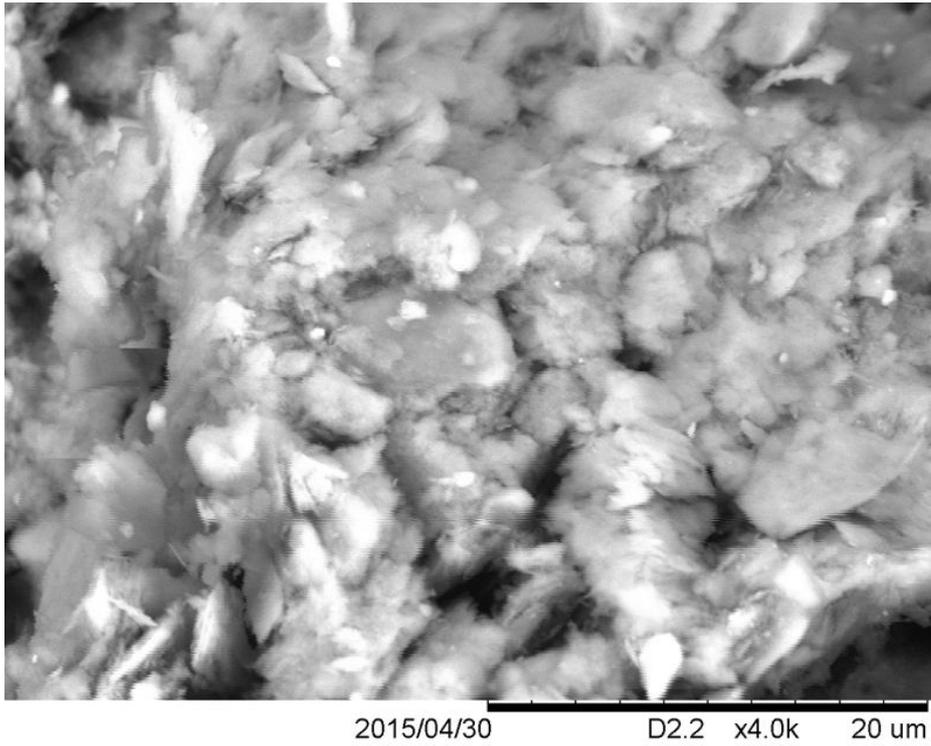


Figura 94: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto A.

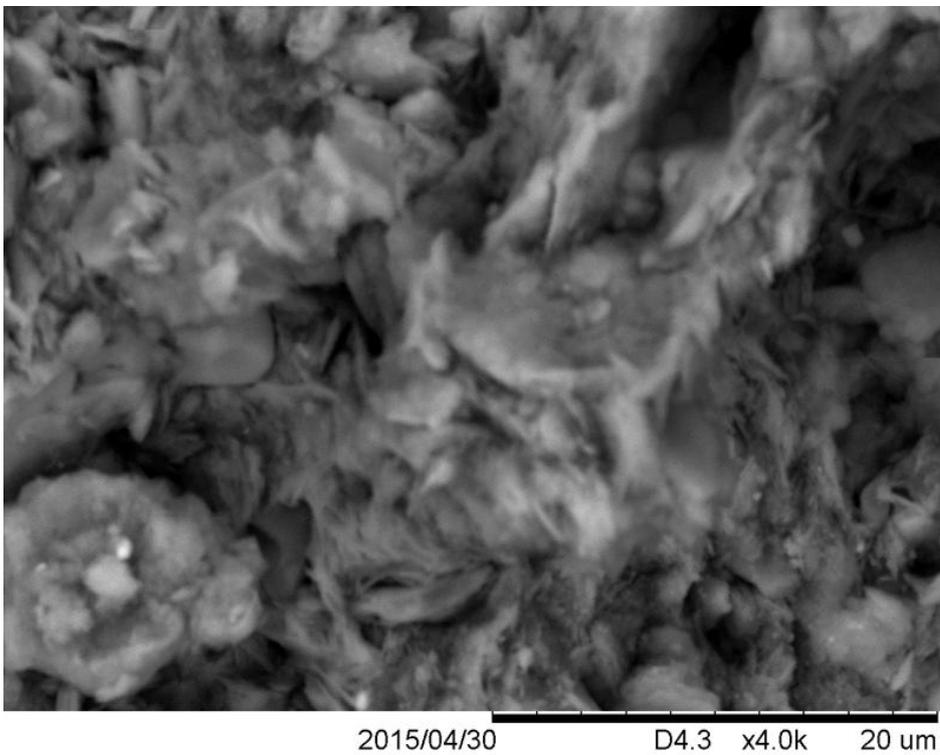


Figura 95: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto B.

Através dos pontos 'C' e 'D', é possível verificar que o aumento da energia no ramo úmido da curva de compactação não apresenta grandes efeitos sobre a macro (Figuras 95 e 96) e microestrutura do solo compactado (Figuras 97 e 98). A diferença no valor obtido para a condutividade hidráulica entre os pontos 'C' e 'D' foi de 4 (quatro) vezes.

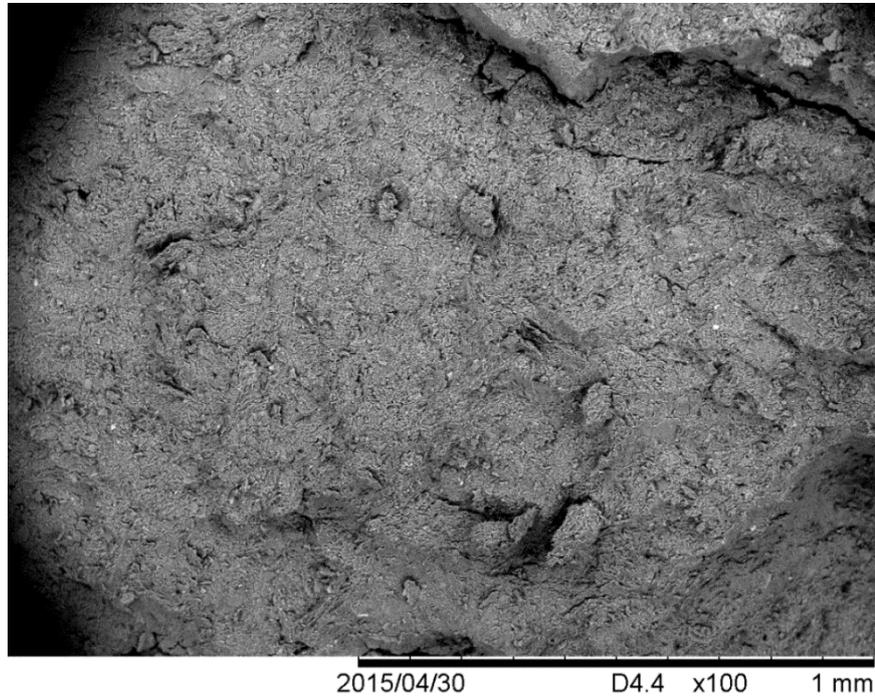


Figura 96: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto C.

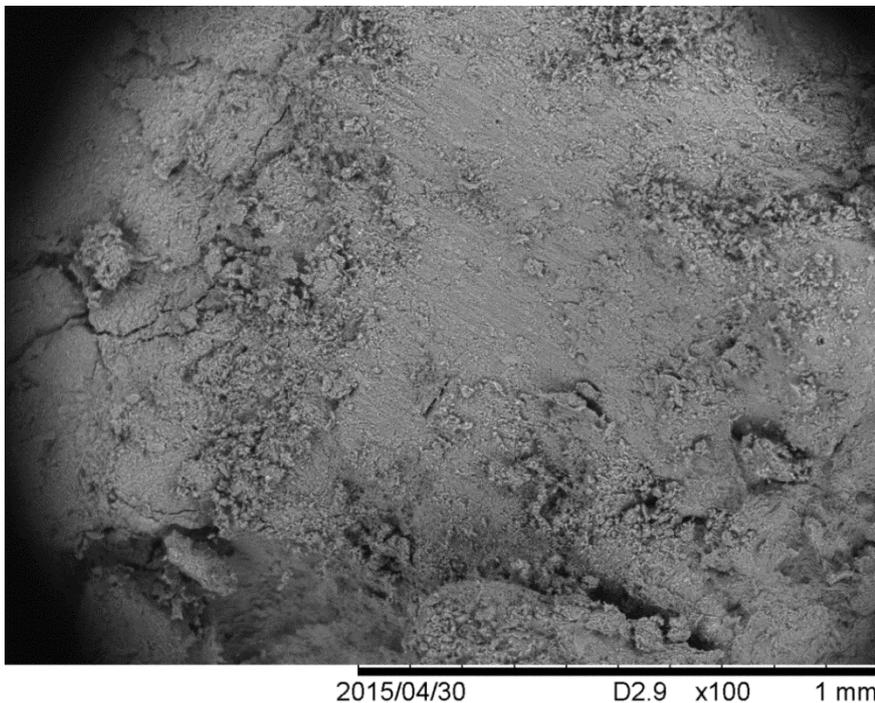


Figura 97: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto D.

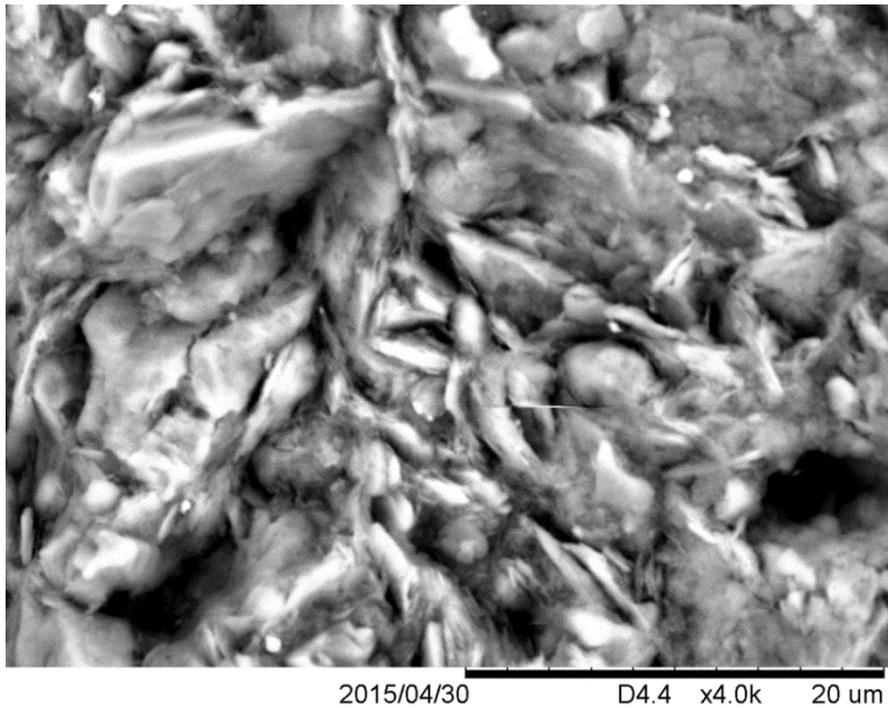


Figura 98: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto C.

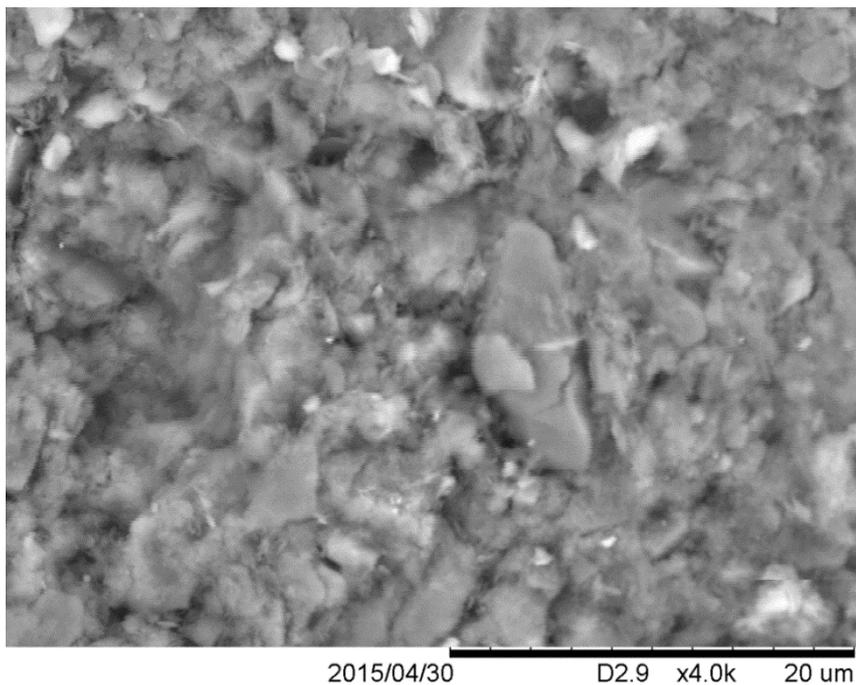


Figura 99: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto D.

As Figuras 99 a 101 mostram a relação entre a condutividade hidráulica e o índice de vazios. Pode-se verificar que em geral, o comportamento da condutividade hidráulica é diretamente relacionado com o índice de vazios do solo onde a redução dos índices acarreta redução dos valores da condutividade hidráulica.

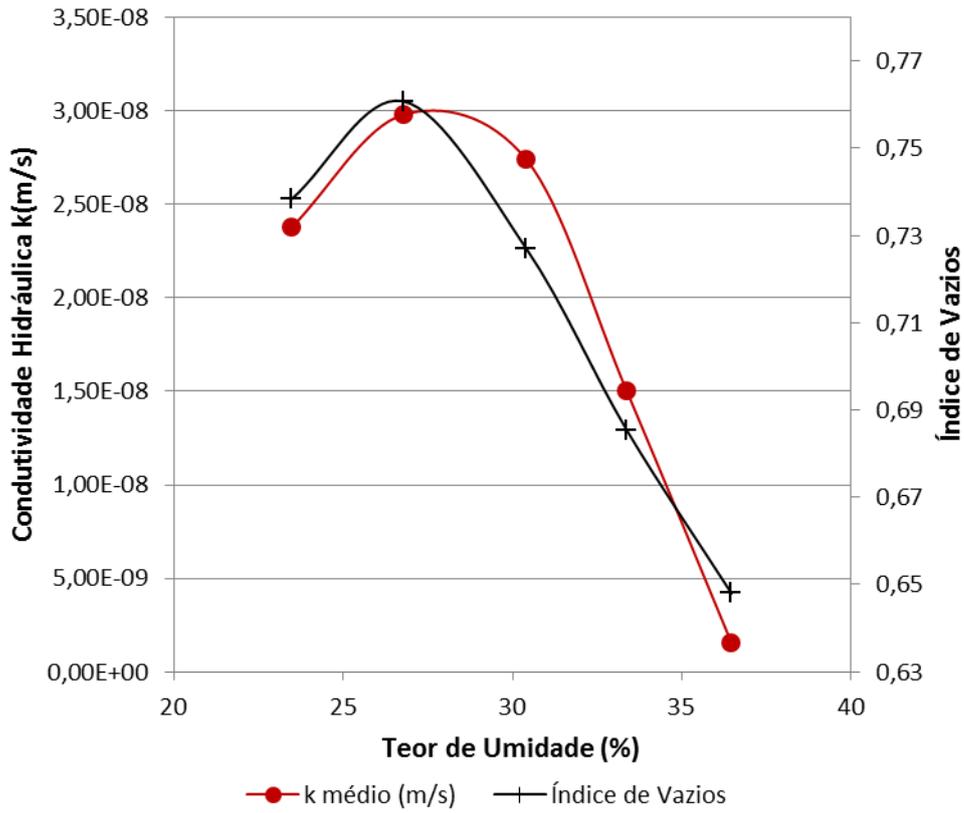


Figura 100: Relação entre a condutividade hidráulica e o índice de vazios.

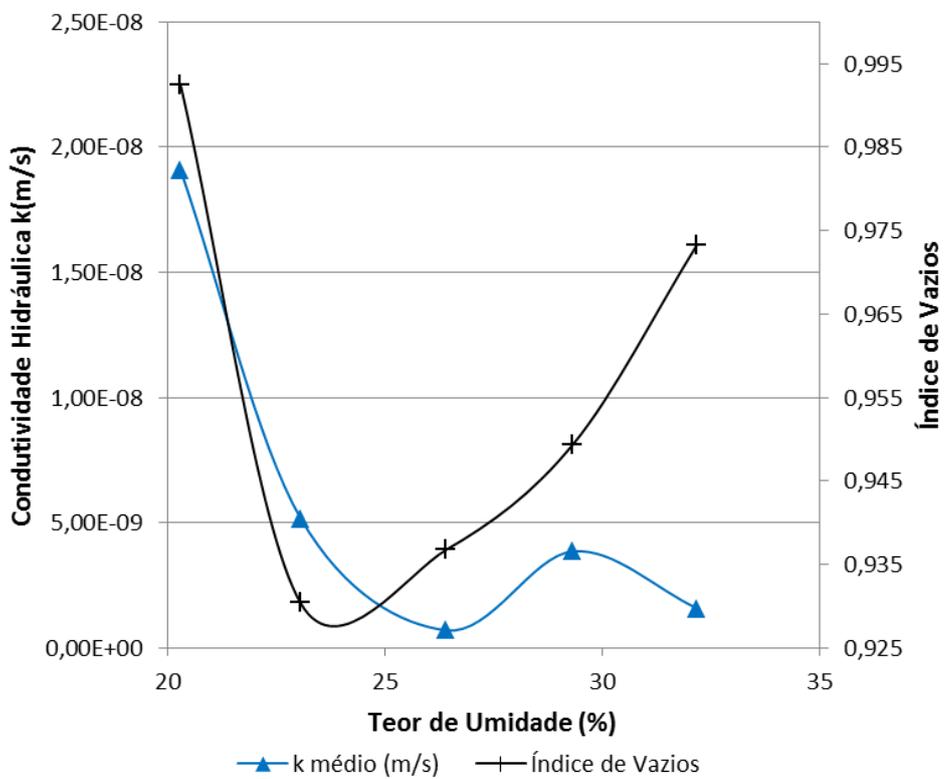


Figura 101: Relação entre a condutividade hidráulica e o índice de vazios.

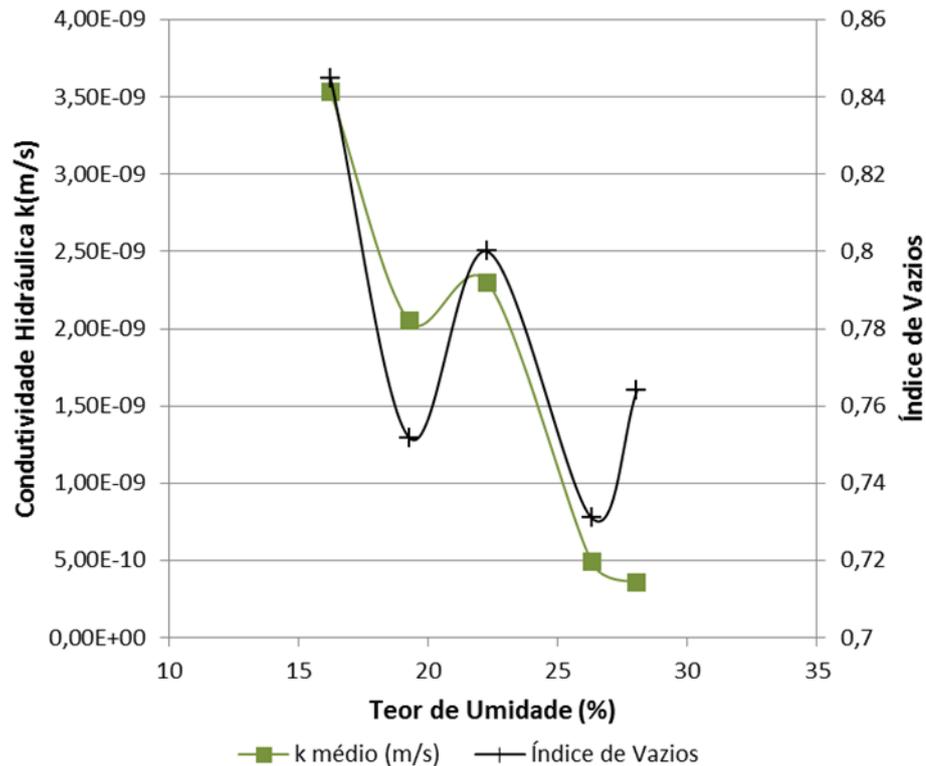


Figura 102: Relação entre a condutividade hidráulica e o índice de vazios.

4.6.

ENSAIOS DE CONTRAÇÃO

Para a avaliação do comportamento contráctil do solo foram realizados 15 (quinze) ensaios de contração nas mesmas amostras utilizadas nos ensaios de condutividade hidráulica, esse procedimento foi o mesmo adotado por Macambira (2002) e Piedade JR (2003), que destacam que esse método garante que as amostras possuam as mesmas características para ambos os ensaios.

Como já mencionado, os ensaios duraram 7 (sete) dias nos quais foram realizadas medições dos valores de contração axial e os valores da temperatura e da umidade relativa do ar, para avaliar a influência da variação desses parâmetros no comportamento contráctil do solo. Os gráficos que relacionam a contração axial e os parâmetros de temperatura e umidade relativa do ar estão dispostos no Anexo B. Analisando-se os gráficos obtidos verificou-se que as condições ambientais do Laboratório não interferiram nos resultados dos ensaios. Macambira (2002) e Piedade JR (2003) chegaram a essa mesma conclusão ao realizar ensaios de contração livre em ambiente de laboratório.

Além dos valores de contração axial e diametral, mediram-se também os valores de contração volumétrica, que serve de base para avaliação do solo quanto ao uso como material de construção para camada impermeável de aterros sanitários, e a contração diametral, com os valores inicial e final de cada parâmetro.

Vale lembrar que a perda de água do solo, motivo da ocorrência da contração, é função da superfície do solo exposta ao ar, logo, quanto maior a superfície exposta ao ar maior será a quantidade de água perdida. Isso porque o corpo de prova possui uma superfície exposta ao ar muito maior que a porção de solo presente na camada em campo, uma vez que esta tem grande parte de sua superfície confinada lateralmente. Dessa forma, pode-se dizer que os corpos-de-prova, por apresentarem maior perda d'água, apresentarão maior contração (Piedade Jr, 2003).

Sendo assim os ensaios de laboratório expõe a amostra a uma condição de contração mais severa que a condição de exposição no campo, pode-se esperar, portanto que o processo de contração seja menos intenso no campo.

As Figuras 102 a 104 apresentam os resultados dos ensaios de contração em função do tempo para os corpos moldados nas energias do Proctor, Normal, Intermediária e Modificada, respectivamente. Por meio delas pode-se observar o comportamento contráctil do solo ao longo do tempo de secagem em dias.

Observando os gráficos é possível verificar que os valores de contração axial estabilizaram-se, em geral, após o segundo dia de ensaio, para todas as energias, com exceção do ponto 01 da Energia do Proctor Normal que se estabilizou ao terceiro dia.

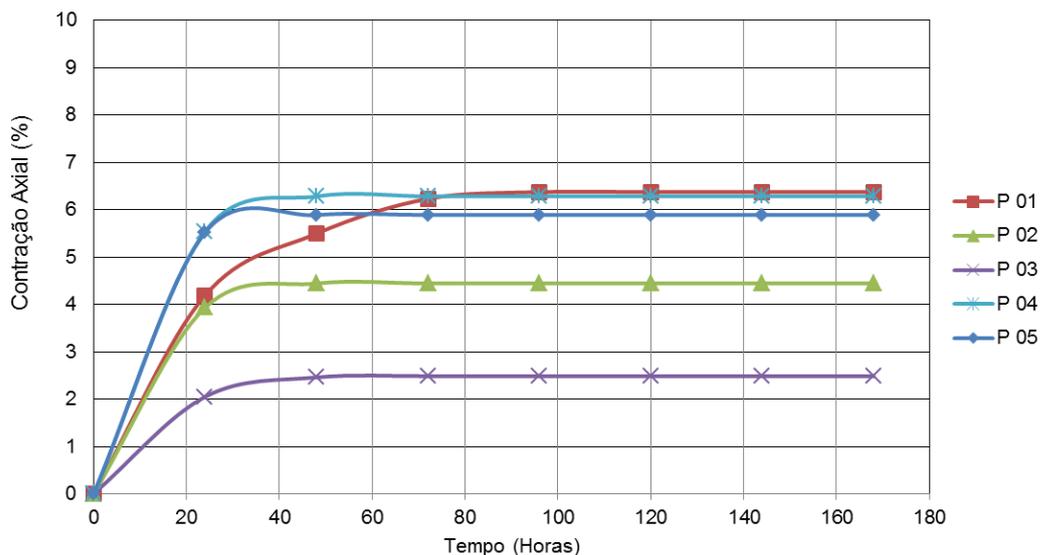


Figura 103: Valores de Contração com o tempo, para Energia do Proctor Normal.

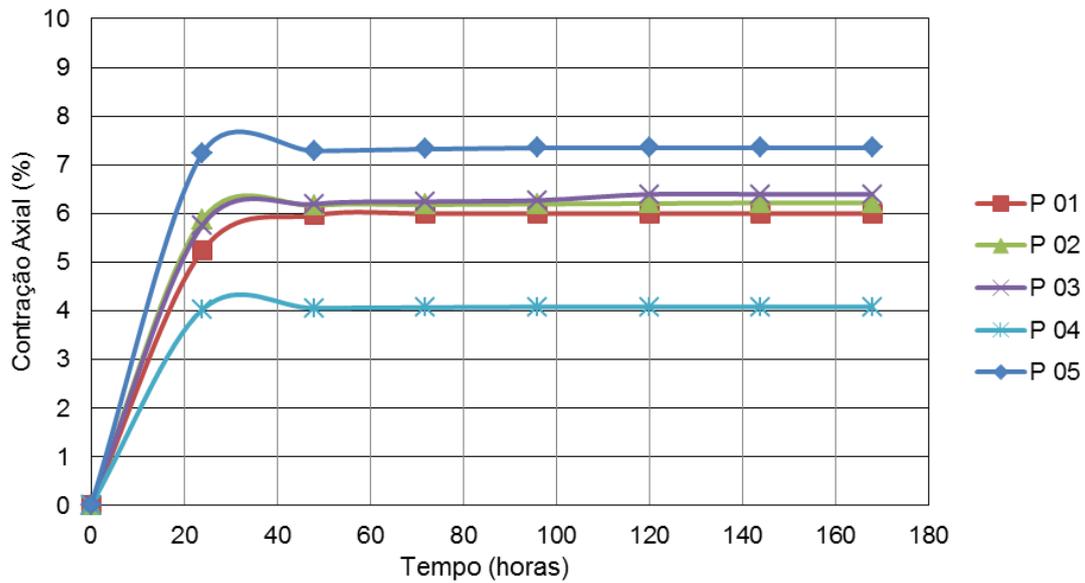


Figura 104: Valores de Contração com o tempo, para Energia do Proctor Intermediária.

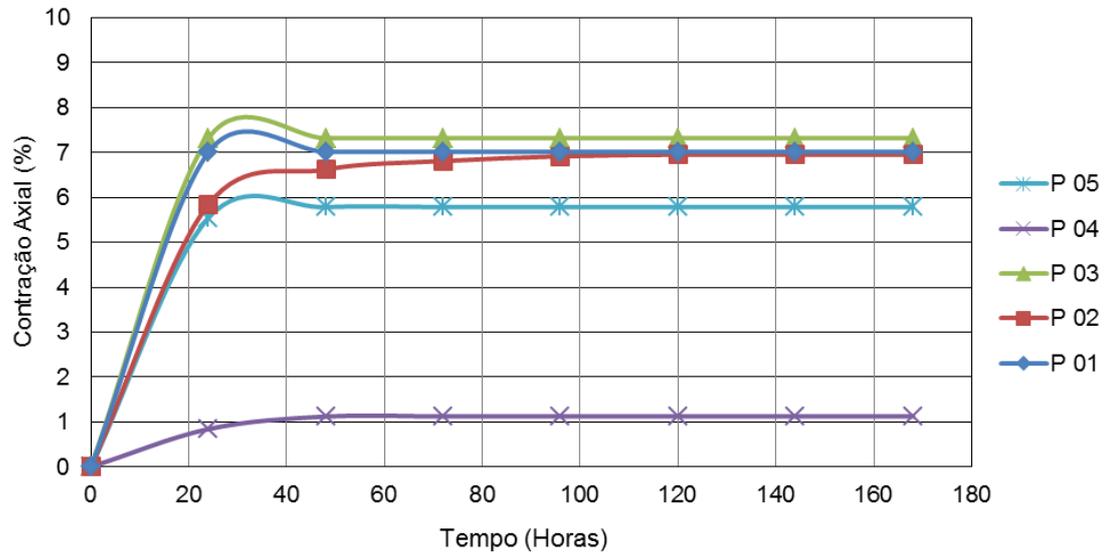


Figura 105: Valores de Contração com o tempo, para Energia do Proctor Modificada.

As Figuras 105 a 107 apresentam a relação entre a curva de compactação e a curva de contração axial. Em geral observa-se que os maiores valores de contração estão relacionados com os pontos compactados no ramo seco da curva de compactação.

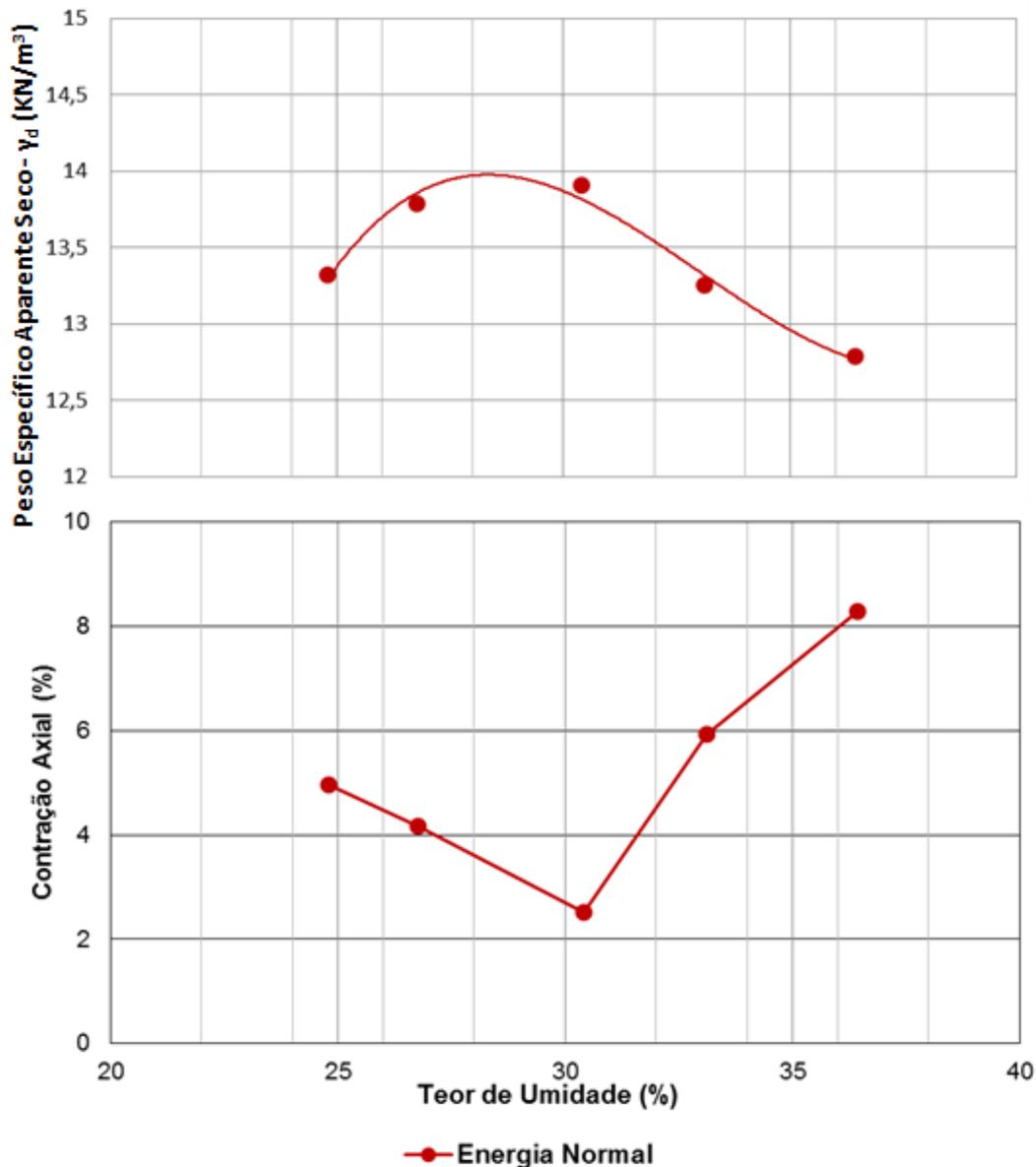


Figura 106: Relação entre as curvas de compactação e de contração axial, para a Energia do Proctor Normal.

A Figura 105 mostra que, para uma mesma energia (Energia do Proctor Normal), o aumento da umidade de moldagem ocasionou, de uma forma geral, aumento da contração axial do solo, comportamento também verificado por Macambira (2002) que realizou estudos de alguns solos do estado de São Paulo para construção de barreiras minerais, onde as suas amostras com maior teor de argila apresentaram aumento dos valores de contração com o incremento da umidade.

Além disso, para esta mesma energia de compactação, observa-se também que os menores valores de contração axial foram dos corpos de prova moldados com teor de umidade próximos ao teor de umidade ótima.

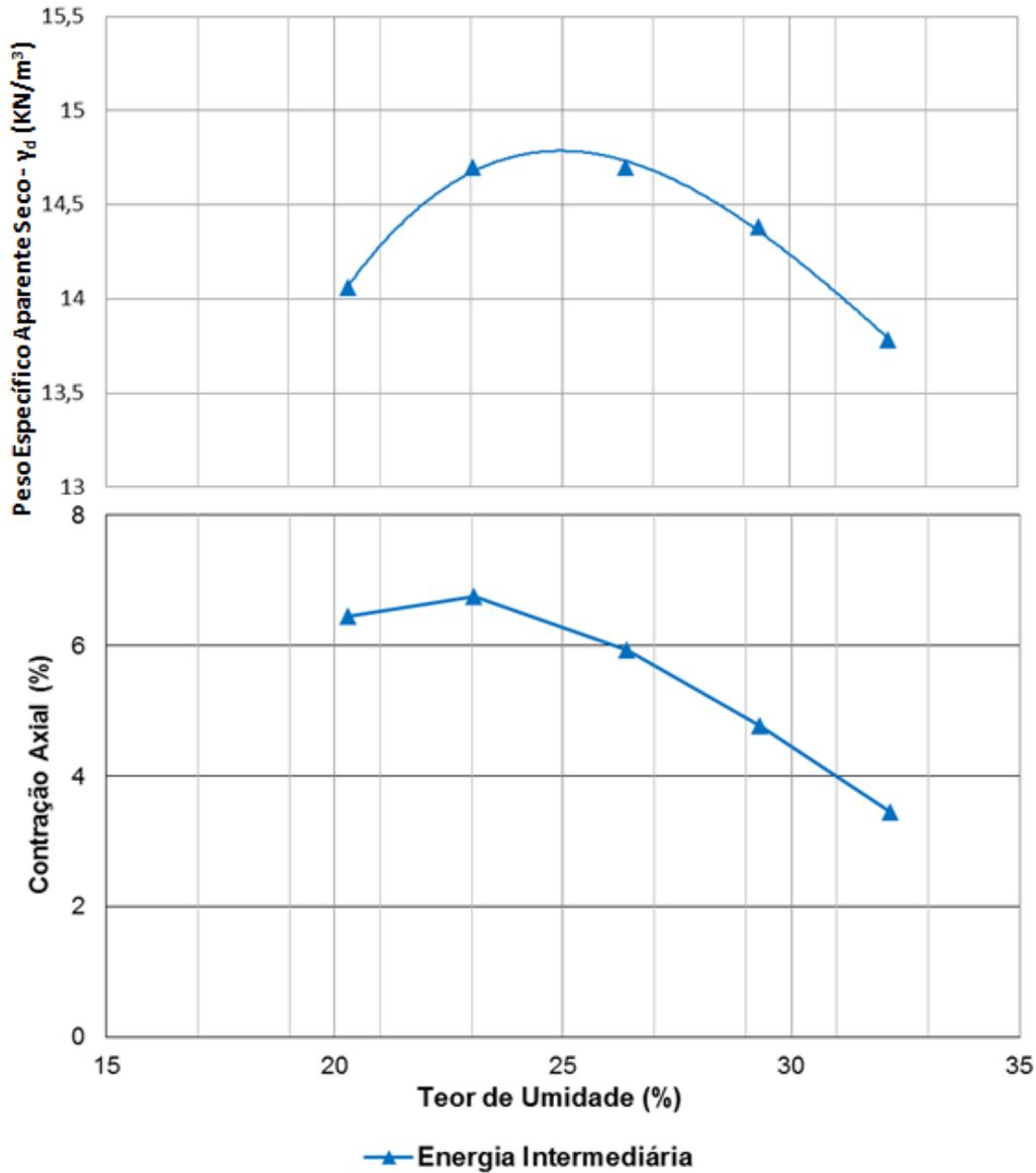


Figura 107: Relação entre as curvas de compactação e de contração axial, para a Energia do Proctor Intermediária.

Na Figura 106 pode-se observar o comportamento da contração axial e função do aumento do teor de umidade para a Energia do Proctor Intermediária. Pode-se notar um comportamento exatamente oposto ao apresentado pela Energia do Proctor Normal, ou seja, os valores da contração axial caíram conforme o acréscimo do teor de umidade.

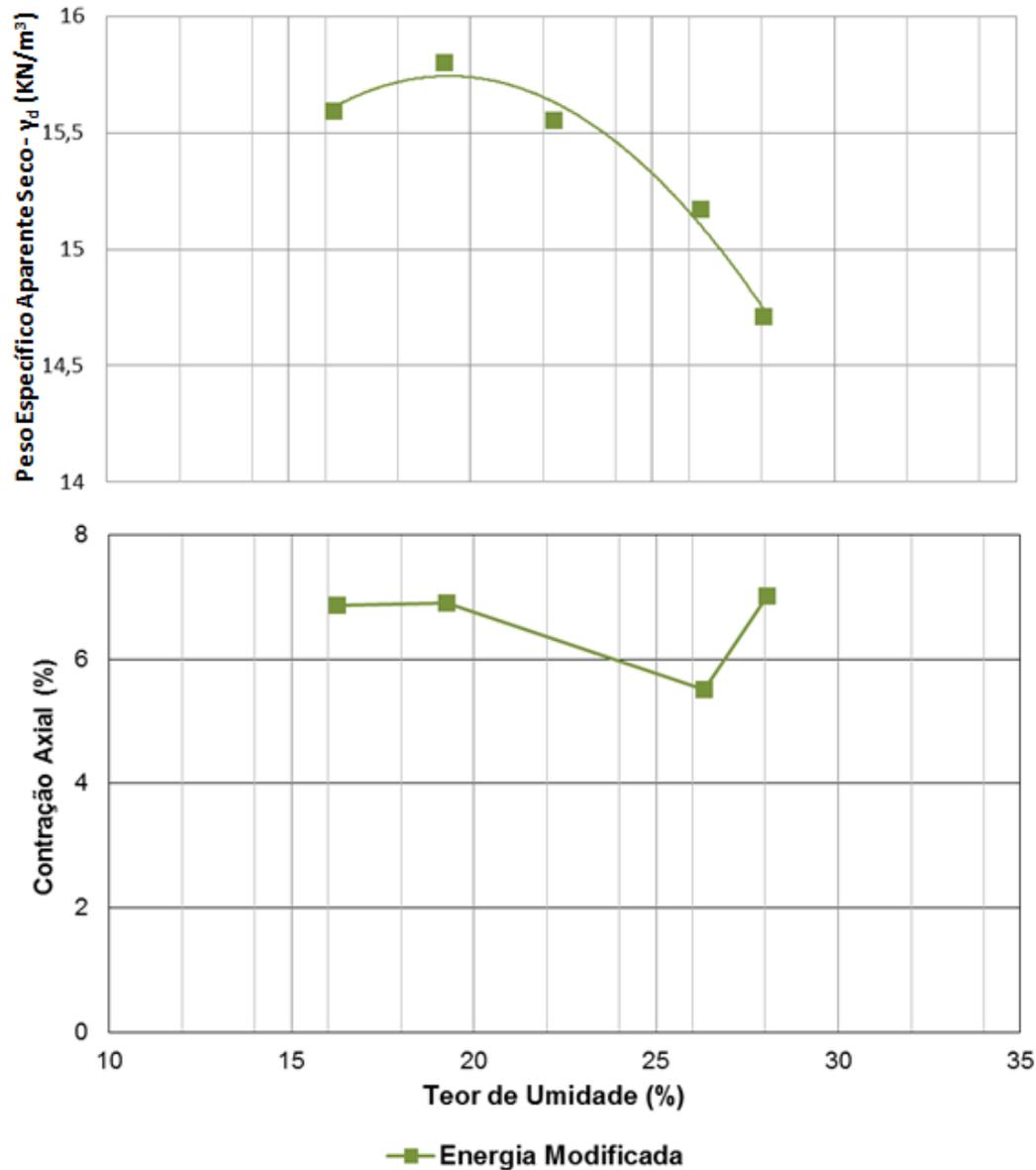


Figura 108: Relação entre as curvas de compactação e de contração axial, para a Energia Modificada.

Já a Figura 107 apresenta a relação entre a curva de compactação e a curva de contração axial para a Energia do Proctor Modificada. Não se pode inferir claramente sobre a influência do teor de umidade no comportamento contráctil do solo, pois existem valores elevados de contração tanto abaixo quanto acima do teor de umidade ótima.

Em resumo, apresentam-se nas 108 e 109 os valores de contração axial para todas as energias reunidas em relação com o teor de umidade e em relação ao valor da umidade ótima. Verifica-se que há uma tendência de aumento de contração axial com o acréscimo da energia de compactação, o que fica claro na Figura 109, em especial para os pontos moldados do ramo seco até o valor de 4,0 % acima da umidade ótima.

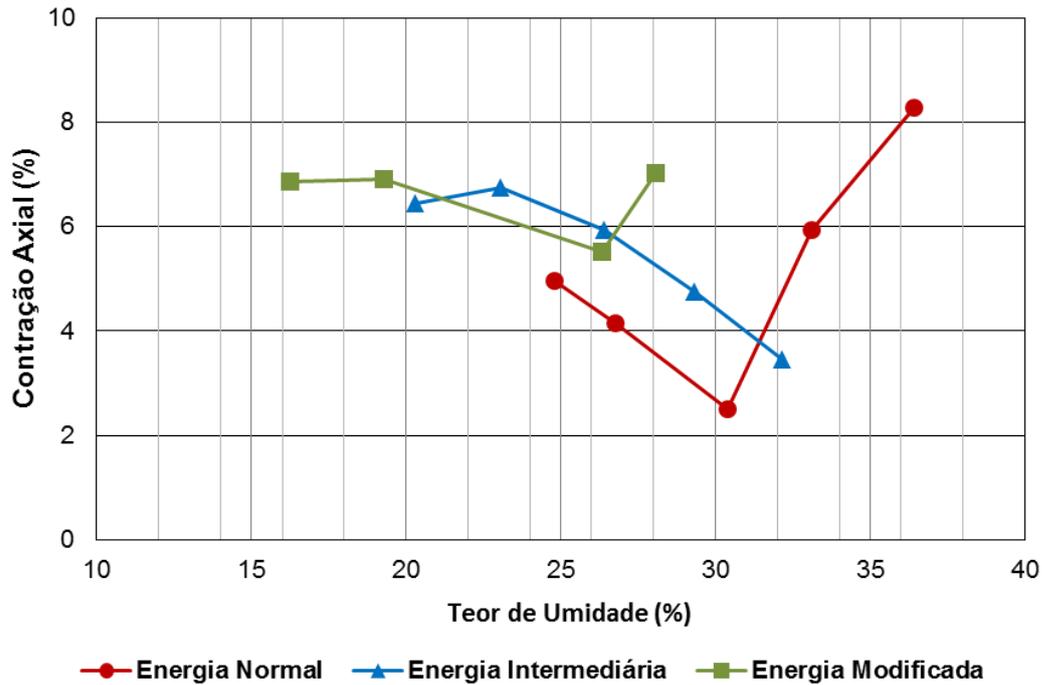


Figura 109: Valores de contração axial máxima para os corpos de prova em função do teor de umidade.

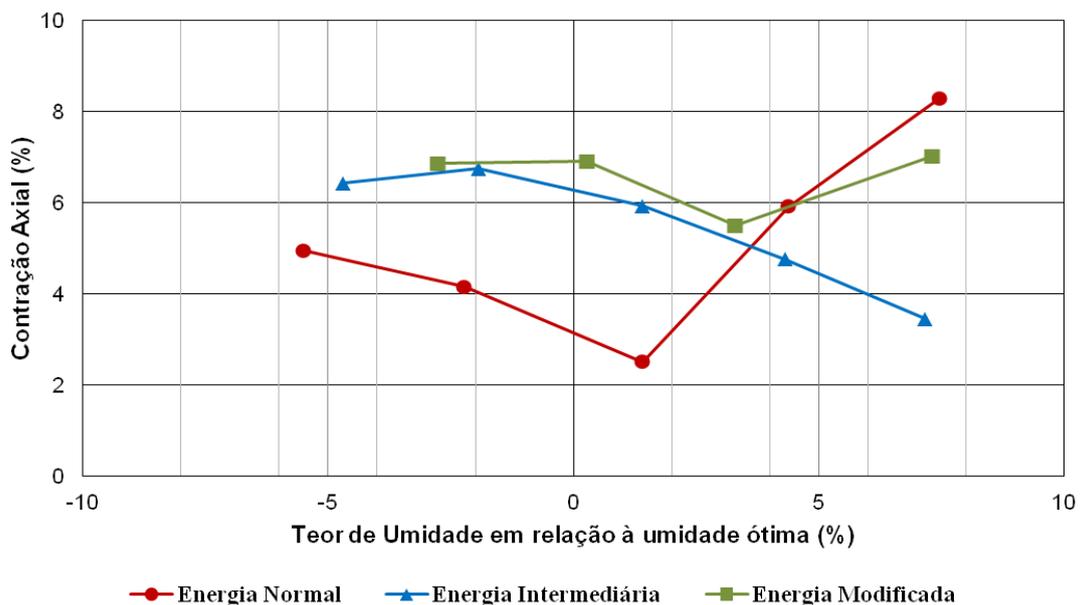


Figura 110: Resultados dos ensaios de contração axial em função da umidade ótima.

Tendo em vista que a compactação se dá na direção vertical observa-se que o incremento da energia de compactação resultou em aumento dos valores de contração axial, isso pode ser verificado observando a amplitude dos valores obtidos.

A Figura 110 mostra os resultados da análise da contração diametral o que comprova que nesta direção a amplitude de variação é menor que no sentido da

compactação (axial). Observou-se que a amplitude dos valores de contração diametral de 2,0 % (com valores entre 4,0 e 6,0 %) é menor que a amplitude obtida para os valores de contração axial, que foi de 5,0 % (com valores entre 3,0 e 8,0 %). Tal constatação revela a maior tendência de maior contração no sentido vertical que é o sentido da compactação, e não no sentido horizontal, que poderia comprometer a integridade de uma barreira impermeável.

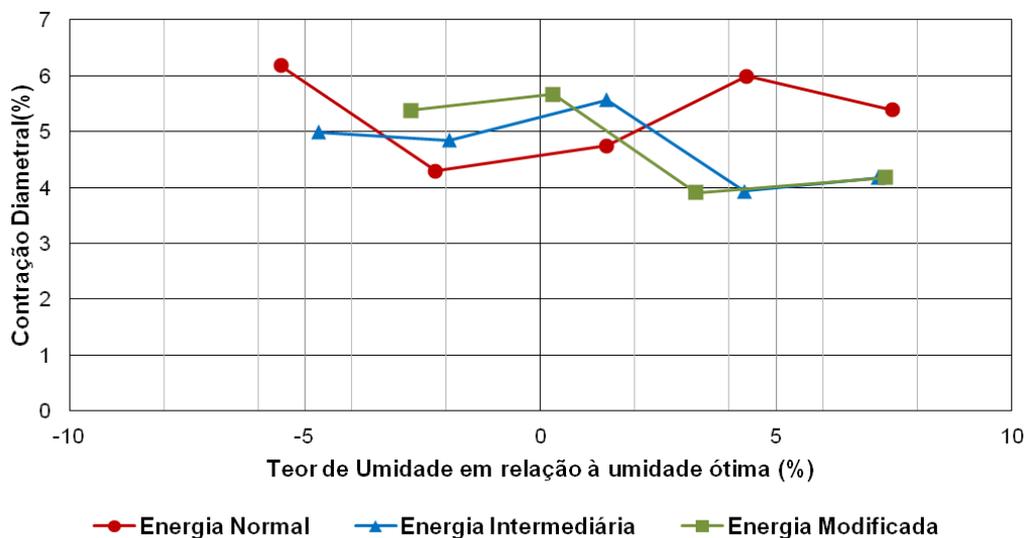


Figura 111: Resultados dos ensaios de contração diametral.

Contudo, para a avaliação de solos a serem utilizados como material de construção para barreiras minerais faz-se necessário avaliar o seu comportamento quanto à sua contração volumétrica, cujos resultados obtidos são apresentados na Figura 112.

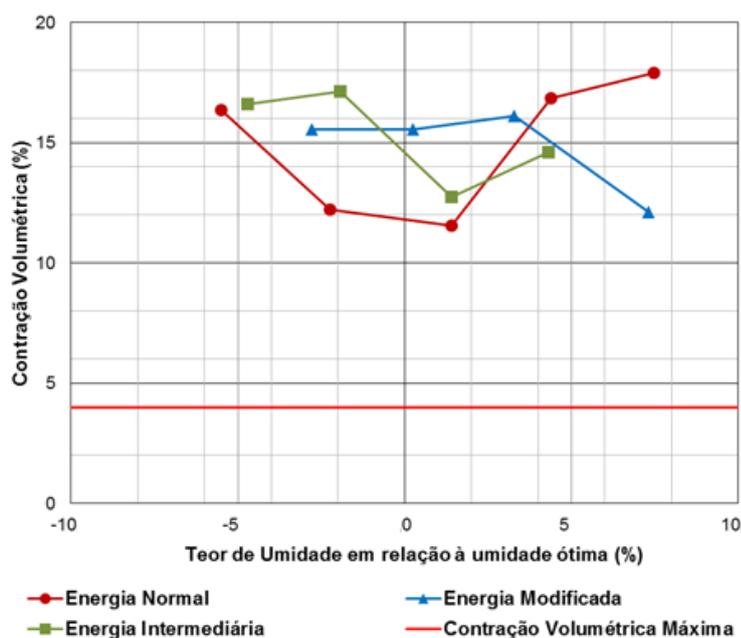


Figura 112: Resultados dos ensaios de contração volumétrica em relação ao teor de umidade ótima.

Os valores obtidos variaram entre 12,0 e 18,0 %, o que representam valores muito elevados em vista do valor limite para este parâmetro com vistas ao uso como material de construção para camadas impermeabilizantes, que, como mostrado na revisão bibliográfica, deve ser de no máximo 4,0 %, para garantir que não haja fissuras e fraturas nas camadas. Mas vale lembrar que o ensaio utilizado pelos autores que defendem este valor limite não é o mesmo realizado neste trabalho, pois era necessário o uso de mercúrio.

Além disso, as condições de umidade encontradas na Amazônia não puderam ser reproduzidas durante os ensaios.

A princípio pretendeu-se utilizar imagens das análises de MEV para analisar as modificações internas ocorridas nos corpos de prova durante o processo de secagem, mas para a obtenção das imagens no aparelho de MEV a umidade não pode ser superior a 5,0 %, por esse motivo fazia-se necessário a secagem ao ar das amostras, assim abriu-se mão da análise com os resultados das análises de MEV, visto que a secagem promove a contração não sendo possível analisar a variação da estrutura do solo ao longo do processo de contração.

4.7.

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES (OU NÃO CONFINADA)

Para analisar o comportamento de resistência à compressão simples do solo foram realizados 15 (quinze) ensaios de compressão simples. Os corpos de prova foram obtidos a partir dos mesmos blocos utilizados para os ensaios de condutividade hidráulica, contudo, as dimensões foram diferentes (3,8 cm de diâmetro e 7,6 cm de altura) para minimizar o efeito das concentrações de tensões nas extremidades dos corpos de prova).

As Figuras 112 a 114 apresentam o as curvas de resistência à compressão simples com a variação da umidade de moldagem dos corpos de prova.

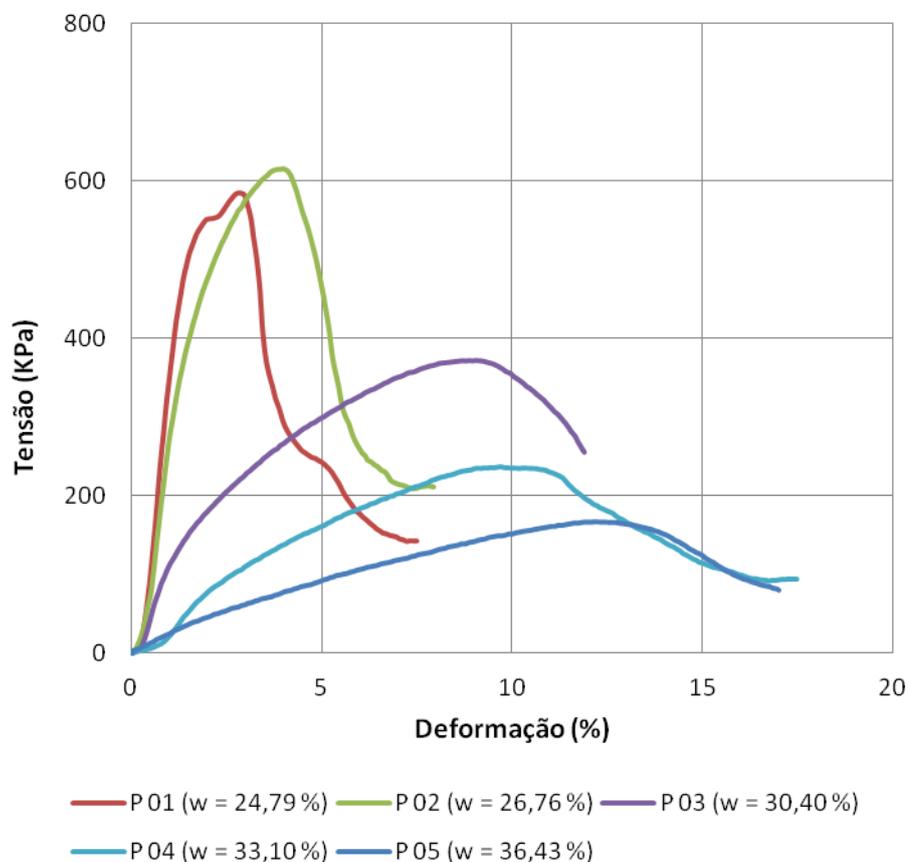


Figura 113: Curvas do ensaio de compressão simples para Energia do Proctor Normal.

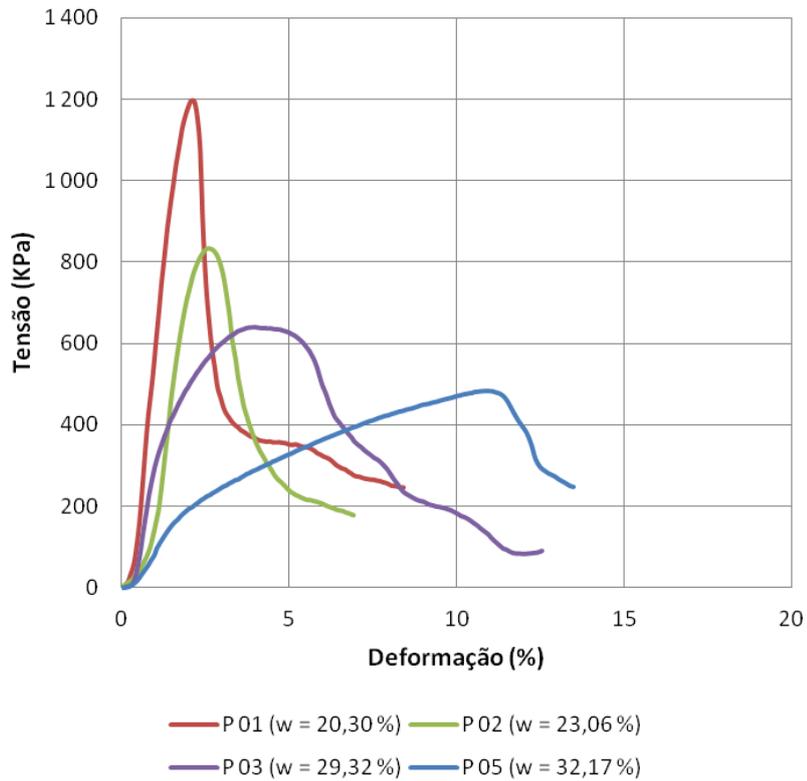


Figura 114: Curvas do ensaio de compressão simples para Energia do Proctor Intermediária.

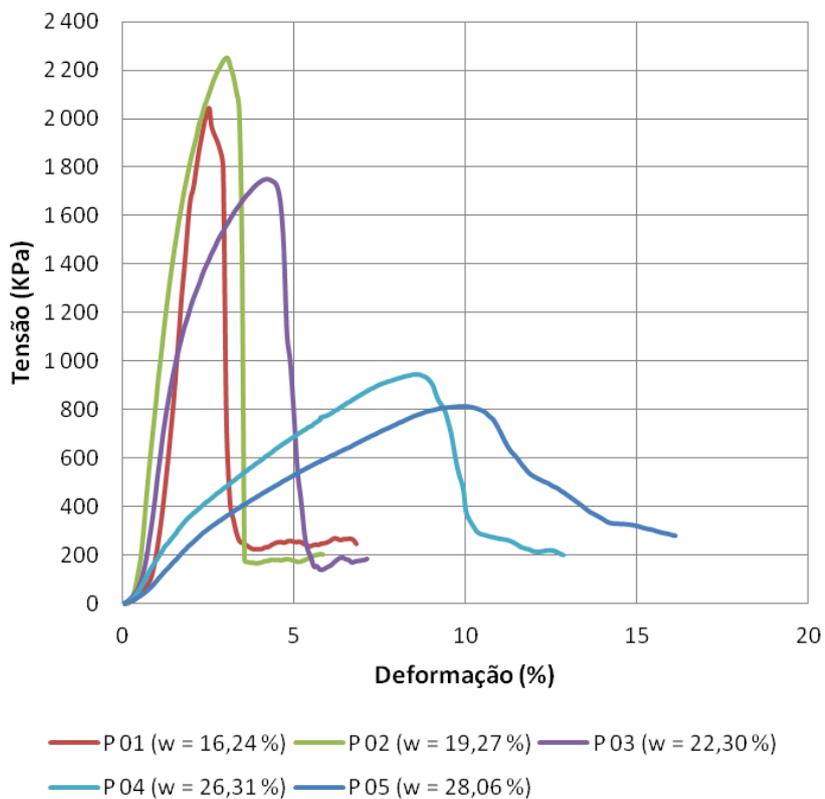


Figura 115: Curvas do ensaio de compressão simples para Energia do Proctor Modificada.

Pode-se observar que, em geral, ocorre uma redução da resistência à compressão simples com o aumento do teor de umidade. Este comportamento, segundo Lambe e Whitman (1979), pode ser atribuído ao arranjo estrutural do solo, ou seja, as amostras compactadas no ramo seco, portanto apresentando estrutura floculada, possuem valores de resistência superiores aos pontos correspondentes aos corpos de prova moldados no ramo úmido, que possuem estrutura dispersa ou paralela.

A Figura 115 apresenta a relação entre os valores máximos de resistência à compressão simples e o teor de umidade ótima, onde pode-se observar de forma mais clara o que Lambe e Whitman (1979) sugerem. Outra observação relacionada a essa figura é que para todos os pontos o aumento da energia de compactação promoveu acréscimo da resistência.

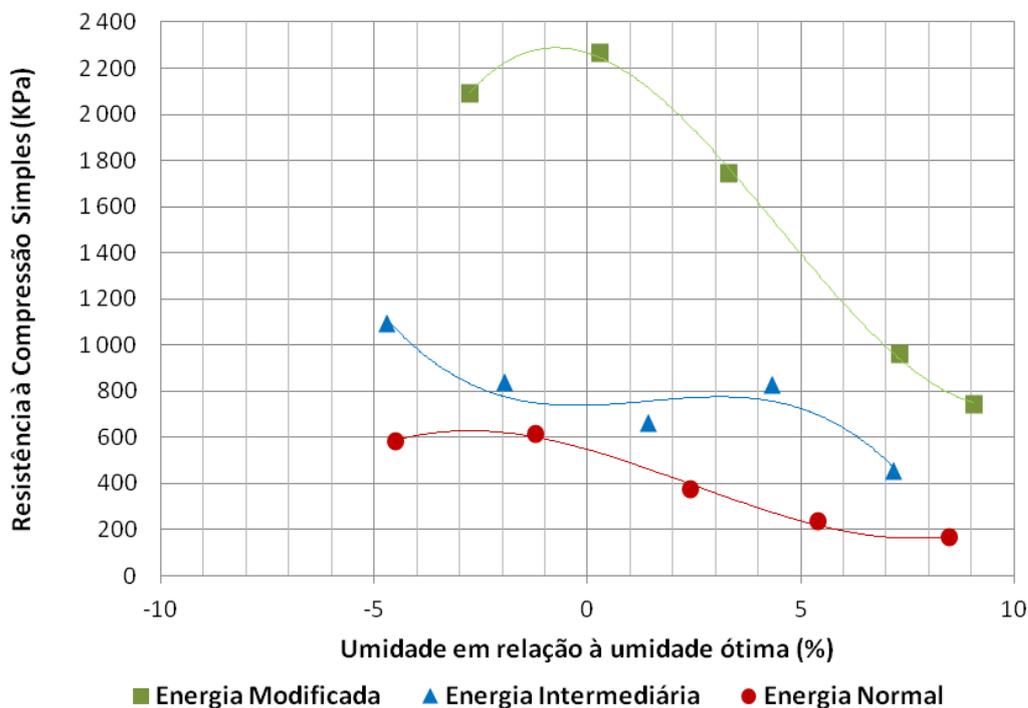


Figura 116: Compressão Simples em função do teor de umidade ótima.

A Figura 116 apresenta os dados reunidos referentes aos valores máximos obtidos nos ensaios de compressão simples para as três energias de compactação. Apenas o ponto mais úmido da curva de compactação realizada com a energia do Proctor Normal (P05) apresentou valor abaixo do limite mínimo para que seja utilizado na construção de barreiras minerais de aterros sanitários, que é sugerida como 200 KPa.

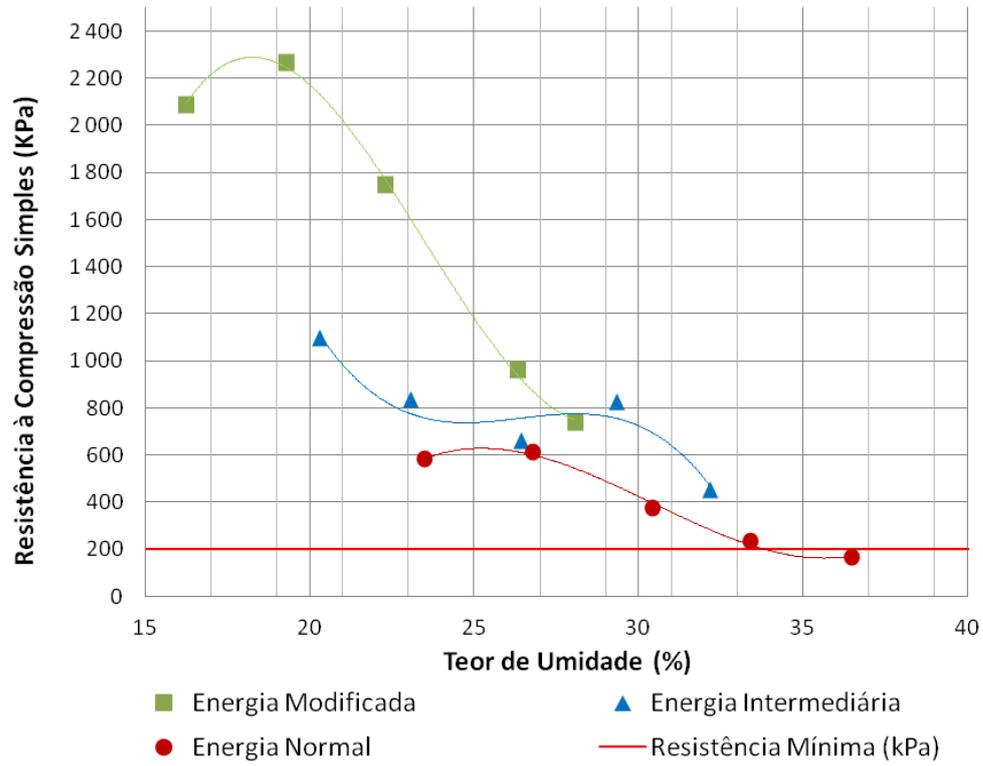


Figura 117: Compressão Simples em função do teor de umidade.

4.8.

ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Completando os ensaios do programa experimental para avaliação do solo como possível material de construção de barreiras minerais realizaram-se 42 ensaios de cisalhamento direto com o objetivo de obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo em diferentes condições de umidade e de energia de compactação.

Para cada corpo de prova ensaiado foram obtidas as seguintes características iniciais: tensão normal (σ_n), peso específico natural (γ_{nat}), peso específico aparente seco (γ_{do}), teor de umidade (w_o), índice de vazios (e_o) e o teor de umidade final (w_f). Para cada ensaio, foram traçadas as curvas de tensão cisalhante (τ) versus deslocamento horizontal (δ_h) e deslocamento vertical (δ_v) versus deslocamento horizontal (δ_h). As curvas de Tensão de Cisalhamento x Deslocamento para cada um dos ensaios são apresentadas no Anexo C.

A Tabela 28 mostra as características iniciais dos corpos de prova moldados na Energia do Proctor Normal.

A partir da Figura 117 pode-se constatar que as envoltórias de resistência apresentam o mesmo comportamento, estando quase superpostas umas às outras, não havendo grandes variações nos valores do ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à variação do teor de umidade de moldagem. Com o auxílio da Figura 118, observa-se que a variação do ângulo de resistência ao cisalhamento foi de aproximadamente 6,2°.

Tabela 28: Dados dos ensaios de cisalhamento direto para a Energia do Proctor Normal.

Energia Normal	Ensaio	σ_n (KPa)	γ_{nat} (KN/m ³)	γ_{do} (KN/m ³)	w_o (%)	e_o	w_f (%)
	P01	203	17,13	13,76	24,47	0,78	33,08
297		16,38	13,16	24,47	0,86	30,65	
390		16,46	13,22	24,47	0,85	28,89	
P02	203	17,74	14,04	26,37	0,75	30,43	
	297	18,02	14,27	26,33	0,72	30,77	
	390	17,15	13,58	26,37	0,81	31,12	
P03	203	17,52	13,45	30,25	0,82	30,70	
	297	17,49	13,43	30,25	0,83	30,89	
	390	17,64	13,54	30,25	0,81	30,19	
P04	203	17,36	13,01	33,50	0,88	35,14	
	297	17,49	13,10	33,50	0,87	32,82	
	390	17,64	13,21	33,50	0,86	33,25	

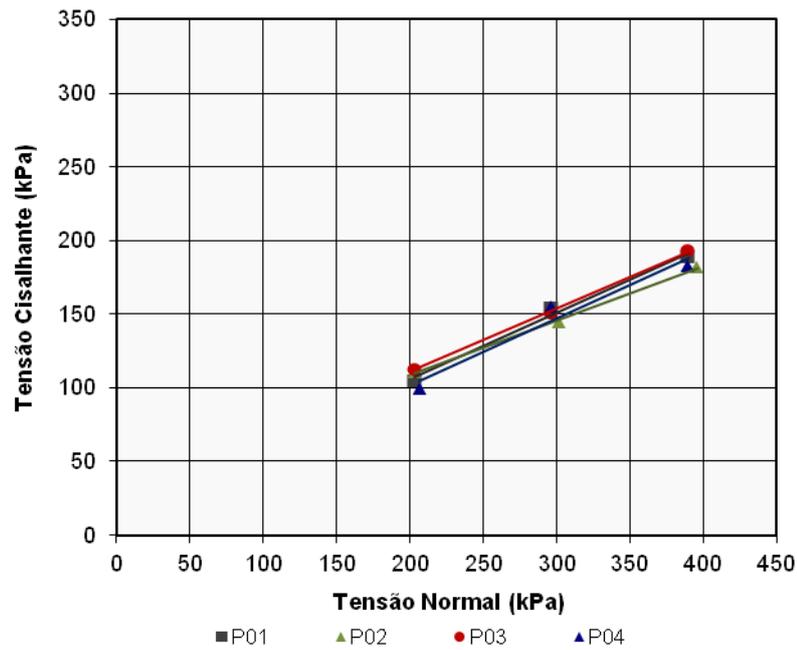


Figura 118: Envoltórias de resistência para os pontos da Energia do Proctor Normal.

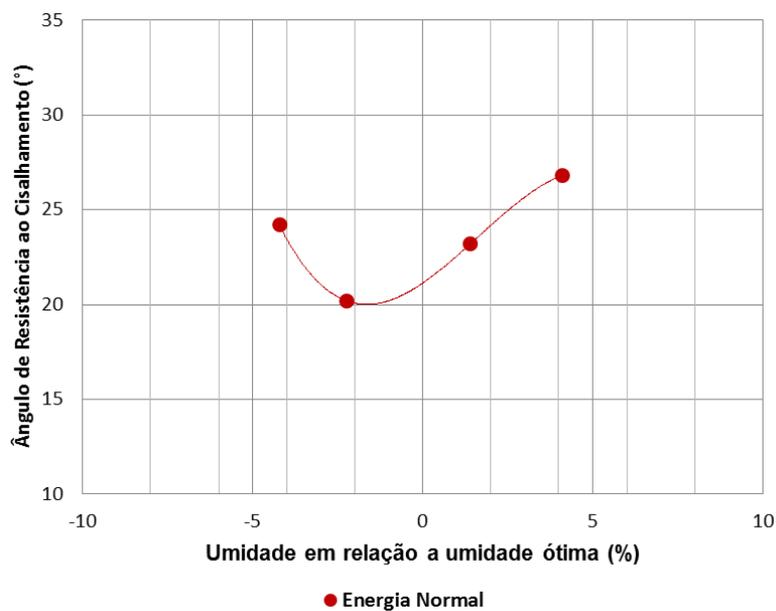


Figura 119: Ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Normal.

A Figura 119 apresenta a variação da coesão em relação à variação do teor de umidade. Percebe-se que o valor máximo de coesão foi próximo ao ponto de peso específico máximo do solo, sendo a sua variação de 23,9 KPa.

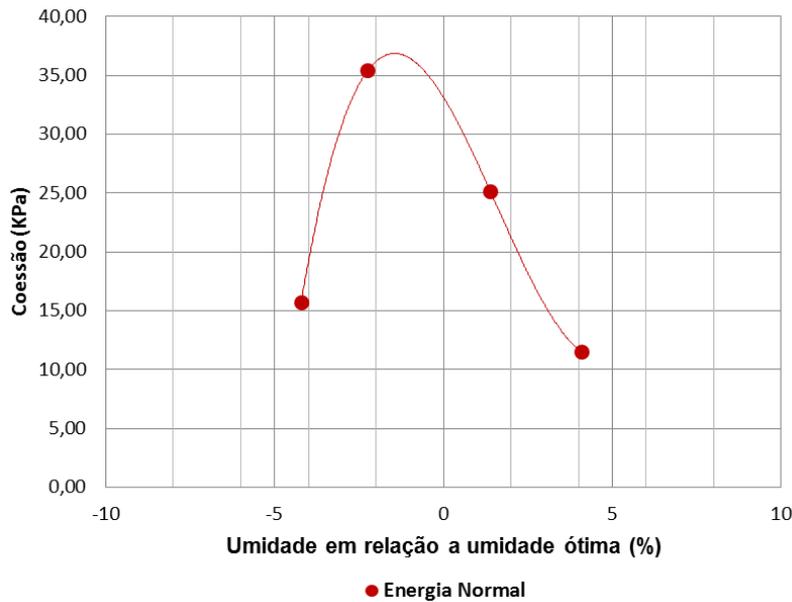


Figura 120: Coesão em relação à umidade ótima para a Energia do Proctor Normal.

A Tabela 29 mostra as características iniciais dos corpos de prova moldados na Energia do Proctor Intermediária.

Tabela 29: Dados dos ensaios de cisalhamento direto para a Energia do Proctor Intermediária.

Ensaio	σ_n	γ_{nat}	γ_{do}	w_o	e_o	w_f
	(KPa)	(KN/m ³)	(KN/m ³)	(%)		(%)
P01	203	16,91	14,04	20,40	0,75	25,55
	297	16,43	13,65	20,40	0,80	29,40
	390	16,83	13,98	20,40	0,75	-
P02	203	18,66	15,21	22,74	0,61	25,87
	297	18,56	15,12	22,74	0,62	29,40
	390	16,83	13,71	22,74	0,79	-
P03	203	18,08	14,23	27,05	0,72	-
	297	18,22	14,34	27,05	0,71	26,96
	390	18,41	14,49	27,05	0,69	-
P04	203	18,40	14,23	29,32	0,72	28,60
	297	18,22	14,09	29,32	0,74	26,96
	390	18,48	14,29	29,32	0,71	27,85
P05	203	17,80	13,47	32,17	0,82	33,00
	297	17,84	13,50	32,17	0,82	30,70
	390	17,55	13,28	32,17	0,85	30,80

A Figura 120 reúne as envoltórias de resistência para os corpos de prova moldados com Energia do Proctor Intermediária. Pode se notar que as envoltórias apresentam-se um pouco deslocadas guardando um paralelismo.

A Figura 121 apresenta o comportamento do ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à variação do teor de umidade de moldagem, não se pode

verificar uma tendência, pois os valores ficaram bem próximos (variação de $5,8^\circ$). Mas observando a Figura 122 percebe-se que o valor da coesão do solo variou bastante, 26,63 KPa, sendo o valor máximo próximo ao teor de umidade ótima, como para a Energia do Proctor Normal.

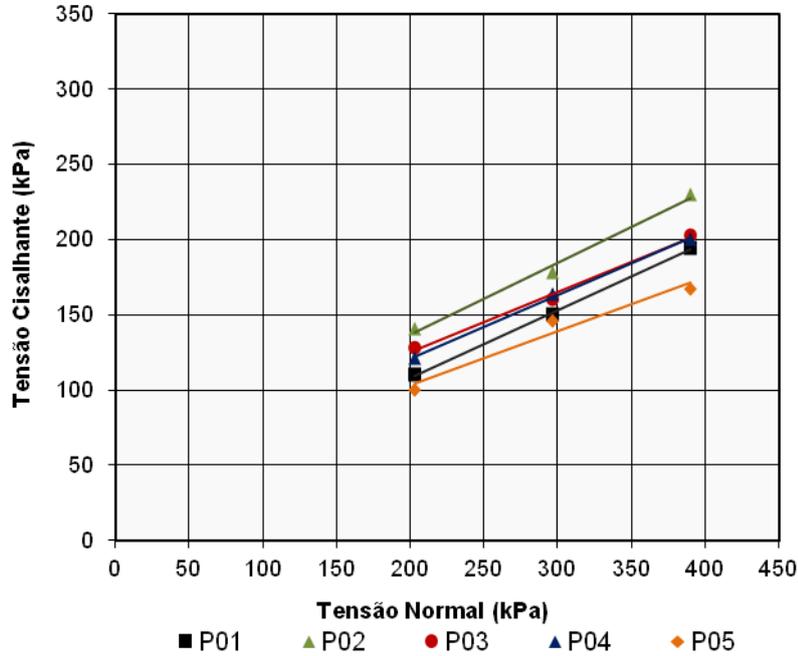


Figura 121: Envoltórias de resistência para os pontos compactados na Energia do Proctor Intermediária.

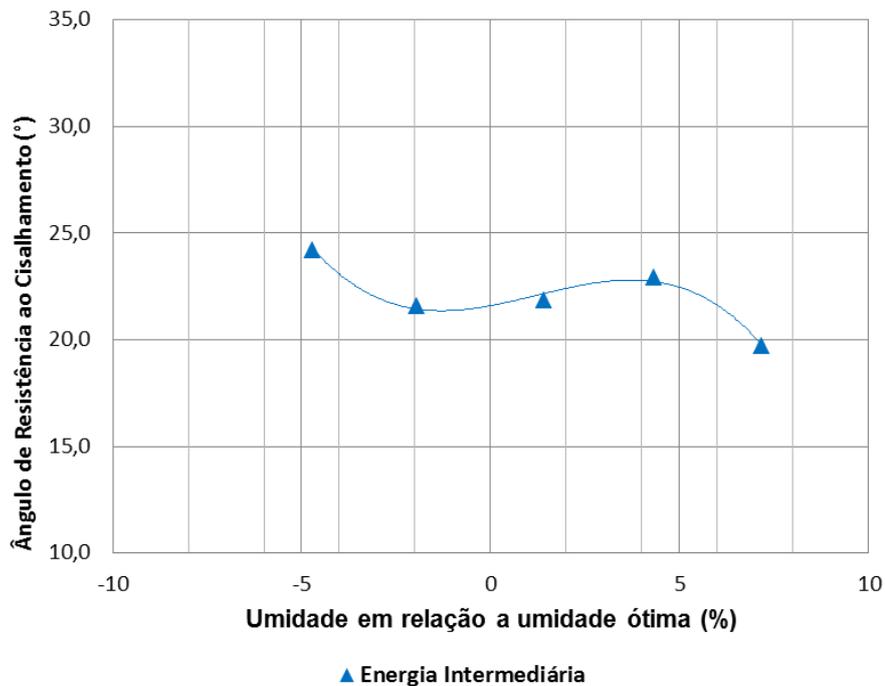


Figura 122: Ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Intermediária.

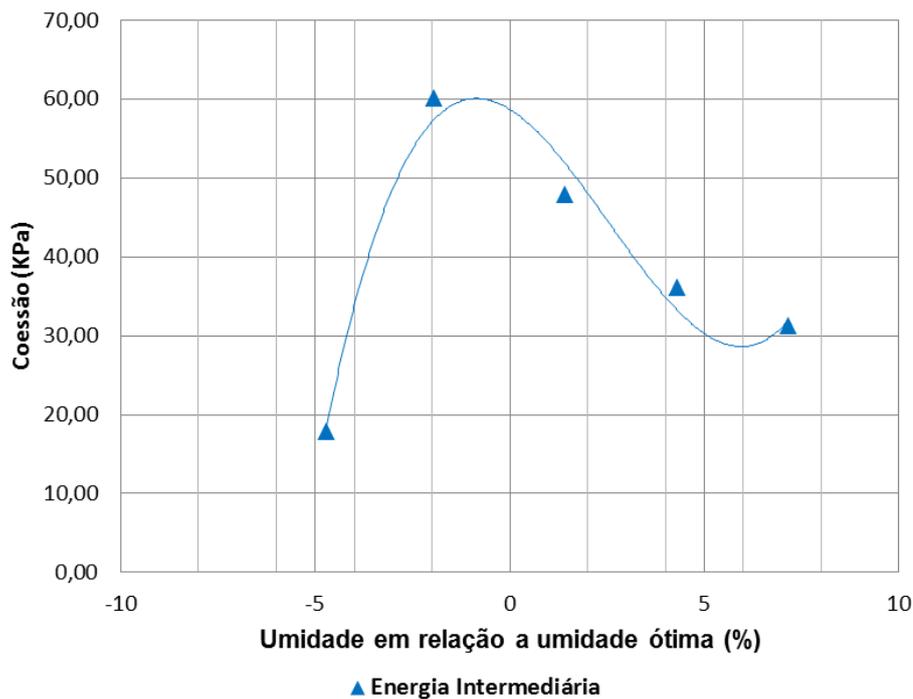


Figura 123: Coesão em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Intermediária.

A Tabela 30 mostra as características iniciais dos corpos de prova moldados na Energia do Proctor Modificada.

Tabela 30: Dados dos ensaios de cisalhamento direto para a Energia do Proctor Modificada.

Energia Modificada	Ensaio	σ_n (KPa)	γ_{nat} (KN/m ³)	γ_{do} (KN/m ³)	w_o (%)	e_o	w_f (%)
	P01		203	17,33	14,88	16,49	0,65
		297	17,26	14,82	16,49	0,65	28,26
		390	17,30	14,85	16,49	0,65	28,47
P02		203	18,13	15,25	18,89	0,61	21,79
		297	18,47	15,53	18,89	0,58	25,13
		390	18,37	15,45	18,89	0,59	-
P03		203	19,39	15,67	23,77	0,56	30,58
		297	19,36	15,64	23,77	0,57	29,12
		390	18,88	15,26	23,77	0,61	30,58
P04		203	18,60	14,85	25,28	0,65	25,72
		297	18,73	14,95	25,28	0,64	25,63
		390	18,65	14,88	25,28	0,65	-
P05		203	18,67	14,58	28,00	0,68	26,76
		297	18,52	14,47	28,00	0,69	-
		390	18,61	14,54	28,00	0,69	26,15

A Figura 123 apresenta as envoltórias de resistência para as amostras obtidas a partir de corpos de prova moldados na Energia do Proctor Modificada.

Pode-se observar que houve um aumento do ângulo das retas. Fato que fica evidenciado observando a Figura 124.

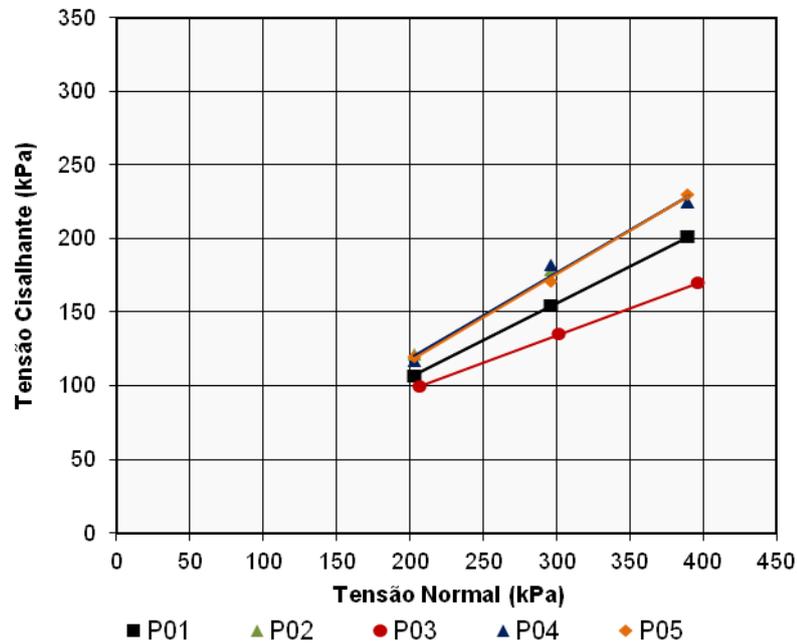


Figura 124: Envoltórias de resistência para os pontos moldados na Energia do Proctor Modificada.

A Figura 124 revela o comportamento do ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à variação do teor de umidade de moldagem onde se percebe uma semelhança com o comportamento da Energia do Proctor Normal. O valor máximo da coesão, em conformidade com os resultados das duas energias anteriores, foi máximo próximo ao valor de umidade ótima (Figura 125).

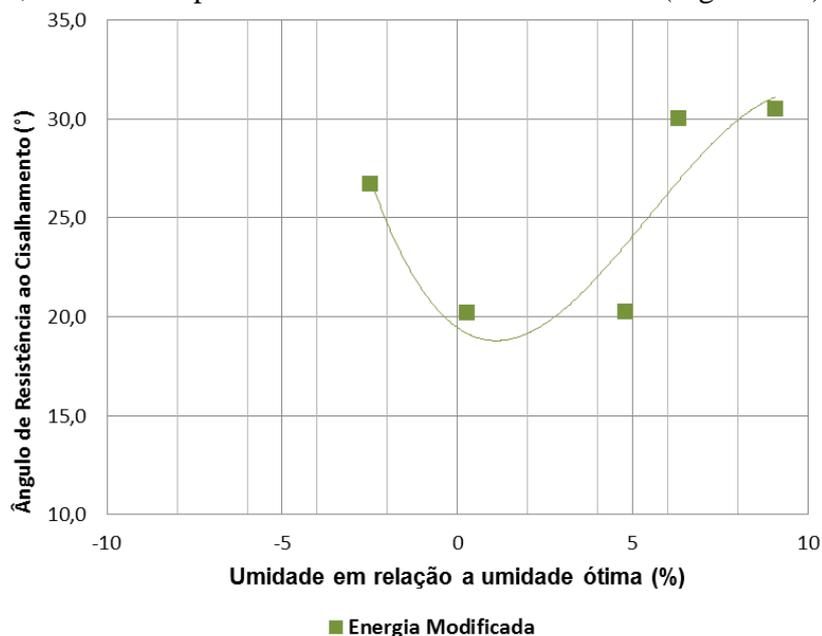


Figura 125: Ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Modificada.

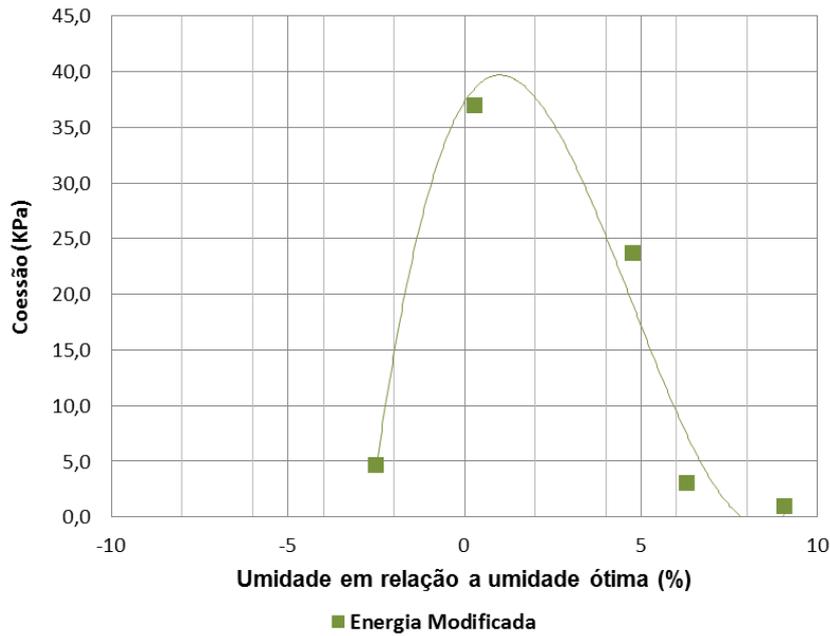


Figura 126: Coesão em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Modificada.

A Figura 126 reúne os dados referentes aos valores obtidos para a coesão do solo em relação ao teor de umidade de moldagem dos corpos de prova. Observa-se que há um comportamento semelhante para todas as energias de compactação.

Já a Figura 127 deixa mais clara a relação entre a coesão e o teor de umidade ótima, verifica-se que os maiores valores de coesão se encontram mais próximos ao valor de umidade ótima para todas as energias.

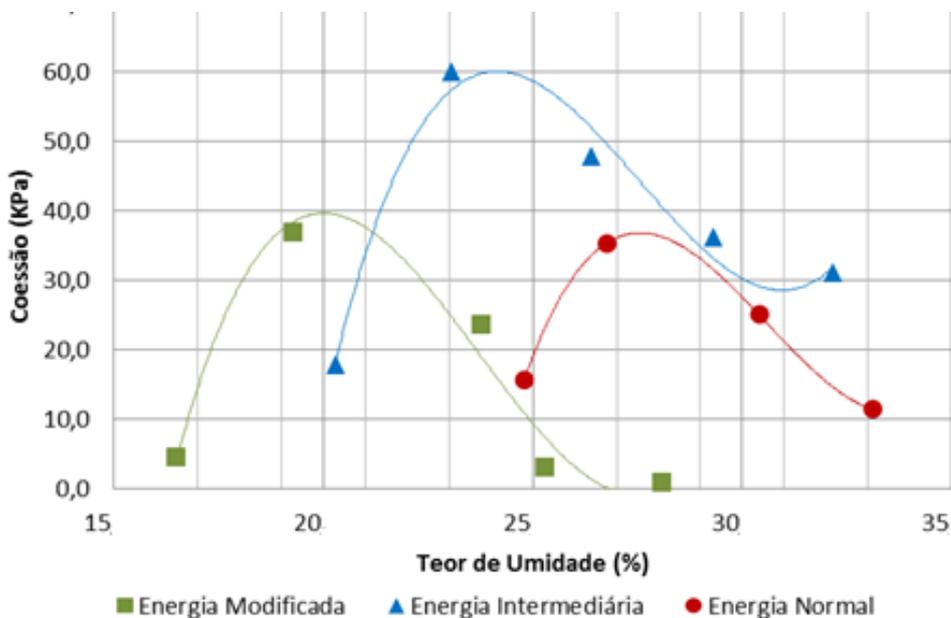


Figura 127: Relação entre a coesão e o teor de umidade, nas três energias de compactação.

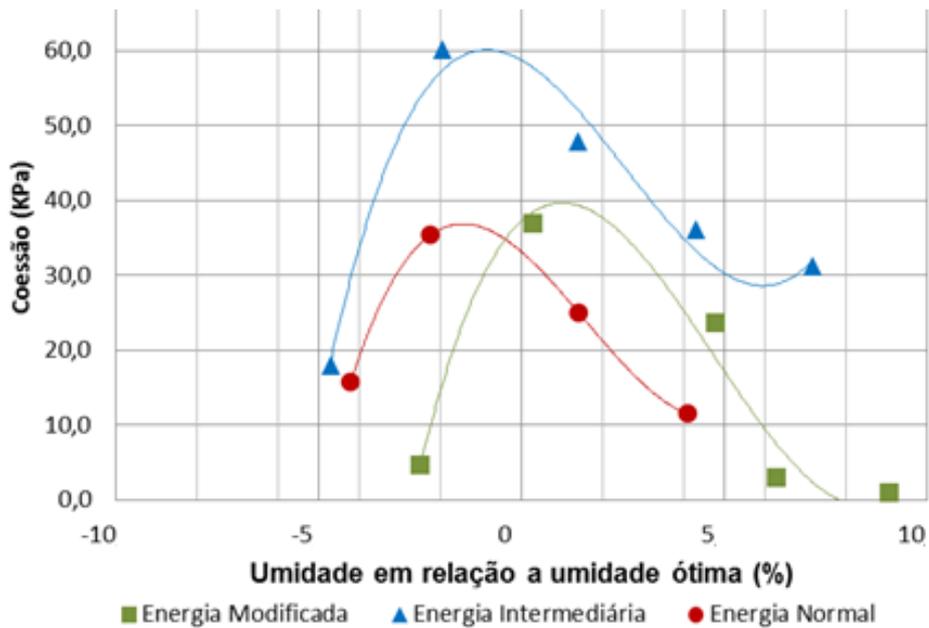


Figura 128: Relação entre a coesão e o teor de umidade ótimo, nas três energias de compactação.

Com relação ao ângulo de atrito tem-se um comportamento oposto ao da coesão, a Figura 128 apresenta esse comportamento onde se pode ver que os maiores valores estão nos opostos de umidade, ou seja, nos pontos de maior e menor umidade.

A Figura 129 mostra que os menores valores do ângulo de atrito se encontram próximos ao teor de umidade ótimo para cada energia de compactação, pontos de maior densidade do solo. Os valores ficaram entre 20,0 e 30,0°, considerando as três energias de compactação.

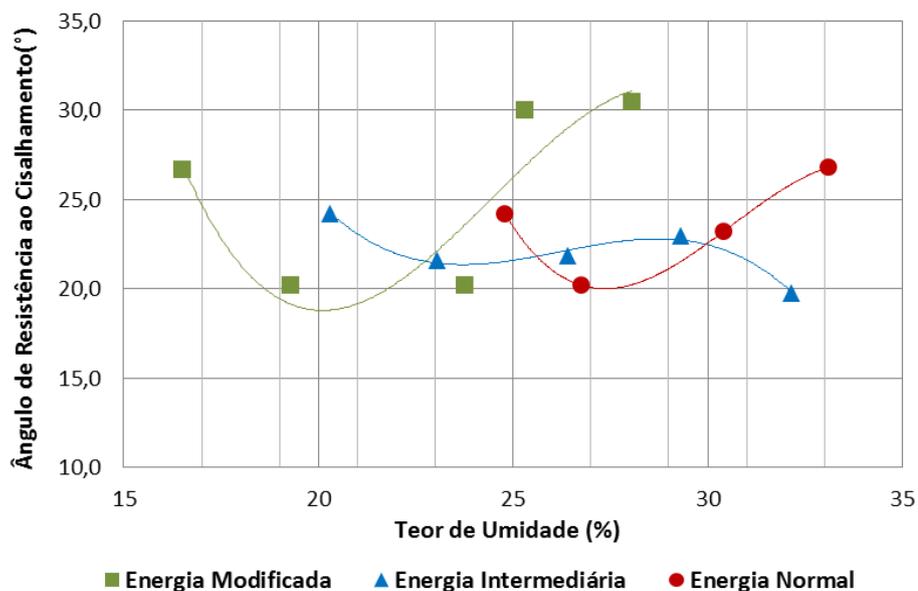


Figura 129: Relação entre o ângulo de resistência ao cisalhamento e o teor de umidade, nas três energias de compactação.

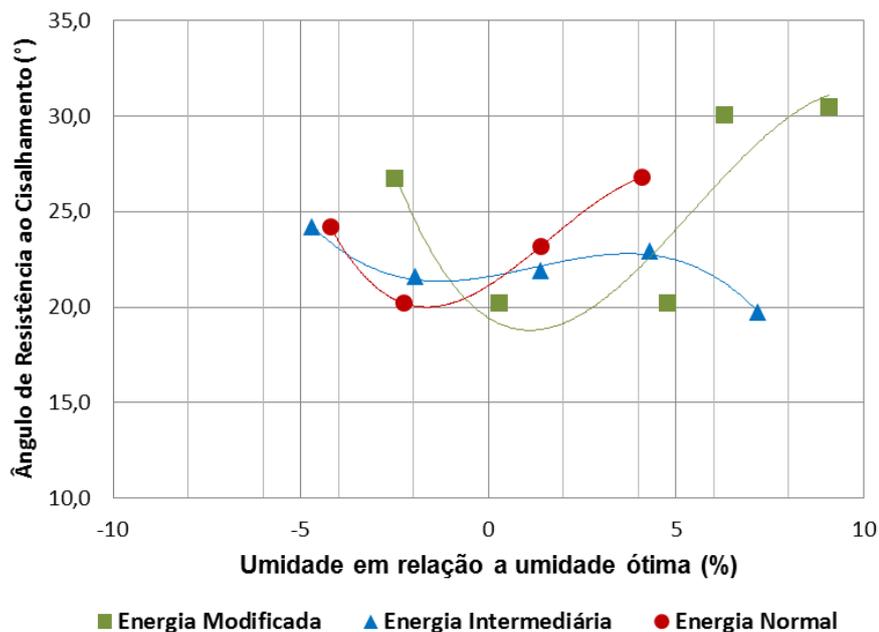


Figura 130: Relação entre o ângulo de resistência ao cisalhamento e o teor de umidade ótimo, nas três energias de compactação.

A Tabela 31 reúne todos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados.

Tabela 31: Resultados dos ensaios de cisalhamento para as energias do Proctor normal, intermediária e modificada.

Energia	Ensaio	Umidade de moldagem (%)	Ângulo de resistência ao cisalhamento máximo (Φ')	Coesão (c')
Normal	P01	24,79	24,2	15,70
	P02	26,76	20,2	35,40
	P03	30,40	23,2	25,09
	P04	33,10	26,8	11,50
Intermediária	P01	20,30	24,2	17,90
	P02	23,06	25,5	41,63
	P03	26,41	21,9	44,53
	P04	29,32	22,9	36,17
	P05	32,17	19,7	31,22
Modificada	P01	16,49	26,7	4,70
	P02	19,27	20,2	37,0
	P03	23,77	20,2	23,7
	P04	25,28	30,0	3,10
	P05	28,06	30,5	0

4.9.

DEFINIÇÃO DA ÁREA ADMISSÍVEL

No item 2.4.3 da revisão bibliográfica tratou-se das barreiras impermeáveis construídas com solo compactado, onde foram considerados os vários fatores que em conjunto devem ser atendidos para que o desempenho do *liner* seja satisfatório.

Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993) sugerem procedimentos para definir parâmetros de compactação para um determinado solo. Em resumo, os fatores são: condutividade inferior a $1,0 \times 10^{-9}$ m/s, contração volumétrica menor que 4,0 % e resistência à compressão simples maior que 200 KPa. A interseção de todos esses parâmetros indica as condições de compactação ideal para cada solo fornecendo as especificações de projeto da barreira impermeável.

Para este trabalho, como já visto, realizaram-se ensaios de condutividade hidráulica, contração, compressão simples, e por fim, com o objetivo de fornecer parâmetros para avaliar as condições de estabilidade dos taludes do aterro realizaram-se ensaios de cisalhamento direto.

A Figura 130 apresenta a área admissível considerando as condutividades hidráulicas menores que $1,0 \times 10^{-9}$ m/s, compreendidos pela área hachurada. A Figura 131 mostra a área com os valores admissíveis considerando a resistência à compressão simples do solo, tendo como valor mínimo 200 KPa.

Com relação à contração do solo os valores obtidos nos ensaios apresentaram valores de contração volumétrica acima do limite máximo de 4,0 %, portanto, neste parâmetro o solo não atendeu as especificações mínimas para ser utilizado como material de construção em barreiras minerais, considerando válida para este solo a correlação entre a contração volumétrica e o aparecimento de fissuras e trincas.

Na Figura 132 reúnem-se os dados de condutividade hidráulica e de resistência obtendo a área admissível considerando esses dois parâmetros.

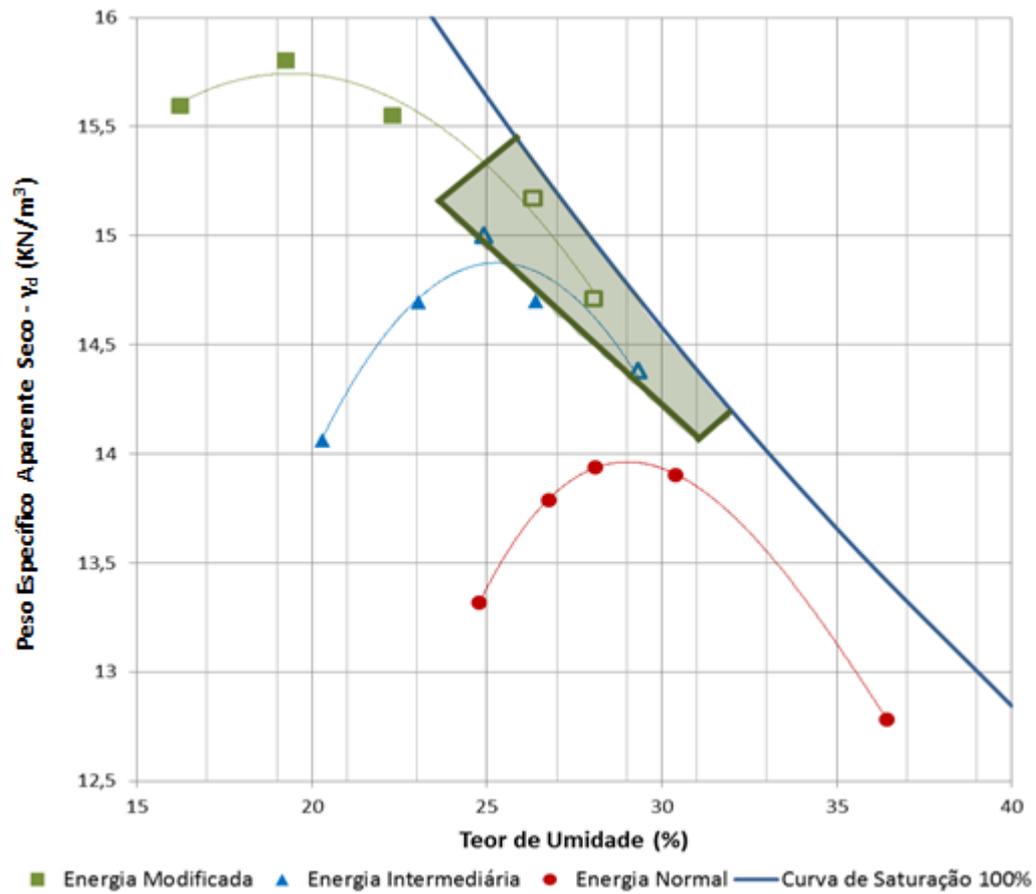


Figura 131: Área aceitável considerando a condutividade hidráulica, onde os símbolos abertos representam valores de $k \leq 10^{-9}$ m/s e símbolos fechados representam $k \geq 10^{-9}$ m/s.

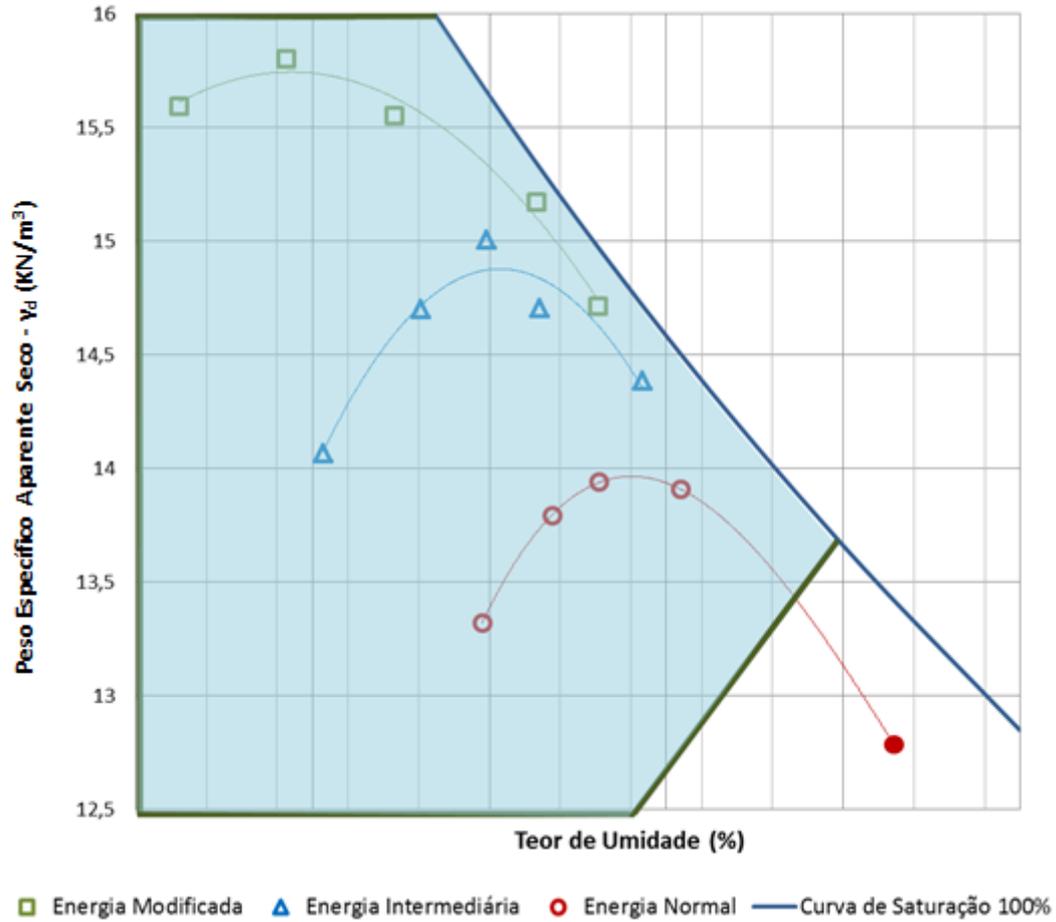


Figura 132: Área aceitável considerando a resistência, onde os símbolos abertos representam valores acima de 200 KPa e símbolos fechados representam valores abaixo de 200 KPa.

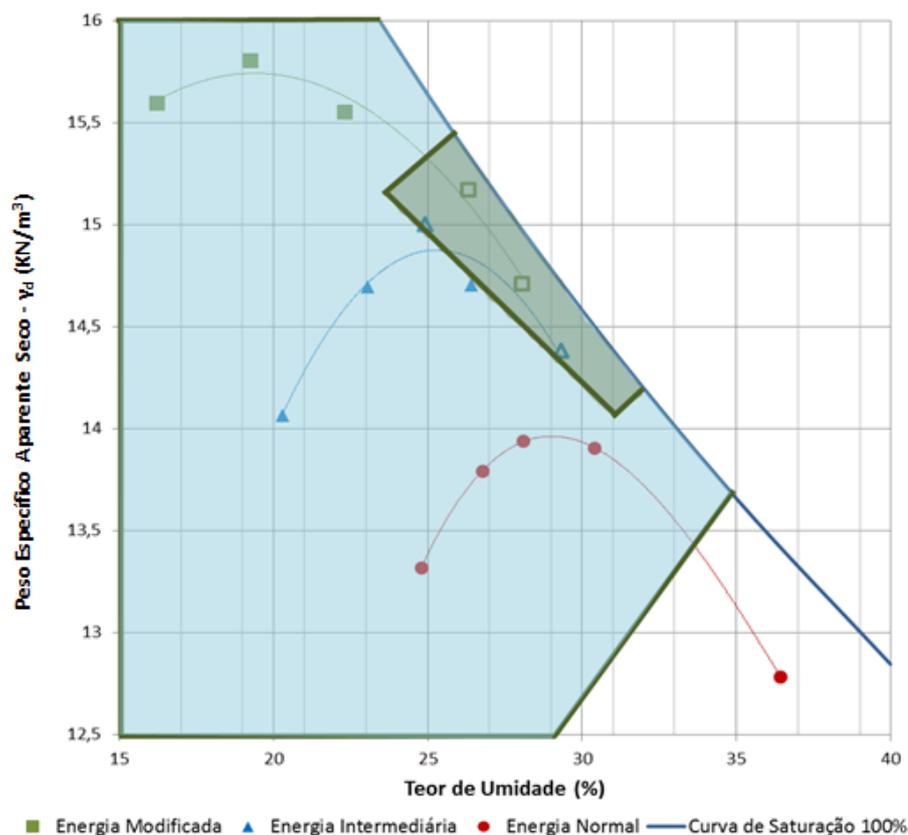


Figura 133: Área aceitável considerando os parâmetros de condutividade hidráulica e de resistência.

Tendo obtido os pontos que apresentam as características admissíveis, a Tabela 32 apresenta o resumo de suas características de moldagem e os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Tabela 32: Parâmetros dos pontos inseridos na zona admissível.

Energia	Amostra	Umidade de moldagem (%)	Peso Específico (KN/m ³)	Ângulo de resistência ao cisalhamento máximo (Φ')	Coesão (c')
Intermediária	P03	26,41	14,71	21,9	44,53
	P05	32,17	13,78	19,7	31,22
Modificada	P04	25,28	15,17	30,0	3,10
	P05	28,06	14,71	30,5	1,00