
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Centro de Ciências e Tecnologia
Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil

**Comportamento de Misturas entre
Solo e Bentonita para Uso em
Núcleos de Barragens de Terra**

ALCIDES FERREIRA MACHADO FILHO

Campina Grande
1999

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Centro de Ciências e Tecnologia
Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil

**Comportamento de Misturas entre
Solo e Bentonita para Uso em
Núcleos de Barragens de Terra**

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

ALCIDES FERREIRA MACHADO FILHO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração em Geotecnia

Orientador: Professor Doutor JOÃO BATISTA QUEIROZ DE CARVALHO
Co-orientador: Professor Doutor JOSÉ BERNARDES FELEX

Campina Grande
1999

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Alcides Ferreira Machado Filho

Título: Comportamento de misturas entre
solos e bentonita para uso em núcleos de
barragens de terra

Dissertação defendida e aprovada em 22/06/1999,
pela Comissão Julgadora:



Professor Doutor João Batista Queiroz de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba



Professor Titular Doutor José Bernardes Felex
Escola de Engenharia de São Carlos USP



Professor Doutor Raimundo Leidimar Bezerra
Universidade Federal da Paraíba



Professor Doutor John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal da Paraíba

Campina Grande
1999

Dedicatória

*À minha família:
A minha esposa Eulália,
e os filhos Patrícia e Joab.*

Agradecimentos

À Deus, por tudo

Ao Professor Orientador José Bernardes Felex, pelo estímulo e dedicação na elaboração deste trabalho ;

Ao Professor Orientador João Batista Queiroz de Carvalho pelas informações transmitidas durante a elaboração do trabalho;

Aos professores Raimundo Leidimar Bezerra, Francisco Edmar Brasileiro, Francisco Barbosa de Lucena, John Kennedy Guedes Rodrigues e em especial ao professor Ademilson Montes Ferreira, que iniciou este trabalho e participou de maneira efetiva até o final;

Aos Engenheiros e Técnicos dos Laboratórios de Solos I, II, e III do Departamento de Engenharia Civil, em especial aos colegas Rui e Sobreira pelo empenho na realização dos ensaios;

À ATECEL® pelo apoio, e a todos os seus integrantes que colaboraram na realização deste trabalho;

Aos colegas de trabalho da Área de Geotecnia, em especial aos amigos Joselito e Ádney;

Aos amigos Gilmar, Nolga, Luiz e Gabriel do Instituto de Química de São Carlos - USP

SUMÁRIO

1	<i>Introdução</i>	1
1.1	Barragens de terra	6
1.2	Núcleo de barragem de terra	7
1.3	Organização do trabalho	11
2	<i>Tópicos sobre materiais para núcleos de barragens de terra</i>	12
2.1	Sobre classificação de solos	12
2.2	Bentonitas	19
3	<i>Ensaaios em laboratório</i>	21
3.1	Ensaaios sobre solos e misturas entre solo e bentonita - amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã	24
3.2	Ensaaios sobre solos e misturas entre solo e bentonita - amostras provenientes de jazida do Shopping Center	30
4	<i>Previsão de informações sobre o comportamento de solos como material de construção em núcleos de barragens</i>	36
4.1	Comportamento de solos como material de construção em núcleos de barragens de terra	36
4.2	Aptidão de amostras de solos de jazidas provenientes da Barragem de Milhã para construção de núcleos em barragens de terra	38
4.3	Aptidão de amostras de solos de jazidas provenientes do Shopping Center para construção de núcleos em barragens de terra	39
4.4	Ensaaios e informações obtidas sobre comportamento de misturas entre solo e bentonita	40

5	<i>Conclusões e sugestões</i>	42
5.1	<i>Conclusões</i>	42
5.2	<i>Sugestões</i>	43
6	<i>Bibliografia</i>	44

ANEXO

1	<i>Resultados de ensaios sobre solos e misturas entre solo e bentonita – jazida da Barragem de Milhã</i>	1
2	<i>Resultados de ensaios sobre solos e misturas entre solo e bentonita – jazida do Shopping Center</i>	25

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Núcleo da barragem de Paulo Afonso (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982).</i>	1
<i>Figura 2 – Vista do Açude Público de Brumado, MINTER (1981).</i>	2
<i>Figura 3 - Vista do Açude Público A.R. Gonçalves, MINTER (1981).</i>	2
<i>Figura 4 – Aspecto de construção da Barragem de Milhã.</i>	3
<i>Figura 5 – Ampliação da Barragem de Tauá.</i>	3
<i>Figura 6 – Divisão política do Planalto da Borborema.</i>	4
<i>Figura 7 – Geografia física do Planalto da Borborema.</i>	5
<i>Figura 8 – Seção transversal da barragem de Sobradinho (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982)</i>	7
<i>Figura 9 - Sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) sobre fundações permeáveis rasas.</i>	8
<i>Figura 10 - Sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) sobre fundações permeáveis de média espessura.</i>	8
<i>Figura 11- Sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) sobre fundações permeáveis de grande espessura.</i>	9
<i>Figura 12 - Sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) sobre fundações estratificadas.</i> ..	9
<i>Figura 13 – Nomes para as frações de solos em função de tamanho de grãos [USDI-BR (1987)]</i>	13
<i>Figura 14 – Carta de plasticidade para classificação unificada de solos [USDI-BR (1987)].</i>	15
<i>Figura 15–Distribuição granulométrica de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	24
<i>Figura 16– Coeficientes de permeabilidade médios de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	26
<i>Figura 17 – Resistência à compressão simples média de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	27
<i>Figura 18 – Coesão de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	28

<i>Figura 19 – Ângulo de atrito de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 20 – Índices de expansão de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 21 – Distribuição granulométrica de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 22– Coeficientes de permeabilidade médios de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 23– Resistência à compressão simples média de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 24 – Coesão de solo natural e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 25 – Ângulo de atrito de solo natural e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 26 – Índices de expansão de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>35</i>

LISTA DE FIGURAS NO ANEXO

<i>Figura A 1 - Distribuição granulométrica de solos e misturas entre solo e bentonita sobre amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 2</i>
<i>Figura A 2 - Resistência à compressão simples de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 5</i>
<i>Figura A 3 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos proveniente de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.</i>	<i>A 6</i>
<i>Figura A 4 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.</i>	<i>A-6</i>
<i>Figura A 5 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos proveniente de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.</i>	<i>A 7</i>
<i>Figura A 6 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.</i>	<i>A 7</i>
<i>Figura A 7 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.</i>	<i>A 8</i>
<i>Figura A 8 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.</i>	<i>A 8</i>
<i>Figura A 9 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.....</i>	<i>A 9</i>
<i>Figura A 10 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.....</i>	<i>A 9</i>
<i>Figura A 11 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.....</i>	<i>A 10</i>
<i>Figura A 12 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.....</i>	<i>A 10</i>
<i>Figura A 13 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.....</i>	<i>A 11</i>

<i>Figura A 14 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.....</i>	<i>A 11</i>
<i>Figura A 15 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.....</i>	<i>A 12</i>
<i>Figura A 16 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.....</i>	<i>A 12</i>
<i>Figura A 17 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.....</i>	<i>A 13</i>
<i>Figura A 18 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.....</i>	<i>A 13</i>
<i>Figura A 19 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.....</i>	<i>A 14</i>
<i>Figura A 20 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.....</i>	<i>A 14</i>
<i>Figura A 21 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.....</i>	<i>A 15</i>
<i>Figura A 22 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.....</i>	<i>A 15</i>
<i>Figura A 23 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.....</i>	<i>A 16</i>
<i>Figura A 24 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.....</i>	<i>A 16</i>
<i>Figura A 25 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.....</i>	<i>A 17</i>
<i>Figura A 26 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.....</i>	<i>A 17</i>
<i>Figura A 27 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.....</i>	<i>A 18</i>
<i>Figura A 28 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.....</i>	<i>A 18</i>
<i>Figura A 29 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.....</i>	<i>A 19</i>
<i>Figura A 30 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.....</i>	<i>A 19</i>
<i>Figura A 31 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.....</i>	<i>A 20</i>
<i>Figura A 32 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.....</i>	<i>A 20</i>

<i>Figura A 33 – Coeficientes de permeabilidade (10^{-6} cm/s) em função de teor de bentonita nas misturas entre solo e bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem Milhã.....</i>	<i>A 22</i>
<i>Figura A 34 – Índice de expansão em função do tempo para misturas com 0% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.....</i>	<i>A 22</i>
<i>Figura A 35 – Índice de expansão em função do tempo para misturas com 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.....</i>	<i>A 23</i>
<i>Figura A 36 – Índice de expansão em função do tempo para misturas com 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.....</i>	<i>A 23</i>
<i>Figura A 37 – Índice de expansão em função do tempo para misturas com 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.....</i>	<i>A 24</i>
<i>Figura A 38 – Índice de expansão em função do tempo para misturas com 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.....</i>	<i>A 24</i>
<i>Figura A 39 – Distribuição granulométrica de solos e misturas entre solo e bentonita sobre amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 26</i>
<i>Figura A 40 – Resistência à compressão simples de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 29</i>
<i>Figura A 41 – Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.....</i>	<i>A 30</i>
<i>Figura A 42 – Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.....</i>	<i>A 30</i>
<i>Figura A 43 – Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.....</i>	<i>A 31</i>
<i>Figura A 44 – Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.....</i>	<i>A 31</i>
<i>Figura A 45 – Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.....</i>	<i>A 32</i>
<i>Figura A 46 – Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.....</i>	<i>A 32</i>
<i>Figura A 47 – Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.....</i>	<i>A 33</i>
<i>Figura A 48 – Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.....</i>	<i>A 33</i>
<i>Figura A 49 – Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.....</i>	<i>A 34</i>
<i>Figura A 50 – Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.....</i>	<i>A 34</i>
<i>Figura A 51 – Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.....</i>	<i>A 35</i>

<i>Figura A 52 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.</i>	<i>A 35</i>
<i>Figura A 53 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.</i>	<i>A 36</i>
<i>Figura A 54 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.</i>	<i>A 36</i>
<i>Figura A 55 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.</i>	<i>A 37</i>
<i>Figura A 56 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.</i>	<i>A 37</i>
<i>Figura A 57 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.</i>	<i>A 38</i>
<i>Figura A 58 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.</i>	<i>A 38</i>
<i>Figura A 59 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.</i>	<i>A 39</i>
<i>Figura A 60 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.</i>	<i>A 39</i>
<i>Figura A 61 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.</i>	<i>A 40</i>
<i>Figura A 62 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.</i>	<i>A 40</i>
<i>Figura A 63 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.</i>	<i>A 41</i>
<i>Figura A 64 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.</i>	<i>A 41</i>
<i>Figura A 65 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.</i>	<i>A 42</i>
<i>Figura A 66 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.</i>	<i>A 42</i>
<i>Figura A 67 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.</i>	<i>A 43</i>
<i>Figura A 68 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.</i>	<i>A 43</i>
<i>Figura A 69 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.</i>	<i>A 44</i>
<i>Figura A 70 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.</i>	<i>A 44</i>

<i>Figura A 71 - Coeficientes de permeabilidade (10^6 cm/s) de solos e misturas entre solo e bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 46</i>
<i>Figura A 72 - Índice de expansão em função do tempo, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>A 46</i>
<i>Figura A 73 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 47</i>
<i>Figura A 74 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 47</i>
<i>Figura A 75 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 48</i>
<i>Figura A 76 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 48</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Sobre bibliografia e materiais em núcleos de barragens.</i>	10
<i>Tabela 2 – Roteiro para obtenção da classificação unificada de solos [USDI-BR (1987)].</i>	16
<i>Tabela 3 – Aptidão de tipos de solo conforme a classificação unificada ao uso em núcleo de barragens [LAMBE & WITHMAM (1972)].</i>	17
<i>Tabela 4 – Descrição de solos usados em núcleos de algumas grandes barragens brasileiras segundo a classificação unificada (USCS) (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982).</i>	19
<i>Tabela 5 – Métodos para ensaios em laboratório executados sobre os solos e misturas entre solo e bentonita.</i>	22
<i>Tabela 6 – Granulometria de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	24
<i>Tabela 7 - Limites de liquidez e limites de plasticidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	25
<i>Tabela 8 - Coeficientes de permeabilidade médios de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	25
<i>Tabela 9 - Resistência à compressão simples média de solo natural e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	26
<i>Tabela 10 - Resistência ao cisalhamento de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	27
<i>Tabela 11 – Índices de expansão de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	29
<i>Tabela 12 – Distribuição granulométrica de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	30
<i>Tabela 13 - Limites de liquidez e limites de plasticidade de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	31
<i>Tabela 14 - Média de coeficientes de permeabilidade em ensaios de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	31
<i>Tabela 15 – Médias de resistência à compressão simples de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	32
<i>Tabela 16 - Resistência ao cisalhamento de solos e misturas entre solo e bentonita – jazida do Shopping Center.</i>	33

<i>Tabela 17 – Índices de expansão médios de amostras de jazida do Shopping Center .</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 18 - Aptidão de amostras de solos de jazidas provenientes da Barragem de Milhã para construção de núcleos em barragens de terra.</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 19 - Aptidão de amostras de solos de jazidas provenientes do Shopping Center para construção de núcleos em barragens de terra.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 20 – Tendências e informações observáveis em coeficientes de permeabilidade e índices de expansão de misturas entre solo e bentonita.</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 21 – Tendências e informações observáveis em resistência à compressão simples, coesão e ângulo de atrito de misturas entre solo e bentonita.</i>	<i>41</i>

LISTA DE TABELAS NO ANEXO

<i>Tabela A 1 - Resultados obtidos de granulometria de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 1</i>
<i>Tabela A 2 - Limites de liquidez e limites de plasticidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 2</i>
<i>Tabela A 3 - Resistência à compressão simples de solos, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 3</i>
<i>Tabela A 4 - Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 3</i>
<i>Tabela A 5 - Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 4</i>
<i>Tabela A 6 - Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 4</i>
<i>Tabela A 7 - Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 5</i>
<i>Tabela A 8 - Resultados de ensaios de permeabilidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.</i>	<i>A 21</i>
<i>Tabela A 9 - Resultados obtidos de granulometria de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>A 25</i>
<i>Tabela A 10 - Limites de liquidez e limites de plasticidade de solos e misturas entre solo e bentonita sobre amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>A 26</i>
<i>Tabela A 11 - Resistência à compressão simples para solos de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>A 27</i>
<i>Tabela A 12 - Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>A 27</i>
<i>Tabela A 13 - Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.</i>	<i>A 28</i>

<i>Tabela A 14 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 28</i>
<i>Tabela A 15 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 29</i>
<i>Tabela A 16 - Coeficientes de permeabilidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.....</i>	<i>A 45</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BR	Bureau of Reclamation
CEMIG	Centrais Elétricas de Minas Gerais
CESP	Companhia Energética de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ELETROSUL	Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A
FURNAS	Centrais Elétricas de Furnas S.A
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MG	Minas Gerais
MINTER	Ministério do Interior
NBR	Norma Brasileira Registrada
NE	Nordeste
PR	Paraná
SO	Sudoeste
USCS	Unified Soils Classification System
USDI	United States Department of Transportation
Cc	Coeficiente de curvatura de solos
Cu	Coeficiente de uniformidade de solos

RESUMO

MACHADO FILHO, ALCIDES FERREIRA (1999). *Comportamento de misturas entre solo e bentonita para uso em núcleos de barragens de terra*, Campina Grande, 1999, 103p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal da Paraíba.

Relatam-se resultados obtidos em uma pesquisa visando mostrar que o estudo de misturas entre solos arenosos e argila montmorilonítica (bentonita) pode identificar informações e processos que contribuam para orientar a escolha de materiais para construção de núcleos em barragens de terra. Foram analisados dois tipos de solos provenientes de região do Nordeste do Brasil conhecida como o Planalto da Borborema. Solos e misturas entre solo e bentonitas foram submetidos a ensaios em laboratório. Os dados obtidos permitiram classificar os solos e misturas usando a Classificação Unificada de Solos (Unified Soils Classification System) e identificar propriedades de misturas entre solo e bentonita que contribuiriam para a previsão de comportamento como material de construção em núcleos de barragens de terra.

Palavras-chave: solos, barragens de terra, núcleos de barragens

ABSTRACT

MACHADO FILHO, ALCIDES FERREIRA (1999). *The behavior of soils and soil mixes to bentonita in earthfill core dams*, Campina Grande, 1999, 103p. Master Thesis – Universidade Federal da Paraíba, Brazil.

It was reported some results obtained from a research to show that mixing soil with montmorilonitic clays (bentonita) should contribute to identify information and process to choose materials of construction to earthfill core dams. It was analyzed two types of soils from a northeast region of Brazil called the "Planalto da Borborema". Plain soil and their mixes with bentonita were tested in laboratory. The obtained data were useful to classify soil and their mixes using the Unified Soil Classification System and to identify properties from those material and mixes that should contribute to foresight their behavior as materials of construction to earthfill core dams.

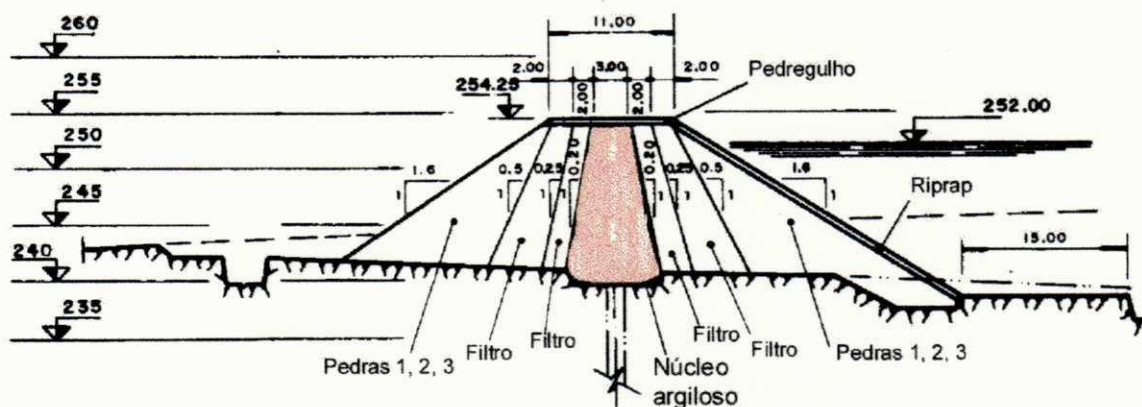
Keywords: soils, earthfill dam, core dam

1 INTRODUÇÃO

Açude é aqui definido como o conjunto de construções e equipamentos destinados a represar a água de rios ou riachos para uso na indústria, agricultura ou abastecimento de povoações, ou, também designa o próprio volume de água represada, em geral para irrigação de culturas em regiões sujeitas a secas.

Barragem é o principal obstáculo para represar a água de um rio ou de um riacho para uso na indústria, agricultura ou abastecimento em um açude. Pode ser construída de agregados, concreto ou solos. *Barragem de terra* é aquela cujo maciço tem como principal material de construção solos e suas misturas aos agregados.

Núcleo de barragem de terra é aqui entendido como a parcela da seção transversal do maciço construído com uso de solos ou assemelhados relativamente impermeáveis entre camadas de materiais permeáveis. A Figura 1 ilustra o núcleo da Barragem de Paulo Afonso.



**Figura 1 – Núcleo da barragem de Paulo Afonso
(COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982).**

O objetivo principal desse trabalho é relatar resultados obtidos durante as atividades de uma tentativa para mostrar que o estudo de misturas entre solos arenosos e argila montmorilonítica (bentonita) pode para orientar a escolha de materiais para construção de núcleos em barragens de terra, em particular misturas entre solo e bentonita.

Para exemplos, informa-se que os açudes públicos de Brumado [MINTER (1981), Figura 2] e A.R. Gonçalves [MINTER (1981), Figura 3], Milhã (Puxinanã, estado da Paraíba, Figura 4), Tauá (Guarabira, estado da Paraíba, Figura 5) têm maciços construídos usando solos como material de construção.

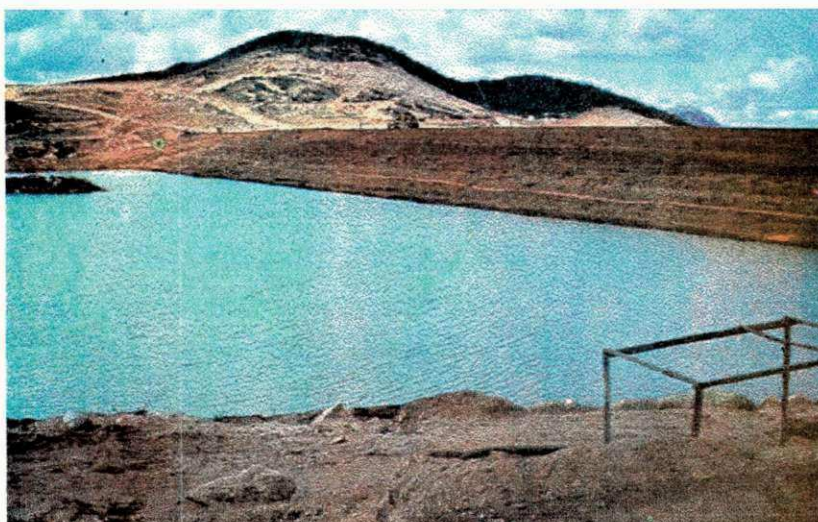


Figura 2 – Vista do Açude Público de Brumado, MINTER (1981).

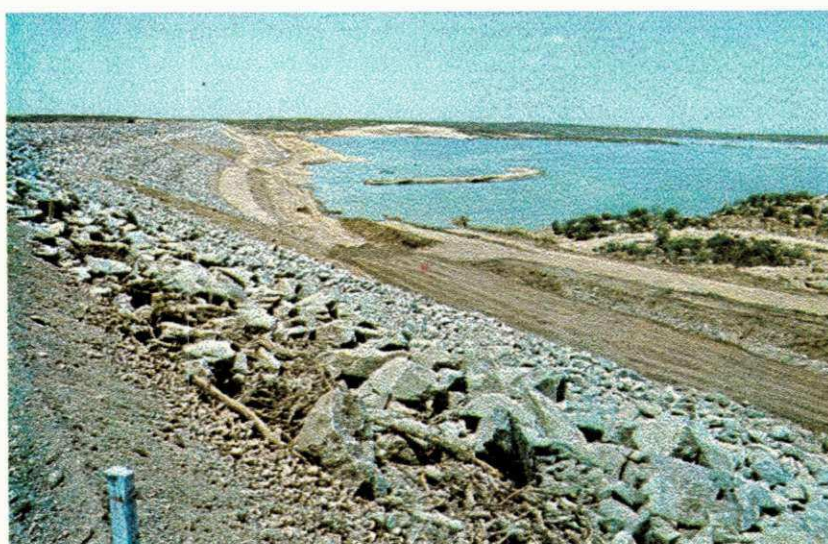


Figura 3 - Vista do Açude Público A.R. Gonçalves, MINTER (1981).

Os núcleos de barragem de terra são construídos para interceptar, diminuir ou impedir o fluxo de água pelo maciço ou suas fundações. Mas, também participam da estrutura do corpo do maciço como componente de estabilidade e equilíbrio interno ou externo.



Figura 4 – Aspecto de construção da Barragem de Milhã.



Figura 5 – Ampliação da Barragem de Tauá.

A escolha dos solos do Planalto da Borborema para o estudo proposto se justifica:

- a) pelas necessidades específicas daquela região quanto a obtenção de materiais para construção de barragens de terra;
- b) porque grande parcela da região tem um índice de chuvas por ano menor que 450mm de altura, levando à demanda por grande número de açudes para armazenar água;
- c) e, no Planalto da Borborema grande parcela dos materiais de construção disponíveis para barragens são constituídos de solos arenosos;
- d) também, porque há a dificuldade em se encontrar argilas e materiais similares para uso em construções na região.

Na INTERNET pode-se obter informações sobre o Planalto da Borborema, seu regime de chuvas, geologia, etc., em (abril 1999), por exemplo:

- a) <http://www.aneel.gov.br/cgrh/atlas/b3geom.htm>;
- b) ou, <http://200.10.250.34/eswww/fulltext/recuhydr>.

A Figura 6 ilustra a geopolítica da região. A Figura 7 é mapa geográfico-físico, e de localização de ocorrências geológicas, do Planalto da Borborema.



Figura 6 – Divisão política do Planalto da Borborema.

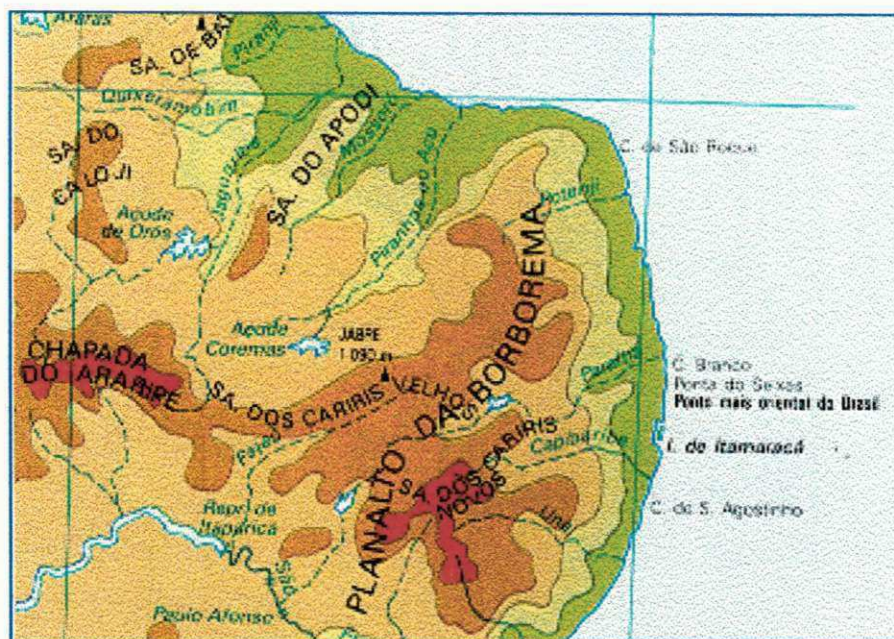


Figura 7 – Geografia física do Planalto da Borborema.

O Planalto da Borborema tem grandes estruturas geológicas do escudo cristalino e bacias sedimentares.

O Planalto da Borborema é circundado pela Depressão Sertaneja, exceto a sudoeste onde contata o Planalto Sertanejo. Tem forma aproximada de um triângulo com vértice voltado para o norte. Possui dois níveis distintos. O mais baixo, em torno de 450m, está entre o centro e bordo leste deste planalto.

Ao sul de Campina Grande, estendendo-se até o vale do Capibaribe no Estado de Pernambuco, as altitudes variam de cerca de 400m e alcançam cotas próximas a 800m, com a superfície inclinada de modo suave para leste, a área se evidencia bastante dissecada em formas de colinas intercaladas por vales encaixados.

Em alguns locais, particularmente em trechos que bordejam o rio Capibaribe, as colinas apresentam-se desnudas como encostas abruptas com afloramento de rochas.

Ao norte da cidade de Campina Grande (PB), a morfologia ainda é intensamente dissecada. Verifica-se a ocorrência de alinhamentos de cristas inseridas nas

colinas ao lado de espigões que se projetam para leste. Observam-se também restos de superfície conservada com topos planos limitados por escarpas, e capeados por rochas sedimentares da Formação Serra dos Martins.

Ainda, destaca-se o conjunto constituído pela Serra da Formiga e Serra do Feiticeiro. Trata-se de uma área morfológicamente caracterizada por alinhamentos de cristas de altitudes em torno de 500m, que limitam depressões fechadas cujas cotas não ultrapassam os 350m. As cristas dispõem-se em formas retilínea e semicircular, direção preferencial SO-NE.

O Planalto da Borborema é importante para a dispersão da drenagem no Nordeste Brasileiro. Daí partem vários rios, e a maior parte deles têm cabeceira no bordo do Planalto. Correm encaixados, rápidos e em corredeiras até às áreas baixas. Outros nascem na porção central do Planalto, destacando-se os rios Paraíba e Pajeú, em Pernambuco.

1.1 Barragens de terra

As barragens de terra (USDI-BR, 1987) são os tipos mais comuns entre os maciços usados para conter água, porque:

- a) os materiais de construção podem vir de escavações próximas à obra;
- b) os requisitos para as fundações e as exigências sobre a topografia são menos restritivas que para outros tipos de barragem;
- c) o número de locais para construir barragens de concreto vêm diminuindo porque a geometria de locais para construir barragens com concreto é específica;
- d) particularmente, isso é verdade para regiões áridas e semi-áridas.

As barragens de terra podem ser classificadas em:

- a) *homogêneas*, quando construídas a partir de um único tipo de solo;
- b) *mistas*, quando construídas a partir de diversos tipos de materiais, tais como solos, agregados, concreto, blocos de pedras;

c) *zoneadas*, quando construídas com uso de solos e possuírem uma parcela da seção transversal relativamente impermeável entre camadas de materiais permeáveis.

A Figura 8 ilustra a seção transversal da Barragem de Sobradinho (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982).

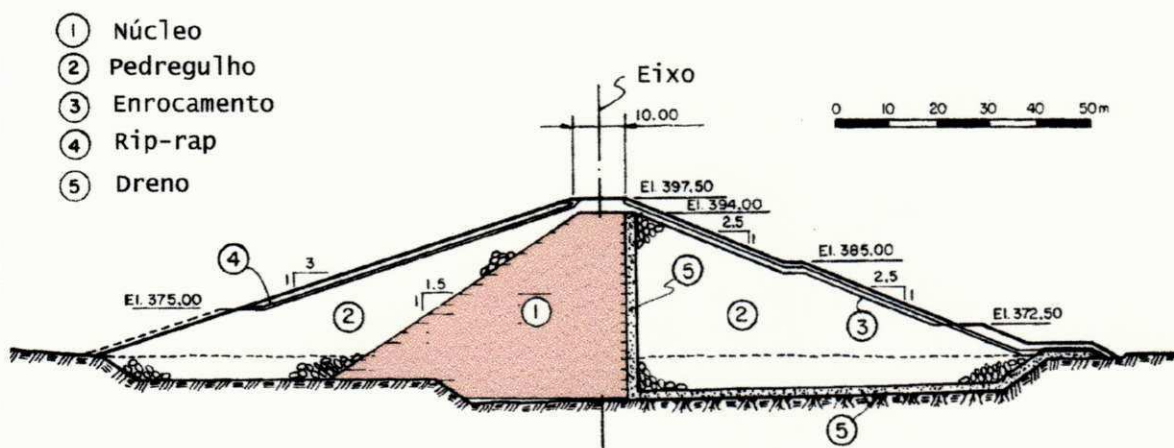


Figura 8 – Seção transversal da barragem de Sobradinho (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982) .

1.2 Núcleo de barragem de terra

Segundo o (USDI-BR, 1987, página 193) dentre os critérios que governam os projeto de barragens estão: “a percolação de água pelo maciço e fundações deve ser controlada para evitar a ocorrência de pressões neutras, carreamento de materiais, erosão, remoção, dispersão e amolecimento de materiais. Também deve-se controlar o volume de água perdido por percolação.

A Figura 9 ilustra sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) para as hipóteses associadas a fundações permeáveis rasas (menores que 1m).

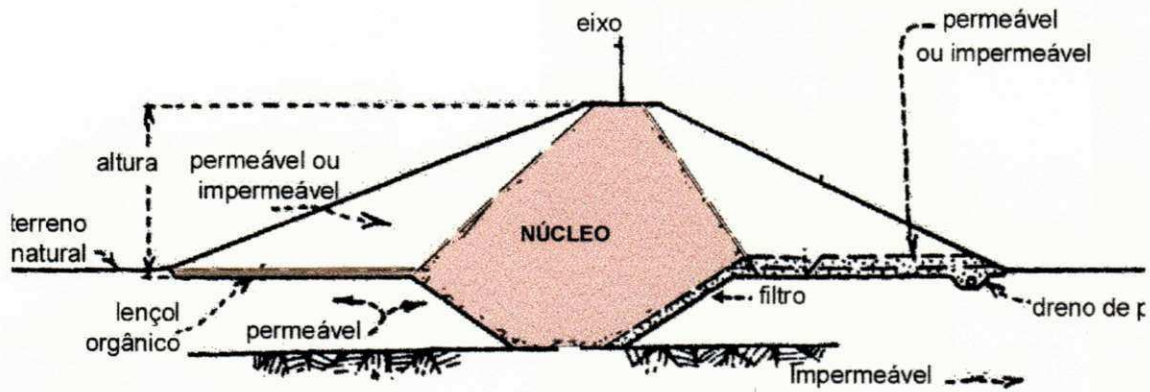


Figura 9 - Sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) sobre fundações permeáveis rasas.

A Figura 10 ilustra sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) para as hipóteses associadas a fundações permeáveis de média espessura (em torno de 1m).

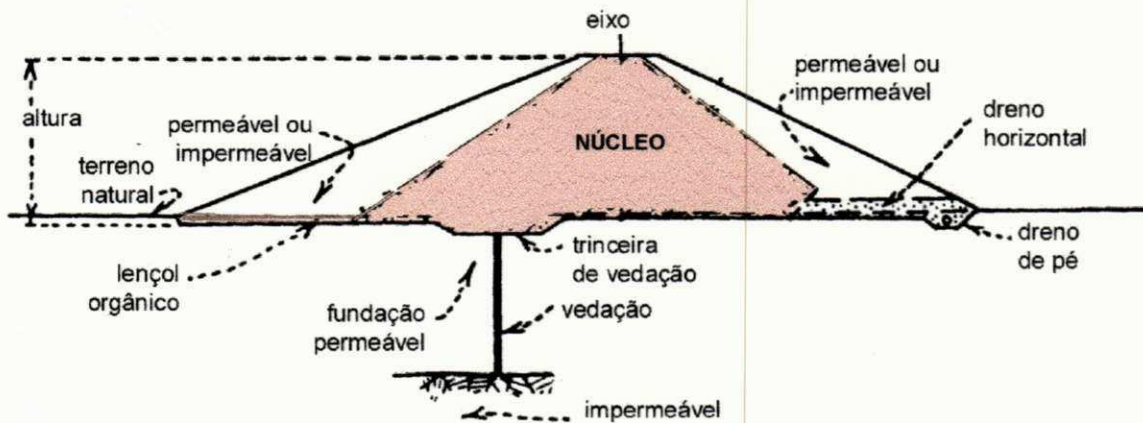


Figura 10 - Sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) sobre fundações permeáveis de média espessura.

A Figura 11 ilustra sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) para as hipóteses associadas a fundações permeáveis de grande espessura.

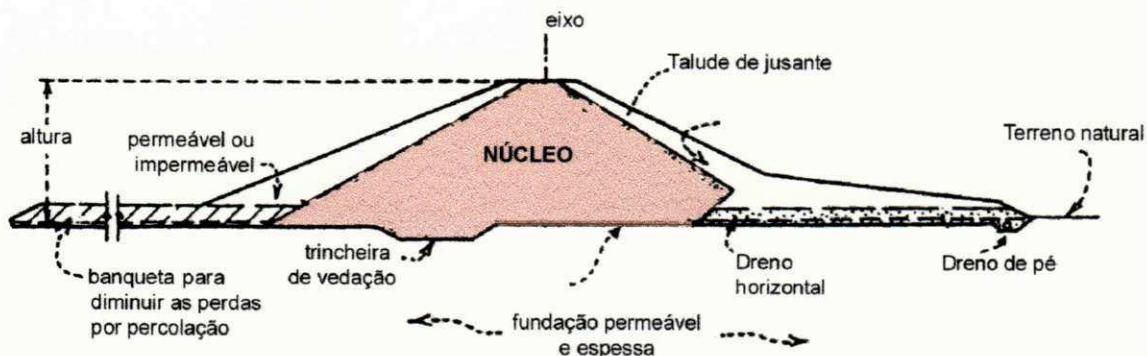


Figura 11- Sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) sobre fundações permeáveis de grande espessura.

A Figura 12 ilustra sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) para as hipóteses associadas a fundações estratificadas.

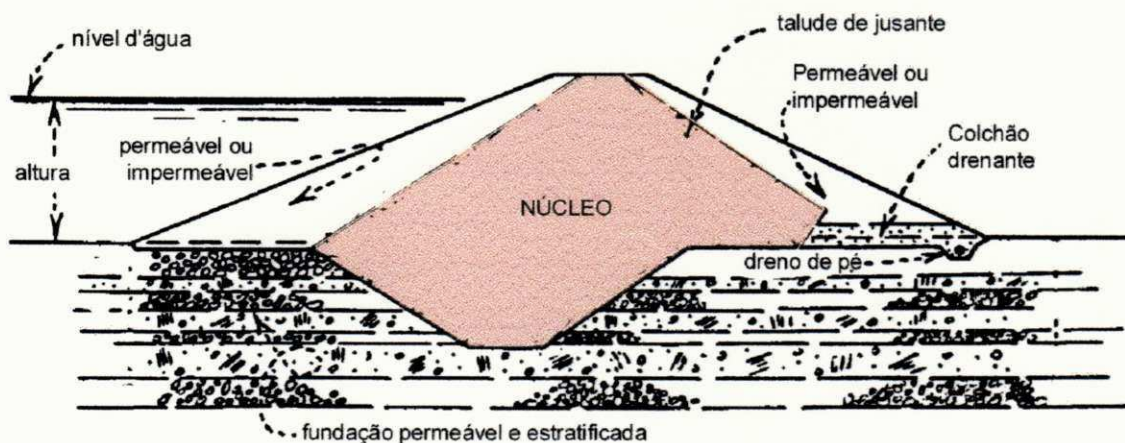


Figura 12 - Sugestões para seções de barragens de terra (USDI-BR, 1987) sobre fundações estratificadas.

A Tabela 1 resume alguns resultados de pesquisa sobre bibliografia e conclusões de estudo sobre orientações da escolha de tipo de solo para uso em núcleos de barragens.

Tabela 1 – Sobre bibliografia e materiais em núcleos de barragens.

Periódico ou livro clássico	Descrição	Conclusões de pesquisa
Journal of the Geotechnical Division of ASCE, período 1987 até 1998	O principal periódico da ASCE relacionado ao estudo de solos e usos	Um total de seis artigos genéricos, e sem aplicação direta na escolha de materiais para construir núcleos
Caderno de Grandes Barragens do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens e Revista Brasileira de Engenharia, período 1986 a 1992	Principal periódico brasileiro sobre barragens	Os 54 artigos dessa revista não se referem a núcleos de barragens
Main Brazilian Dams, Design and Construction (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982)	Resume dados de projeto, construção e manutenção das principais barragens brasileiras	Citaram-se alguns dados sobre solos usados em núcleos de barragens no Brasil
Design of Small Dams (USDI-BR, 1987)	Um dos principais livros para orientação durante projeto de barragens	As discussões relatadas indicam caminhos para estudos sobre percolação
LAMBE & WITHMAM (1972)	Um dos livros clássicos sobre Mecânica dos Solos	Contém discussões sobre relações entre a Classificação Unificada de Solos (USCS)
SHERARD et alii (1963)	Um dos principais livros para orientação durante projeto de barragens	Discute formas geométricas e outros sobre núcleo. Bons comentários sobre controle de qualidade de construção.
MARSHAL & NUÑEZ (editores) (1975)	A coletânea mais clássica de artigos sobre barragens de terra	Os 27 capítulos ou artigos não contêm discussões sobre escolha de materiais para construção de núcleos

As decisões sobre uso de tipos de solos na construção de núcleos de barragens de terra são relativamente pouco discutidas em artigos ou livros porque há uma grande diversidade de condições de contorno que orientam a escolha de materiais para construir núcleos: tipo de materiais disponíveis, volumes de solos a utilizar, relações entre os tipos de solos que orientem o controle da percolação de água; a própria percolação de água, as condições de fundação e etc.

1.3 Organização do trabalho

Além da presente introdução, o relato se constitui de:

- a) Capítulo 2, onde são expostos tópicos sobre a classificação de solos, a principal base teórica usada nesse trabalho, e expostos itens de descrição da bentonita;
- b) Capítulo 3, onde relata-se o processo de ensaios em laboratório, informando sobre os métodos e critérios usados. São expostos também tabelas e figuras que refletem as sínteses sobre dados obtidos em laboratório;
- c) ~~Capítulo 4, onde relatam-se métodos, tópicos e resultados de análise~~ sobre propriedades características de solos e misturas de solos com bentonita. Propõe-se um processo para estimativa do grau de aptidão para previsão de comportamento de solos ou misturas como material de construção;
- d) Em anexo encontram-se os resultados de ensaios que forneceram dados para a execução do presente trabalho.

2 TÓPICOS SOBRE MATERIAIS PARA NÚCLEOS DE BARRAGENS DE TERRA

2.1 Sobre classificação de solos

Para usos na construção, os *solos* são assimilados como produtos de agrupamento de partículas sólidas obtidas por desintegração física ou química de rochas. Para engenheiros envolvidos em construção de barragens é primordial o conhecimento de propriedades físicas de solos, como a massa específica, a resistência ao cisalhamento, o coeficiente de permeabilidade, a compressibilidade e suas relações com a água.

Conhecer e identificar objetos pelos seus atributos é *classificar*. Para classificar é necessário identificar ou medir atributos do sujeito analisado.

A identificação e classificação de solos usando “categorias” ou “grupos” de ocorrências de propriedades é uma atividade que poderia gerar interessantes produtos para orientar o trabalho de engenheiros. Também contribuiria para padronizar a linguagem de *citação* ou *nomenclatura* de tipos de solos.

O conhecimento sobre classificação de solos poderia identificar informações sobre propriedades típicas desses materiais, e interessa para a orientação e tomada de decisões em projetos de engenharia.

SÓRIA (1985), comenta “as teorias que dão suporte às atuais classificações de solo são criticáveis em instâncias como a estrutura lógica e pelo confronto do seu conteúdo material com os fatos”. Mas, dentre nossas hipóteses de trabalho está o pensamento: *apesar de limitações, a classificação de solos pode ser útil para estimativa de características de comportamento de materiais na construção civil.*

A principal base de raciocínio nesse trabalho são os resultados das pesquisas financiadas em 1952 pelo *Bureau of Reclamation* e dirigidas pelo eminente Professor Arthur Casagrande: a *Unified Soil Classification System*, USCS, muitas vezes dita *classificação unificada* no decorrer da exposição que se faz. Este processo é uma maneira de descrever facilmente características de solos úteis ao conhecimento de propriedades e diretrizes sobre o comportamento de materiais para construção de maciços de terra.

A massa do solo é um arcabouço sólido e de poros que contêm fluidos e gases. Os sólidos são usualmente compostos de grãos minerais de vários tamanhos, formas e arranjos. Os sólidos podem ser divididos em vários componentes, e, cada um contribui para as características físicas de solos.

A primeira das variáveis que definem as propriedades físicas de solos é a distribuição de tamanhos (diâmetros) e arranjo de seus grãos sólidos. *Classificar implica dar nomes*. A Figura 13 resume os nomes fornecidos aos diversos intervalos de tamanhos de grãos de solos na classificação unificada (USCS), conforme exposto por USDI-BR (1987), e adaptado para uso em próximos raciocínios – as ditas *frações granulométricas de solos*, ou *frações de solos*.

O termo *granulometria*, nos dicionários “especificação do tamanho de grãos de rocha”, será aqui usado para exprimir a “distribuição de ocorrências de tamanhos de grãos de solos, em relação ao peso de uma massa unitária de solo”.

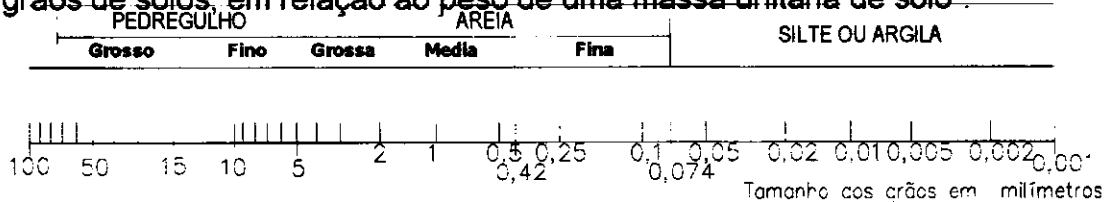


Figura 13 – Nomes para as frações de solos em função de tamanho de grãos [USDI-BR (1987)].

Dentre os conceitos sobre a distribuição de tamanhos de grãos de solos há que se observar:

a) os diâmetros de grãos são representados graficamente na "curva que representa a distribuição de tamanhos de grãos no papel monologarítmico, usualmente dito *curva granulométrica do solo*";

b) Os diâmetros que mais caracterizam as propriedades de solo são:

D_{10} , o diâmetro tal que 10%, em peso, do solo tem diâmetro menor que ele;

D_{30} , o diâmetro tal que 30%, em peso, do solo tem diâmetro menor que ele;

D_{60} , o diâmetro tal que 60%, em peso, do solo tem diâmetro menor que ele.

c) a *gradação, aumento ou diminuição sucessiva e gradual dos diâmetros que participam da distribuição de grãos do solo* (erroneamente dita "gradação"), pode ser classificada em:

Contínua, quando a curva granulométrica mostra a participação de todo o intervalo de tamanhos de partículas do solo na distribuição, desde a menor até a maior;

Descontínua, quando a curva granulométrica mostra a ausência de participação de, pelo menos, um diâmetro intermediário na distribuição de tamanhos de grãos do solo (diz-se *curva granulométrica descontínua*);

Uniforme, quando os grãos do solo têm tamanho único.

A massa dos solos contém grãos sólidos, ar e água. Nas parcelas de grãos finos, o volume de água influi nas características e propriedades. A principal maneira para expressar esse fato é definir os *limites de Atterberg*:

a) **limite de liquidez (LL)**, o teor de umidade onde o solo muda do estado líquido para o estado plástico;

b) **limite de plasticidade (LP)**, o teor de umidade onde o solo muda do estado plástico para o estado sólido;

c) **índice de plasticidade (IP)**, o intervalo de umidade onde o solo mantém-se no estado plástico.

A distribuição de tamanhos de grãos de solos, o "LL", e o "IP" foram os principais parâmetros usados para estudos de classificação de solos em grupos com características comuns de comportamento como materiais de construção e suporte de obras de terra.

A Figura 14 resume a maior parcela dos conceitos usados para classificar solos finos granulares e frações finas de solos granulares e fornecer uma nomenclatura aos "grupos de solos com propriedades similares na natureza" pela classificação unificada, é a conhecida *Carta de Plasticidade*.

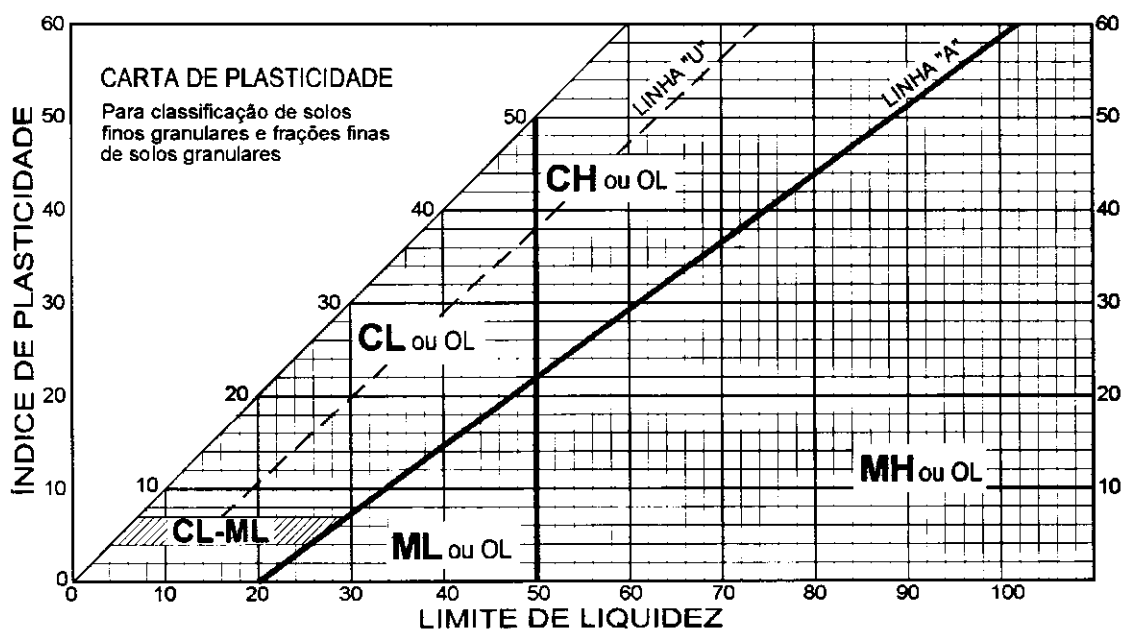


Figura 14 – Carta de plasticidade para classificação unificada de solos [USDI-BR (1987)].

As operações para obtenção de nomes do grupo a que pertence um solo na classificação unificada podem ser efetuadas com auxílio de propostas contidas em USDI-BR (1987). Transcreve-se a seguir uma versão de roteiro para essa atividade (Tabela 2).

Tabela 2 – Roteiro para obtenção da classificação unificada de solos [USDI-BR (1987)].

Critérios para obter os símbolos e nomes de grupos de solos ^a				Classificação e nome do grupo de solo		
				Símbolo	Nome do grupo ^b	
SOLOS GROSSOS Mais de 50% passa na peneira de diâmetro 0,075mm	Pedregulhos Mais de 50% da fração grossa retida na peneira 4,76mm	Pedregulhos limpos	$C_u \geq 4$ e $1 \leq C_c \leq 3$	GW	Pedregulho, granulometria contínua ^e	
			$C_u < 4$ e $1 > C_c > 3$	GP	Pedregulho, granulometria descontínua ou uniforme ^e	
		Pedregulhos com finos	Os finos classificados ML ou MH	GM	Pedregulho silteoso ^{e, f, g}	
			Os finos classificados CL ou CH	GC	Pedregulho argiloso ^{e, f, g}	
	Areias Menos de 50% da fração grossa passa na peneira 4,76mm	Areias limpas	$C_u \geq 6$ e $1 \leq C_c \leq 3$	SW	Areia, granulometria contínua ^h	
			$C_u < 6$ e $1 > C_c > 3$	SP	Areia com granulometria descontínua ou uniforme ^h	
		Areias com finos	Os finos classificados ML ou MH	SM	Areia silteosa ^{f, g, h}	
			Os finos classificados CL ou CH	SC	Areia Argilosa ^{f, g, h}	
SOLOS FINOS Menos de 50% passa na peneira de diâmetro 0,075mm	Siltes e argilas Limite de liquidez menor que 50	Inorgânico	IP > 7 e cai "sobre" ou "acima" da linha "A" da Carta de Plasticidade ⁱ	CL	Argila magra ^{j, k, l}	
			IP < 4 ou cai "abaixo" da linha "A" da Carta de Plasticidade ⁱ	ML	Silte ^{j, k, l}	
		Orgânico	$\frac{\text{limite de liquidez - solo seco}}{\text{limite de liquidez - solo úmido}} > 0,75$		OL	Argila orgânica ^{j, k, l, m} Silte orgânico ^{j, k, l, m}
			$\frac{\text{limite de liquidez - solo seco}}{\text{limite de liquidez - solo úmido}} < 0,75$		OH	Argila orgânica ^{j, k, l, m} Silte orgânico ^{j, k, l, p}
	Siltes e argilas Limite de liquidez maior que 50	Inorgânico	IP cai "sobre" ou "acima" da linha "A" da Carta de Plasticidade	CH	Argila gorda ^{j, k, l}	
			IP cai "abaixo" da linha "A" da Carta de Plasticidade	MH	Silte elástico ^{j, k, l}	
		Orgânico	$\frac{\text{limite de liquidez - solo seco}}{\text{limite de liquidez - solo úmido}} < 0,75$		OH	Argila orgânica ^{j, k, l, m} Silte orgânico ^{j, k, l, p}
					PT	Turfa
Solos muito orgânicos		O principal constituinte é a matéria orgânica, são escuros e têm odor orgânico		PT	Turfa	

<p>a. Para solos que passem na peneira de abertura 75mm</p> <p>b. Anexar, ao ocorrerem pedras ou seixos, "pedras" ou "seixos" ao nome</p> <p>c. Pedregulhos com 5 a 12% de finos têm dois símbolos: GW-GM pedregulho com granulometria contínua e silte GW-GC pedregulho com granulometria contínua e argila GP-GM pedregulho com granulometria descontínua ou uniforme, e silte GP-GC pedregulho com granulometria descontínua ou uniforme, e areia</p> <p>d. Areias com 5 a 12% de finos têm dois símbolos: SW-SM areia de granulometria contínua e silte SW-SC areia de granulometria contínua e argila SP-SM areia com granulometria descontínua ou uniforme e silte SP-SC areia descontínua ou uniforme, com argila</p> <p>e. Adicionar "e areia" ao nome do solo com mais de 15% de areia</p> <p>f. Se os finos forem CL-ML, use símbolos duplos GC-GM SC-SM</p>	<p>g. Adicione "e finos orgânicos" se ocorrerem "finos orgânicos"</p> <p>h. Adicionar "com pedregulho" ao solo com mais de 15% de pedregulho</p> <p>i. Se o limite de liquidez e o de plasticidade "caírem" na área hachurada do gráfico de plasticidade, o nome é CL-ML, silte argiloso</p> <p>j. Adicionar "e areia" ou "e pedregulho", o que predominar, quando o solo tiver entre 15 e 29% passado na peneira 0,075mm</p> <p>k. Adicionar "e areia", se essa fração predominar, quando o solo tiver entre mais de 30% passado na peneira de abertura 0,074mm</p> <p>l. Adicionar "e pedregulho", se essa fração predominar, quando o solo tiver entre mais de 30% passado na peneira 0,075mm</p> <p>m. $IP \geq 4$ e recai "sobre" ou "acima" da linha "A"</p> <p>n. $IP \leq 4$ e recai "abaixo" da linha "A"</p> <p>o. IP recai "sobre" ou "acima" da linha "A"</p> <p>p. IP recai "abaixo" da linha "A"</p>
--	---

Tabela 3 – Aptidão de tipos de solo conforme a classificação unificada ao uso em núcleo de barragens [LAMBE & WITHMAM (1972)].

Símbolos	Grupos de solo	permeabilidade	resistência ao cisalhamento	compressibilidade de	em obra	Aptidão relativa
GW	Pedregulhos com granulometria contínua ou misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino	permeável	excelente	desfavorável	excelente	Não existe
GP	Pedregulhos com granulometria descontínua ou uniforme, ou misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino	muito permeável	boa	desfavorável	boa	Não existe
GM	Pedregulhos siltosos com matéria orgânica e granulometria descontínua ou uniforme ou misturas pedregulho, silte, areia e matéria orgânica	semi-impermeável a impermeável	boa	muito baixa	boa	4
GC	Pedregulhos argilosos, com granulometria descontínua ou uniforme, ou misturas descontínuas ou uniformes de areia, pedregulho e argila	impermeável	boa a regular	muito baixa	boa	1
SW	Areias de granulometria contínuas, misturas de areia com pedregulho com pouco, ou sem finos	permeável	excelente	desfavorável	excelente	Não existe
SP	Areias descontínua ou uniforme, misturas de areia com pedregulho com pouco, ou sem, finos	permeável	boa	muito baixa	regular	Não existe
SM	Areia siltoosa ou misturas entre areia, silte e matéria orgânica	semi-impermeável a impermeável	boa	baixa	regular	5
SC	Areias argilosas, misturas entre areia e argilas descontínuas ou uniformes	impermeável	boa a regular	baixa a regular	boa	2
ML	Solos siltosos e areias muito finas com ligeira plasticidade	semi-impermeável a impermeável	regular	média	regular	6
CL	Argilas orgânicas de plasticidade baixa a média, argilas com pedregulho, argilas magras	impermeável	regular	média	boa a regular	3
OL	Finos orgânicos e argilas de baixa plasticidade	semi-impermeável a impermeável	deficiente	média	regular	8
MH	Finos inorgânicos, solos finos arenosos, ou com mica, finos elásticos	semi-impermeável a impermeável	regular a deficiente	alta	deficiente	9
CH	Argilas inorgânicas de elevada plasticidade	impermeável	deficiente	alta	deficiente	7
OH	Argilas orgânicas de plasticidade média a alta	impermeável	deficiente	alta	deficiente	10

A Tabela 3 resume informações expostas por LAMBE & WHITMAN (1972), páginas 46 a 50, sobre comportamento de solos como material de construção de núcleos de barragens.

Analisando-se o exposto por LAMBE & WHITMAN (1972), (Tabela 3), e às páginas 224 até 231 de USDI-BR (1982) pode-se dizer que solos usados para construção de núcleos em barragens de terra devem ter dentre suas propriedades:

- a) coeficientes de permeabilidade no máximo da ordem 10^{-7} cm/s;
- b) boa resistência contra a erosão para contribuir na proteção do maciço contra as ações internas da percolação da água;
- c) boa resistência ao cisalhamento;
- d) expansão e características de compressão compatíveis com os materiais no maciço;
- e) facilidade de manuseio durante a construção.

Também, há que se comentar que são as propriedades do próprio maciço que poderão contribuir para identificar informações que orientem decisões sobre volumes e uso de materiais na construção de barragens – “o que” se pode estudar antes de particularização de características de maciços é a capacidade de um material enquadrar-se nas condições citadas.

Custos e suas relações são outros itens que contribuiriam para orientar a escolha de solos para construção de núcleos de barragens de terra. A afirmativa vale também para equipamentos disponíveis e itens específicos associados às relações entre as propriedades de materiais e processos usados durante a construção. Esses tópicos não serão “sujeitos de discussão” nesse trabalho.

Para orientação, a Tabela 4 contém um resumo de classificação sobre solos usados em núcleos de algumas das grandes barragens brasileiras, segundo a classificação unificada (USCS), originados em informações publicadas em COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS (1982).

Tabela 4 – Descrição de solos usados em núcleos de algumas grandes barragens brasileiras segundo a classificação unificada (USCS) (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982).

Nome	Local	Construtor	Solo no núcleo
Barragem de São Simão	São Simão MG	CEMIG	CL ou ML
Barragem de Três Marias	Pirapora MG	CEMIG	CL
Barragem Euclides da Cunha	São José do Rio Preto SP	CESP	MH
Barragem do Estreito	Sacramento MG	FURNAS	CL
Barragem do Salto Osório	Foz do Iguaçu PR	ELETROSUL	MH

Analisando-se dados contidos na Tabela 4 pode-se inferir que, na construção de núcleos de grandes barragens brasileiras, foram usados solos de aptidão entre “3” até à aptidão “9” na escala sugerida por LAMBE & WHITMAN (1972).

2.2 Bentonitas

Bentonita é o nome comercial de argila cujo mineral predominante é a montmorilonita – são argilas plásticas e expansivas, produto de alteração de cinzas vulcânicas. As misturas de solos com argilas montmoriloníticas aumentam a coesão, a plasticidade, e diminuem o coeficiente de permeabilidade de solos.

Argilas montmoriloníticas, esmectíticas ou bentonita são de intenso uso na indústria porque são policatiônicas e possuem disponíveis cátions dos tipos Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Al^{+++} , Fe^{++} e H_3O^+ (GRIM & GÜVEN, 1978).

Para uso industrial, as propriedades da bentonita são modificadas (ZANDONADI, 1972; ZANDONADI, 1974) por diversos processos. O mais atual é:

- a) tratamento com solução saturada de carbonato de sódio;
- b) cura durante uma semana em câmara úmida com umidade relativa de ar próxima a 100%;
- c) verificação de viscosidades plásticas, aparentes e “volumes do filtrado” (quantidade de sólido sedimentado conforme ensaio padronizado).

Detalhes e ilustração de controles para as variáveis sobre as propriedades da bentonita e seus testes podem ser obtidos em PETROBRAS (1984).

O nome usual para a argila montmorilonítica submetida ao tratamento relatado é "*bentonita sódica*". Esse material tende a dispersar-se em partículas muito pequenas que preenchem vazios e diminuem a continuidade de poros. Também, este tipo de bentonita adsorve água passando a formar uma massa gelatinosa que não permite a entrada de mais água, a não ser quando o líquido e a bentonita são submetidos a alta velocidade de agitação (GRIM & GÜVEN, 1978).

Exemplos de estudos sobre o uso de misturas entre solo e bentonitas podem ser: SIMA & HARSULESCU (1979) ou LUNDGREN (1981). LUNDGREN (1981) relata resultados de estudos sobre aplicação e durabilidade de misturas entre solo e bentonita usadas como camadas para selo em aterros sanitários. Os tópicos estudados foram as relações entre teores de bentonita, eficiência de misturas, resistência química e características de compactação das misturas. O autor construiu modelos e relatou diretrizes para decisões em estudos correlatos.

Processos para estudo sobre comportamento de misturas entre solo e bentonitas podem ser encontrados em LUNDGREN (1981); CHAPUIS (1990); KENNEY et alii (1992); PANDIAN, NAGARAJ & RAJU (1995); PEREIRA (1993). As variáveis mais estudadas foram coeficientes de permeabilidade, compressibilidade, compactação e índices físicos de solos. Entretanto, esses estudos contêm relatos parciais e isolados sobre o comportamento de materiais em maciços de solo.

PANDIAN, NAGARAJ & RAJU (1995) comentam que:

- a) materiais para diminuir a percolação de água em componentes de maciços, como núcleos ou trincheiras de barragens devem ter um coeficiente de permeabilidade relativamente pequeno (da ordem de 10^{-7} cm/s);
- b) ao mesmo tempo, ter compressibilidade compatível com os materiais vizinhos;
- c) embora as misturas solo-bentonita sejam usadas largamente, não há uma aproximação específica para estudar misturas entre solo e bentonitas que solucione a prática de uso desses compostos na construção.

3 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

As observações para obter informações que permitissem orientar a execução de previsões sobre o comportamento de solos como material de construção de núcleos em barragens foram efetuadas:

- a) coletando-se amostras em duas jazidas, uma próxima à Barragem de Milhã (Puxinanã, estado da Paraíba), outra proveniente da área de construção do Shopping Center Nordeste Polo Shopping, em Campina Grande.

As amostras correspondem a camadas do "top-soil. No laboratório foram secas ao ar e peneiradas. As amostras de solo usadas para ensaios correspondem à fração passada na peneira de abertura 4,8mm;

- b) obtendo da BENTONIT UNIÃO NORDESTE amostras de bentonita sódica "marca BRASGEL", certificadas com uso da norma N1398c [PETROBRAS, 1984].

Esse material industrial é controlado e certificado pela PETROBRAS segundo suas normas. Não foi possível um melhor acesso aos detalhes técnicos sobre as propriedades desse tipo de material. Entretanto, esses fatos não interferem na qualidade dos resultados de ensaios da Mecânica dos Solos que suportaram os testes necessários para os estudos efetuados sobre misturas entre solo e bentonitas;

- c) efetuando os ensaios em laboratório para caracterização de propriedades e comportamento de solos naturais e misturas entre solos e teores que variaram entre 2, 4, 6, e 8% de bentonita.

A Tabela 5 resume os métodos adotados para os ensaios em laboratório executados sobre os solos e misturas estudados.

Tabela 5 – Métodos para ensaios em laboratório executados sobre os solos e misturas entre solo e bentonita.

Ensaio, ou dados a estimar	Método de ensaio
Parâmetros da distribuição granulométrica de solos ou misturas	NBR – 7182 (ABNT, 1986)
Características da bentonita	N-1398c (PETROBRAS, 1984)
Limite de Liquidez de solos e misturas entre solo e bentonita	NBR 6459 (ABNT, 1984)
Limite de plasticidade de solos e misturas entre solo e bentonita	NBR 7180 (ABNT, 1984)
Compactação dos solos e misturas entre solo e bentonita	NBR 6457 (ABNT, 1986) DNER ME 47-64
Massa específica real de solos e misturas entre solo e bentonita	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Coefficiente de permeabilidade de solos e misturas entre solo e bentonita, usando carga variável	Não há normas na ABNT e ASTM. Adotaram-se processos da tradição do Laboratório de Solos II do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba e preparação de corpos de prova conforme NBR 13292 (ABNT, 1995)
Expansão de solos e misturas entre solo e bentonita	DNER ME 29-74 (DNER, 1974)
Resistência à compressão simples e misturas entre solo e bentonita	NBR 12 025 (ABNT, 1990)
Resistência ao cisalhamento direto e misturas entre solo e bentonita	ASTM D 3080 (ASTM, 1998)

É necessário comentar que:

- a) para estimativa de coeficientes de permeabilidade, foi necessário a adoção de permeâmetros de carga variável. As consultas aos catálogos de norma da ABNT (<http://www.abnt.org.br/index2.htm>) e da ASTM (<http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/STORE/>) pela INTERNET indicaram a ausência de especificações para estes ensaios naqueles órgãos;
- b) optamos por adotar os métodos expostos em LAMBE (1955) para ensaios de estimativa de coeficientes de permeabilidade. Isso porque esse é o conjunto de processos discutido em um dos melhores simpósios sobre estimativa de coeficientes de permeabilidade já documentados;
- c) para estudos sobre expansão de solos adotou-se procedimento proveniente de análises sobre dados provenientes de construção de aterros e pavimentos em rodovias. Isso se atribui a uma tentativa de aproveitar o conhecimento acumulado entre engenheiros e técnicos que constróem rodovia e meios de transporte, eles já manusearam bastante os solos expansivos.
- d) para estudos sobre resistência ao cisalhamento de solos adotou-se a Norma ASTM D3080 (ASTM, 1998), um dos mais atualizados métodos do mundo para o tratamento das estimativas de parâmetros para expressar a relações entre solos e solicitações por cisalhamento;
- e) para estudos sobre a resistência à compressão simples, os critérios adotados vieram de uma norma usualmente usada para a dosagem de misturas entre o solo e o cimento [NBR 12 025 (ABNT, 1990)];

Os resultados estão expostos a seguir:

3.1 Ensaios sobre solos e misturas entre solo e bentonita - amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã

A Tabela 6 resume resultados obtidos de granulometria de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Tabela 6 –Granulometria de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de bentonita (%)	% que passa peneira de 4,8 mm	% que passa peneira de 2,0 mm	% que passa peneira de 0,42 mm	% que passa peneira de 0,25 mm	% que passa peneira de 0,15 mm	% que passa peneira de 0,075 mm
0	99.66	96.07	60.70	49.29	28.51	17.88
2	99.67	96.15	61.49	50.30	27.29	19.52
4	99.67	96.23	62.27	51.32	31.37	21.16
6	99.68	96.31	63.06	52.33	32.80	22.81
8	99.69	96.38	63.84	53.35	34.23	24.45

A Figura 15 ilustra o exposto na Tabela 6.

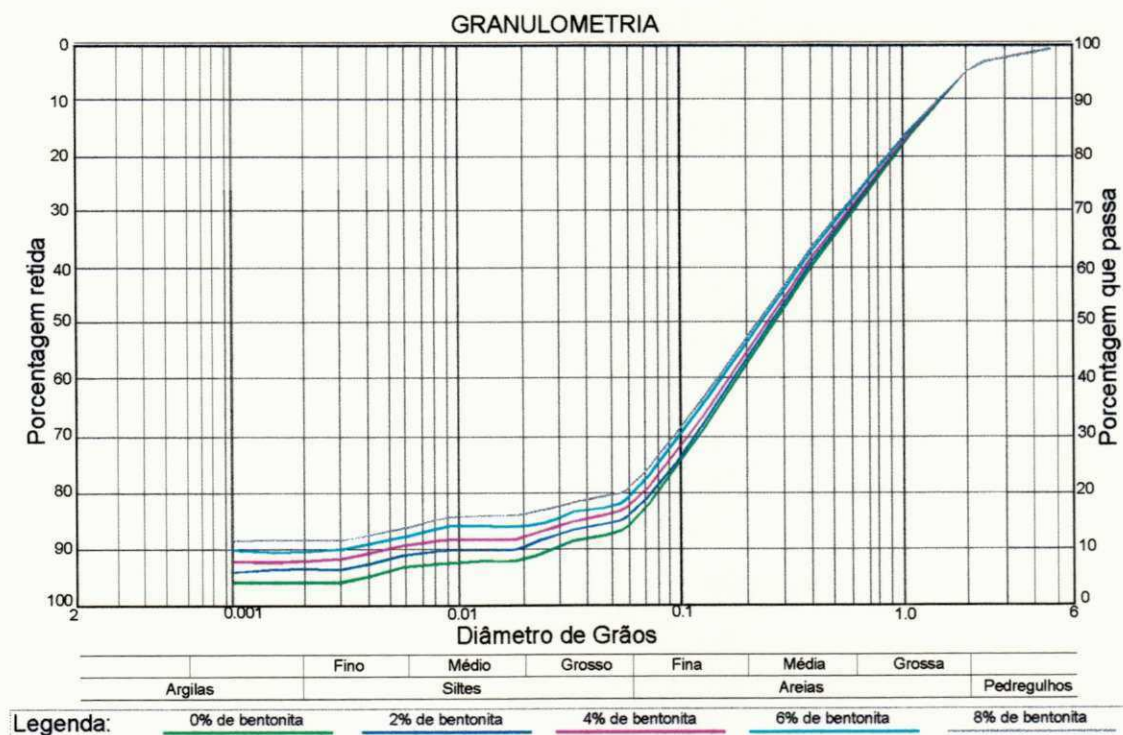


Figura 15–Distribuição granulométrica de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

A Tabela 7 resume os resultados obtidos durante os ensaios para determinação de limites de liquidez e limites de plasticidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Tabela 7 - Limites de liquidez e limites de plasticidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de Bentonita (%)	LL	LP	IP
0% (1)	NL	NP	-
2% (1)	NL	NP	-
4% (1)	NL	NP	-
6% (1)	30.8	23.3	7.5
8% (1)	35.1	25.9	9.2
0% (2)	NL	NP	-
2% (2)	NL	NP	-
4% (2)	NL	NP	-
6% (2)	30.9	22.2	8.7
8% (2)	35.3	26.4	8.9

A Tabela 8 resume os resultados obtidos durante os ensaios para estimativa de coeficientes de permeabilidade médios de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Tabela 8 - Coeficientes de permeabilidade médios de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de bentonita (%)	Média de estimativa do coeficiente de permeabilidade (10^{-6} cm/s)
0	49,030
2	3,310
4	4,850
6	0,304
8	0,957

A Figura 16 ilustra o exposto na Tabela 8.

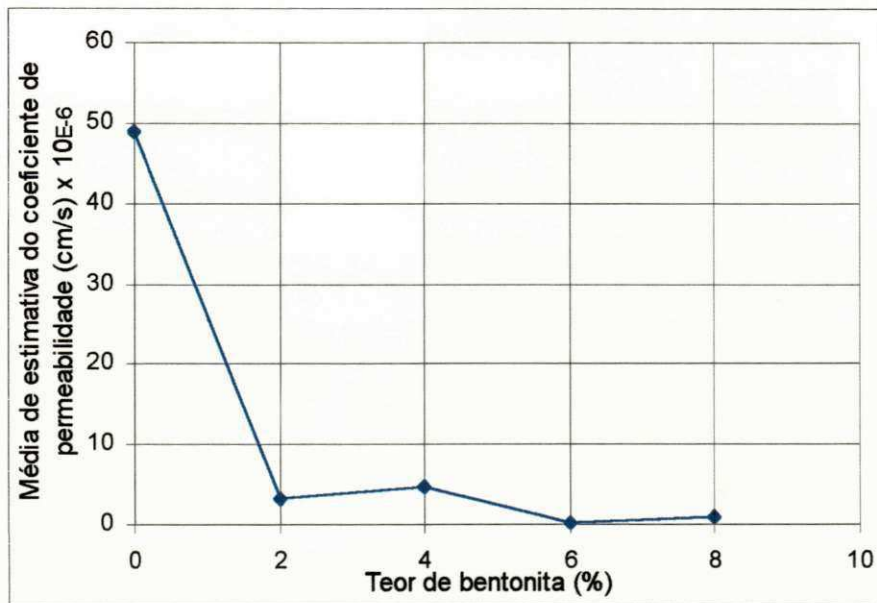


Figura 16– Coeficientes de permeabilidade médios de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

A Tabela 9 resume os resultados obtidos em ensaios para estimativa de resistência à compressão de amostras de jazida da Barragem de Milhã.

Tabela 9 – Resistência à compressão simples média de solo natural e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de bentonita (%)	Média de estimativa de resistência à compressão simples (kPa)
0	40
2	125
4	164
6	174
8	163

A Figura 17 ilustra o exposto na Tabela 9.

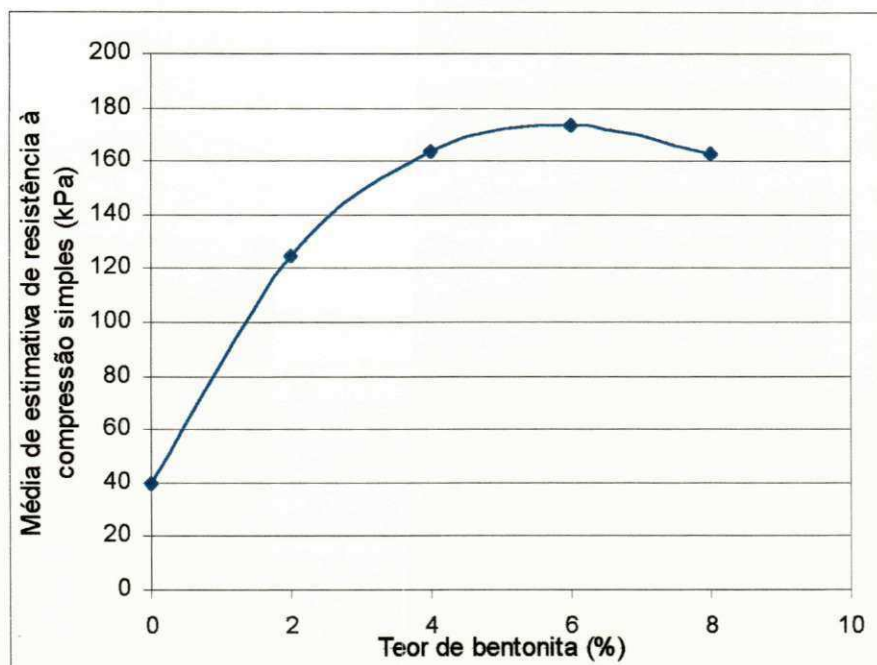


Figura 17 – Resistência à compressão simples média de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

A Tabela 10 resume os resultados obtidos durante os ensaios para estimativa de resistência ao cisalhamento de amostras de jazida da Barragem de Milhã.

Tabela 10 - Resistência ao cisalhamento de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de bentonita (%)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito
0	07	44
0	22	41
0	16	45
2	48	38
2	53	32
2	53	36
4	75	33
4	62	34
4	57	37
6	58	34
6	40	39
6	56	34
8	64	32
8	71	34
8	54	36

As Figura 18 e Figura 19 ilustram o exposto na Tabela 10.

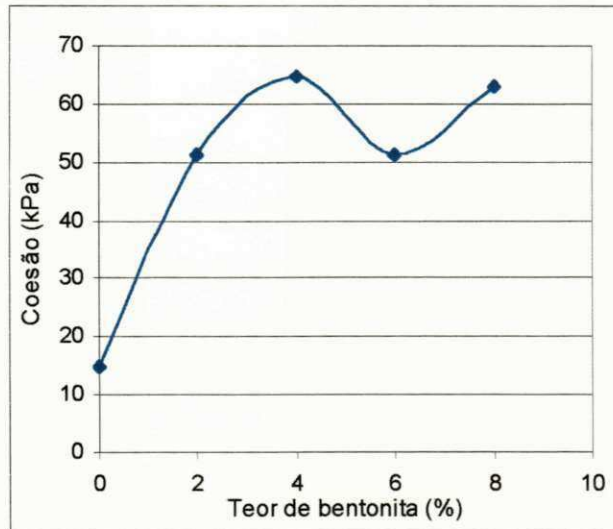


Figura 18 –Coesão de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

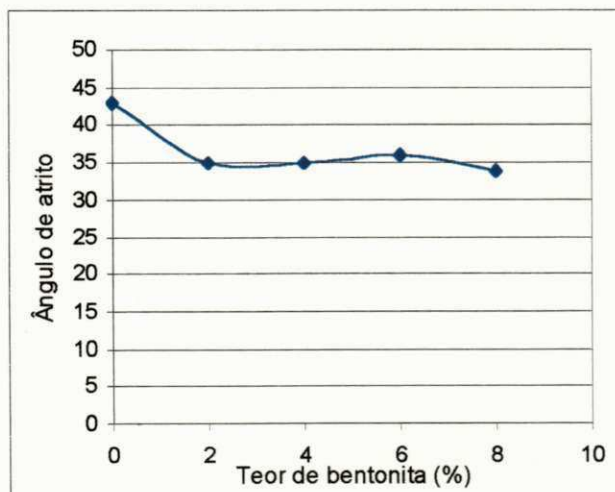


Figura 19 – Ângulo de atrito de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

A Tabela 11 resume os resultados obtidos durante os ensaios para estimativa de índices de expansão sobre amostras de jazida da Barragem de Milhã.

Tabela 11 – Índices de expansão de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de Bentonita (%)	Expansão (%)
0	2,400
0	0,787
0	1,113
2	3,307
2	6,433
2	5,180
4	13,133
4	11,580
4	11,087
6	17,547
6	18,280
6	20,380
8	26,533
8	24,507
8	24,873

A Figura 20 ilustra o exposto na Tabela 11.

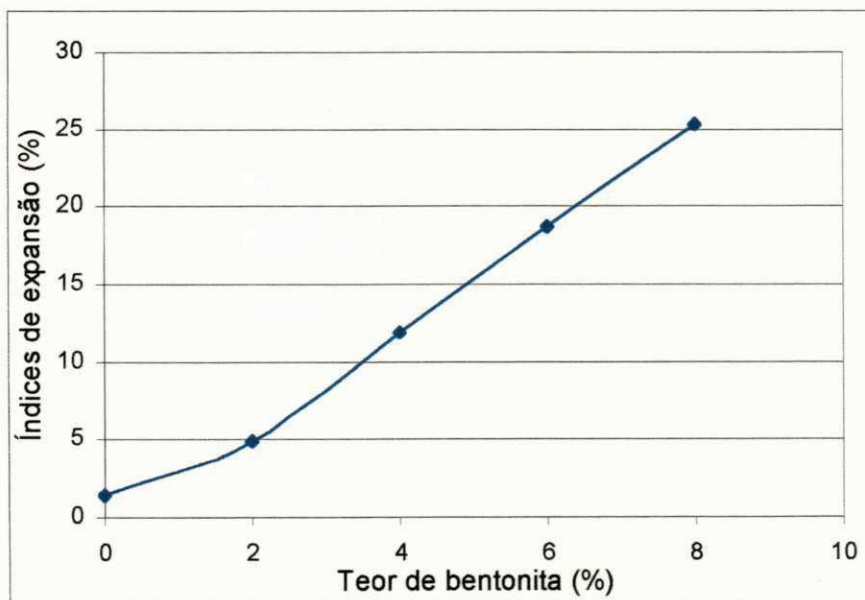


Figura 20 – Índices de expansão de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

3.2 Ensaios sobre solos e misturas entre solo e bentonita - amostras provenientes de jazida do Shopping Center

A Tabela 12 resume os resultados obtidos durante os ensaios para estimativa de distribuição granulométrica de amostras da jazida do Shopping Center.

Tabela 12 – Distribuição granulométrica de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Teor de bentonita (%)	% que passa peneira 4,8mm	% que passa peneira 2,0mm	% que passa peneira 0,42mm	% que passa peneira de 0,18mm	% que passa peneira 0,075mm
0	99.56	93.93	56.23	33.85	17.72
2	99.57	94.05	57.11	35.17	19.37
4	99.58	94.17	57.98	36.50	21.01
6	99.59	94.29	58.86	37.82	22.66
8	99.60	94.42	59.73	39.14	24.30

A Figura 21 ilustra o exposto na Tabela 12.

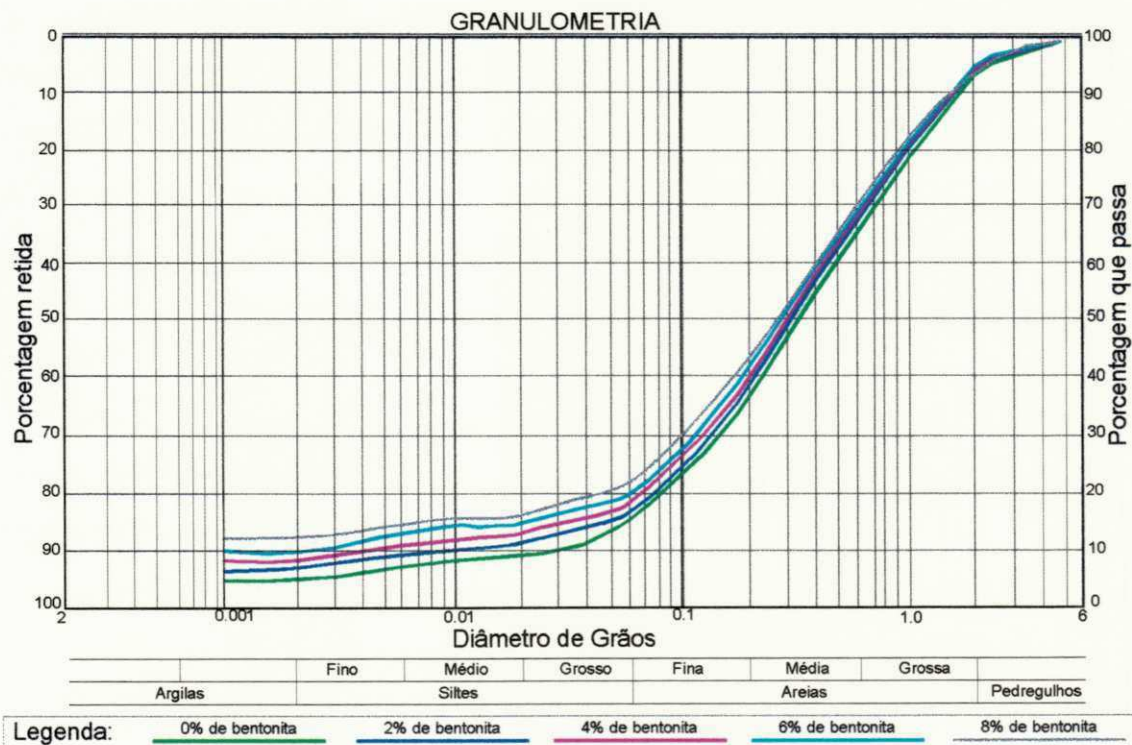


Figura 21 – Distribuição granulométrica de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

A Tabela 13 resume os resultados obtidos em ensaios para estimativa de limites de liquidez [NBR 6459 (ABNT, 1984)] e limites de plasticidade [NBR 7180 (ABNT, 1984)] de solo e misturas entre solo e bentonita - jazida do Shopping Center.

Tabela 13 - Limites de liquidez e limites de plasticidade de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Teor de Bentonita	LL	LP	IP
0% (1)	NL	NP	-
2% (1)	19.3	NP	-
4% (1)	24.1	NP	-
6% (1)	27.6	20.8	6.8
8% (1)	33.7	23.9	9.8
0% (2)	NL	NP	-
2% (2)	19.0	NP	-
4% (2)	23.9	NP	-
6% (2)	28.6	20.0	8.6
8% (2)	34.0	24.3	9.7

A Tabela 14 resume resultados médios obtidos durante os ensaios para estimativa de coeficientes de permeabilidade de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Tabela 14 - Média de coeficientes de permeabilidade em ensaios de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Teor de bentonita (%)	Média de estimativa de coeficiente de permeabilidade (cm/s) x 10 ⁻⁶
0	89,500
2	2,400
4	1,430
6	2,500
8	0,325

A Figura 22 ilustra o exposto na Tabela 14.

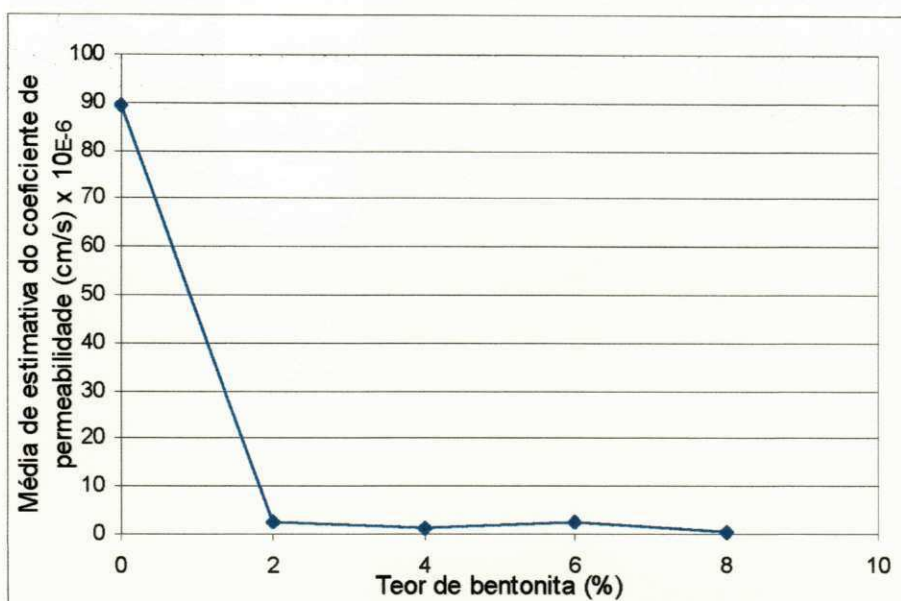


Figura 22– Coeficientes de permeabilidade médios de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

A Tabela 15 resume os resultados médios obtidos durante os ensaios para estimativa de resistência à compressão de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Tabela 15 – Médias de resistência à compressão simples de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Teor de bentonita (%)	Média de estimativa de resistência à compressão (kPa)
0	44
2	136
4	162
6	204
8	153

A Figura 23 ilustra o exposto na Tabela 15.

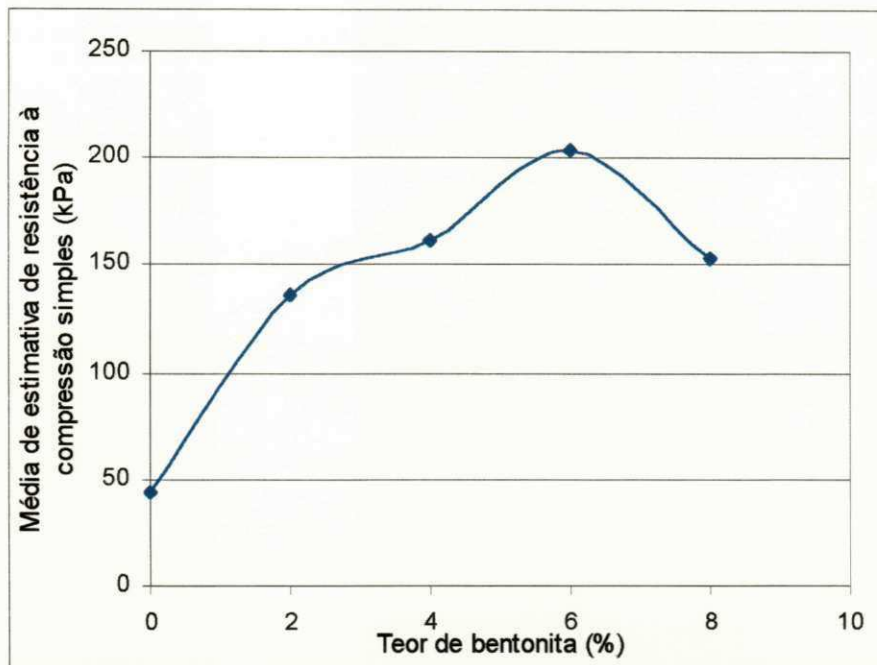


Figura 23– Resistência à compressão simples média de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center .

A Tabela 16 resume os resistências ao cisalhamento de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Tabela 16 - Resistência ao cisalhamento de solos e misturas entre solo e bentonita – jazida do Shopping Center

Teor de bentonita	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito
0	20	44
0	20	45
0	40	39
2	16	52
2	22	51
2	39	44
4	62	30
4	62	33
4	67	29
6	80	20
6	80	26
6	77	21
8	80	21
8	60	32
8	68	34

As Figura 24 e Figura 25 ilustram o exposto na Tabela 16.

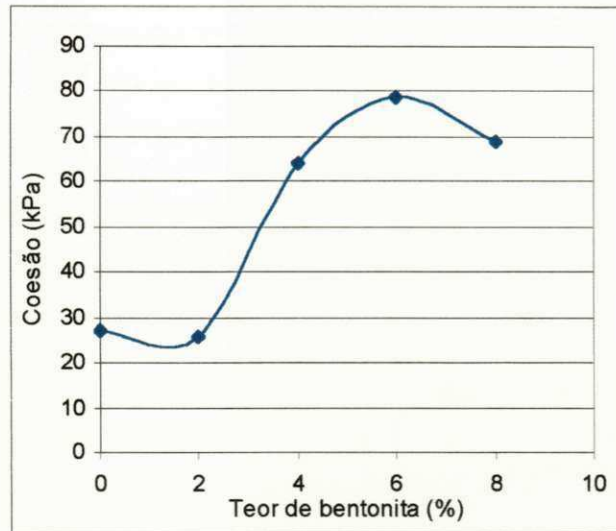


Figura 24 – Coesão de solo natural e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

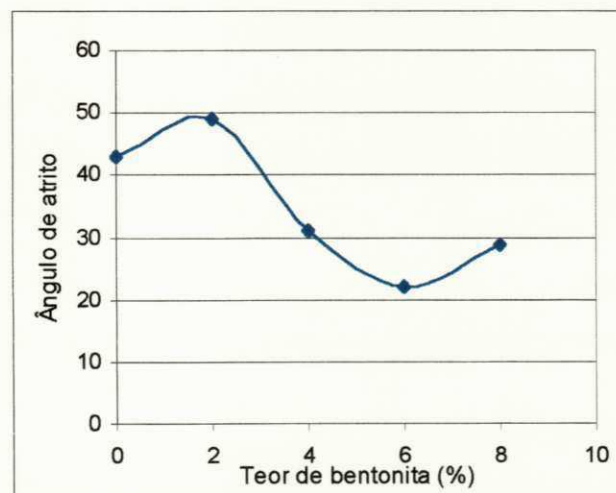


Figura 25 – Ângulo de atrito de solo natural e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

A Tabela 17 resume resultados médios de ensaios para estimativa de índices de expansão de solo e misturas entre solo e bentonita - jazida do Shopping Center.

Tabela 17 – Índices de expansão médios de amostras de jazida do Shopping Center .

Teor de Bentonita (%)	Expansão (%)
0	1,477
0	0,960
0	1,387
2	7,400
2	7,827
2	7,753
4	19,127
4	18,413
4	16,813
6	16,140
6	21,360
6	20,380
8	25,133
8	27,187
8	28,653

A Figura 26 ilustra o exposto na Tabela 17.

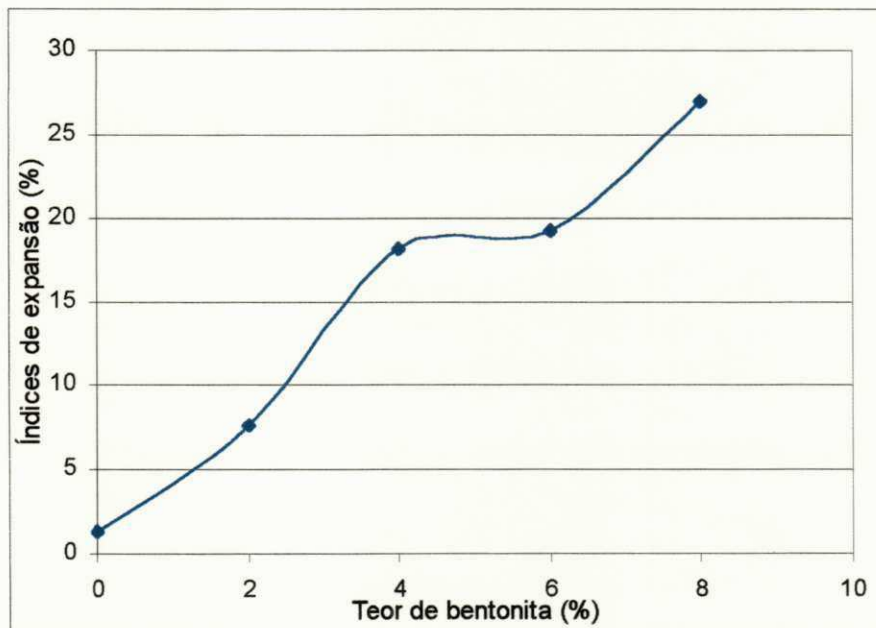


Figura 26 – Índices de expansão de solo e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

4 PREVISÃO DE INFORMAÇÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DE SOLOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO EM NÚCLEOS DE BARRAGENS

Nesse capítulo relatam-se métodos, tópicos e resultados de análise de dados sobre propriedades características de solos obtidos em laboratório (favor consultar "3 ENSAIOS EM LABORATÓRIO", a partir da página 21), visando identificar informações sobre o comportamento de solos e suas misturas com bentonita como material de construção de núcleos de barragens.

4.1 Comportamento de solos como material de construção em núcleos de barragens de terra

Para estudo de comportamento de solos como material de construção de núcleos em barragens de terra adotaram-se as seguintes hipóteses:

- a) os ensaios em laboratório podem fornecer informações confiáveis para classificar os solos e suas misturas aos diferentes teores de bentonita;
- b) os resultados de ensaios sobre corpos de prova compostos com misturas entre solo e bentonita refletem o comportamento dessas composições no campo e nas solicitações sobre maciços de terra;
- c) a classificação relativa entre o comportamento de solos como material para construção de núcleos em barragens de terra, partindo do exposto por LAMBE & WITHMAN (1972), páginas 46 a 50, pode ser usada como uma escala útil para definir critérios para prever o comportamento de solos e misturas entre solo e bentonita quando usadas para construir núcleos de barragens de terra.

Assim, um processo para prever o comportamento de misturas entre solo e bentonita como material de construção de núcleos em barragens de terra pode ser:

- a) coletar amostras dos solos;
- b) misturar os solos naturais com teores crescentes de bentonita;
- c) executar ensaios em laboratório para estimativa de parâmetros da distribuição granulométrica e limites de Atterberg de solos e misturas analisados;
- d) classificar os solos artificiais compostos pelas misturas usando a classificação unificada de solos [por exemplo, consultar LAMBE & WITHMAN (1972), páginas 46 a 50];
- e) a partir da classificação obtida, adotar as informações expostas na Tabela 3, como a expressão da previsão simulada de comportamento das misturas entre solo e bentonita como material de construção de núcleos;
- f) na prática, o uso das informações sobre comportamento de solos identificadas deve respeitar critérios expostos em especificações e cada contexto de construção de barragem. Em particular o maciço a ser verificado, seus materiais de construção e fundações.

O processo exposto recebeu o nome de: *estimativa do grau de aptidão de solos ou misturas de solo para previsão de comportamento como material de construção em barragens de terra.*

A aplicação do processo proposto pode levar a identificação de informações sobre o comportamento de solos e misturas enquanto material de construção de núcleos em barragens de terra.

4.2 Aptidão de amostras de solos de jazidas provenientes da Barragem de Milhã para construção de núcleos em barragens de terra

A Tabela 18 resume os resultados de estudos sobre estimativas da aptidão de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã para uso como material de construção de núcleos em barragens de terra.

Tabela 18 - Aptidão de amostras de solos de jazidas provenientes da Barragem de Milhã para construção de núcleos em barragens de terra.

% de Bentonita	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _c	C _u	LL	LP	IP	Classificação	Aptidão como material de núcleo
0% (1)	0.03	0.14	0.40	1.63	13	NL	NP	-		Não deve ser usado
0% (2)	0.027	0.15	0.41	2.03	15	NL	NP	-	SW	
2% (1)	0.018	0.12	0.37	2.16	20	NL	NP	-		
2% (2)	0.019	0.15	0.40	2.96	21	NL	NP	-	SW	
4% (1)	0.005	0.11	0.36	6.72	72	NL	NP	-		
4% (2)	0.004	0.14	0.39	14	98	NL	NP	-	SP	
6% (1)	0.003	0.099	0.35	117	9.33	30.8	23.3	7.5		2 Segundo lugar na escala
6% (2)	0.002	0.13	0.36	23	180	30.9	22.2	8.7	SC	
8% (1)	0.004	0.095	0.34	6.63	85	35.1	25.9	9.2		
8% (2)	0.005	0.100	0.30	5.88	68	35.3	26.4	8.9	SC	

4.3 Aptidão de amostras de solos de jazidas provenientes do Shopping Center para construção de núcleos em barragens de terra

A Tabela 19 resume os resultados de estudos sobre a estimativa da aptidão de solos provenientes de jazida do Shopping Center para uso como material de construção de núcleos em barragens de terra.

Tabela 19 - Aptidão de amostras de solos de jazidas provenientes do Shopping Center para construção de núcleos em barragens de terra.

% de Bentonita	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _c	C _u	LL	LP	IP	Classificação	Aptidão como material de núcleo
0% (1)	0.03	0.16	0.49	1.74	16	NL	NP	-		Não deve ser usado
0% (2)	0.03	0.14	0.40	1.64	13	NL	NP	-	SW	
2% (1)	0.009	0.14	0.36	6.00	40	19.3	NP	-	SP	
2% (2)	0.02	0.12	0.38	1.89	19	19.0	NP	-	SW	
4% (1)	0.004	0.13	0.34	12.0	85	24.1	NP	-		
4% (2)	0.005	0.11	0.37	6.54	74	23.9	NP	-	SP	
6% (1)	0.002	0.12	0.32	23.0	160	27.6	20.8	6.8		
6% (2)	0.003	0.10	0.35	9.52	116	28.6	20.0	8.6	SC	
8% (1)	0.004	0.10	0.30	8.33	75	33.7	23.9	9.8		
8% (2)	0.005	0.09	0.34	5.31	68	34.0	24.3	9.7	SC	

2
Segundo
lugar na
escala

4.4 Ensaios e informações obtidas sobre comportamento de misturas entre solo e bentonita

As Tabela 20 e Tabela 21 resumem algumas conclusões obtidas através de observação de informações provenientes de ensaios executados sobre amostras das jazidas da Barragem de Milhã e do Shopping Center:

Tabela 20 – Tendências e informações observáveis em coeficientes de permeabilidade e índices de expansão de misturas entre solo e bentonita.

Característica de solo ou mistura entre solo e bentonita	Figuras	Tendência observada
Coeficiente de permeabilidade	16, 22	O coeficiente de permeabilidade decresce até o teor 6% de bentonita na mistura com o solo. A diminuição tem forma "exponencial". A principal redução ocorre entre o solo natural e o teor 2% de bentonita na mistura. Ou seja, as propriedades da bentonita interferem bastante no coeficiente de permeabilidade dos solos verificados.
Índice de expansão	20, 26	O índice de expansão das misturas entre solo e bentonitas estudadas crescem com o teor de bentonita. O aumento é da ordem de 6 a 8% para cada 2% de bentonita. É necessário esclarecer quais as forças e solicitações que esse acréscimo pode provocar no maciço da barragem.

Tabela 21 – Tendências e informações observáveis em resistência à compressão simples, coesão e ângulo de atrito de misturas entre solo e bentonita

Característica de solo ou mistura entre solo e bentonita	Figuras	Tendência observada
Resistência à compressão	17, 23	<p>A resistência à compressão praticamente quadruplica ao acrescentar bentonita aos solos estudados. O acréscimo é grande até os teores 4% de bentonita, tem o seu pico em torno dos 6% e poderá decrescer a partir daí. A ação dos finos acrescentados, a bentonita, que preenchem o arcabouço sólido e diminui a compressibilidade das amostras de solos artificiais analisadas para os teores a partir de 4% de bentonita.</p>
Coesão	18,24	<p>A coesão praticamente quintuplica ao acrescentar bentonita aos solos estudados. O acréscimo é grande até os teores 4% de bentonita, e tem pico em torno dos 6%. A ação dos finos acrescentados, a bentonita, que preenchem o arcabouço sólido dos solos estudados aumenta a coesão das amostras de solos artificiais analisadas para os teores a partir de 4% de bentonita.</p>
Ângulo de atrito	19, 25	<p>Os finos acrescentados (bentonita) aos solos naturais estudados reduzem o ângulo de atrito estimado nas amostras estudadas em relação ao solo natural. A redução é sensível até o teor 2%, mantendo-se constante em torno de dois terços do valor inicial a partir daí.</p>

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Analisando as informações expostas nas Tabela 18 e Tabela 19 pode-se inferir que a mistura de diversos teores de bentonita às amostras de solos provenientes de jazidas da Barragem de Milhã e Shopping Center produziu “amostras de solos artificiais” cujas propriedades fizeram prever *características de comportamento como material de construção de núcleos de barragens* que variaram entre:

- a) a previsão tipo “*solos ou misturas não são recomendáveis para construção de núcleos em barragens de terra*”, nas hipóteses de estudo sobre o solo natural ou misturas entre solo e teores de bentonita iguais a “2” e “4%,”
- b) a até a previsão do tipo: “*solos ou misturas são recomendáveis para construção de núcleos em barragens de terra*”, nas hipóteses de estudo sobre o solo natural ou misturas entre solo e teores de bentonita iguais a “6” e “8”%.

Nestes casos, a *classificação na escala relatada por LAMBE & WHITMAN (1972) é igual à “2”, segunda posição entre os comportamentos previstos para os tipos de solos analisados por aqueles autores.*

O exposto mostra que o estudo de misturas entre solos arenosos e argila montmorilonítica (bentonita) pode identificar informações e processos que contribuam para orientar a escolha de materiais para construção de núcleos em barragens de terra no Planalto da Borborema, região em grande parte semiárida no Nordeste do Brasil.

5.2 Sugestões

A conseqüência principal do que se expôs é mostrar a viabilidade de se adotar um processo para estimativa da aptidão de solos e misturas para serem usados como material de construção para barragens.

O produto obtido e o andamento de atividades para obtê-lo deixa um conjunto de novas sugestões para pesquisa como:

- a) repetir os procedimentos adotados para ampliar a base de dados e verificar as informações obtidas;
- b) estudar estatisticamente o conjunto de dados ampliado, visando a previsão de valores numéricos para as propriedades de solos e misturas estudadas. Também, ampliar o entendimento das relações entre as características de solos e os teores de bentonita nas misturas;
- c) discutir novos tópicos sobre o uso da classificação unificada de solos. Uma classificação é base para início de estudos de previsão de características de materiais. Nosso pensamento é que a análise de barragens existentes poderá contribuir sobremaneira para o conhecimento e disponibilidade de eventuais correções em rumos de obtenção de informações sobre características de solos a partir de resultados de classificação;
- d) estudar as conseqüências da expansão provocada pela bentonita nas características de maciços de barragens de terra;
- e) estudar as relações entre custos e uso da bentonita. Faz-se necessário uma análise de todas as variáveis que poderão influir nos custos de construção com uso de misturas entre solo e bentonita. A região do Planalto da Borborema possui instalações que processam a bentonita sódica, mas esse é um método industrial que tem custo.
- f) há que se estudar e conhecer a influência da bentonita nas propriedades de solos com grau de detalhe suficiente para possibilitar a solução de escolha de materiais de construção com o menor volume possível de bentonita.

6 BIBLIOGRAFIA

- ABNT (1984), *NBR 6459 Determinação do limite de liquidez. Método de ensaio.*
- ABNT (1984), *NBR 7180 Determinação do limite de plasticidade. Método de ensaio.*
- ABNT (1986), *NBR 6457 Amostra de solo. Preparação para ensaio de compactação e ensaio de caracterização. Método de ensaio.*
- ABNT (1986), *NBR 7182 Análise granulométrica. Método de ensaio.*
- ABNT (1995), *NBR 13292 Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos à carga constante. Método de ensaio.*
- ABNT(1984), *NBR 6508 Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm. Determinação da massa específica. Método de ensaio.*
- ABNT(1990), *NBR 12 205 Solo cimento. Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos. Método de ensaio.*
- ASTM (1998), *D3080-98 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.* Norma técnica.
- CHAPUIS, R. P. (1990). *Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests.* IN: IN: Canadian Geotechnical Journal. Vol.27, pp.44-57.
- COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS (1982). *Main Brazilian Large Dams,* São Paulo.
- COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS (Diversos números e diversas datas entre 1986 e 1992). *Caderno de Grandes Barragens do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens e Revista Brasileira de Engenharia,* São Paulo.
- DNER. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, *ME 29-74 (1974), Ensaio de expansibilidade. Método de ensaio.*
- DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, *ME 47-64 (1964), Compactação de solo. Método de ensaio.*
- GRIM, R.E.; GÜVEN, N. (1978). *Bentonites. Geology, mineralogy, properties and uses.* ELSEVIER.

- KENNEY, T.C (1992). *Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures*. IN: Canadian Geotechnical Journal. Vol.29, pp.364-374.
- LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. (1972). *Mecânica de Suelos*, EDITORIAL LIMUSA, México.
- LAMBE, T.W. (1955). *The permeability of fine-grained soils*. IN: Symposium on Permeability of Soils. Special Technical Publication 163. ASTM.
- LUNDGREN, T.A. (1981). *Some bentonite sealants in soil mixed blankets*. IN: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Estocolmo .
- MARSAL, R.J. & NÚÑEZ, D.R. (1975). *Presas de tierra y de enrocamiento*. Editorial Limusa. México
- MINTER, MINISTÉRIO DO INTERIOR DO BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS, DNOCS (198). *Instruções gerais a serem observadas na construção em barragens de terra*. 2ª edição. Fortaleza.
- MOIR, D.H. & WONG, L.C. (1992). *Impact of molding water content on hydraulic conductivity of compacted sand-bentonite*. IN: Canadian Geotechnical Journal. Vol.29, pp.53-262.
- PANDIAN, N.S.; NAGARAJ, T.S. & RAJU, P.S.R.N. (1995) *Permeability and compressibility behaviour of bentonite sand/soil mixes*. IN: Geotechnical Testing Journal. v.18, n.1, pp.86-93.
- PEREIRA, P.A.P. (1993). *Determinação experimental da permeabilidade de misturas compactadas de solo arenoso e bentonita*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos USP. São Carlos.
- ⇒ PETROBRAS (1984). *N-1398c Argila ativada para fluido de perfuração*. Rio de Janeiro.
- SHERARD, JAMES, J. (1963) *Earth-rock dams*. John Wiley.
- SIMA, N. & HARSULESCU, A. (1979) *The use of bentonites for sealing earth dams*. IN: Bulletin of the International Association of Engineering Geology. N. 20. pp.222-226.
- SÓRIA, M.H.A. (1985). *Reflexões lógicas sobre classificação de solos*. Tese de doutoramento. Escola de Engenharia de São Carlos USP. São Carlos.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR – BUREAU OF RECLAMATION (1987). *Design of Small Dams*, Terceira Edição, Washington.
- ZANDONADI, A.R. (1968) *Estudo tecnológico de argilas montmoriloníticas brasileiras*. Tese de Doutorado. EPUSP. São Paulo.
- ZANDONADI, A.R. *Estudos recentes de argilas montmoriloníticas realizados no IPT de São Paulo*. IPT. São Paulo, 1974.

Anexo

Comportamento de misturas entre solo e bentonita para uso em núcleos de barragens de terra

Esse anexo resume os resultados de ensaios sobre solos e misturas entre solo e bentonita para obtenção dos dados processados durante as pesquisas para mostrar que o estudo de misturas entre solos arenosos e argila montmorilonítica (bentonita) pode fornecer informações e processos que contribuam para orientar a escolha de materiais para construção de núcleos em barragens de terra.

1 RESULTADOS DE ENSAIOS SOBRE SOLOS E MISTURAS ENTRE SOLO E BENTONITA – JAZIDA DA BARRAGEM DE MILHÃ

As Tabela A 1 até Tabela A 8, e as Figura A 1 até a Figura A 38 resumem e ilustram os resultados obtidos em ensaios para estimar propriedades físicas de solos e misturas entre solo e bentonita, amostras de solo provenientes da jazida da Barragem de Milhã.

Tabela A 1 - Resultados obtidos de granulometria de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de bentonita (%)	% que passa abertura de 4,8 mm	% que passa abertura de 2,0 mm	% que passa abertura de 0,42 mm	% que passa abertura de 0,25 mm	% que passa abertura de 0,15 mm	% que passa abertura de 0,075 mm
0	99.66	96.07	60.70	49.29	28.51	17.88
0	99.56	96.26	59.94	48.32	27.02	17.05
2	99.67	96.15	61.49	50.30	27.29	19.52
2	99.57	96.33	60.74	49.35	28.48	18.71
4	99.67	96.23	62.27	51.32	31.37	21.16
4	99.58	96.41	61.06	50.39	29.94	20.37
6	99.68	96.31	63.06	52.33	32.80	22.81
6	99.59	96.48	62.34	51.42	31.40	22.03
8	99.69	96.38	63.84	53.35	34.23	24.45
8	99.60	96.56	63.15	52.45	32.86	23.68

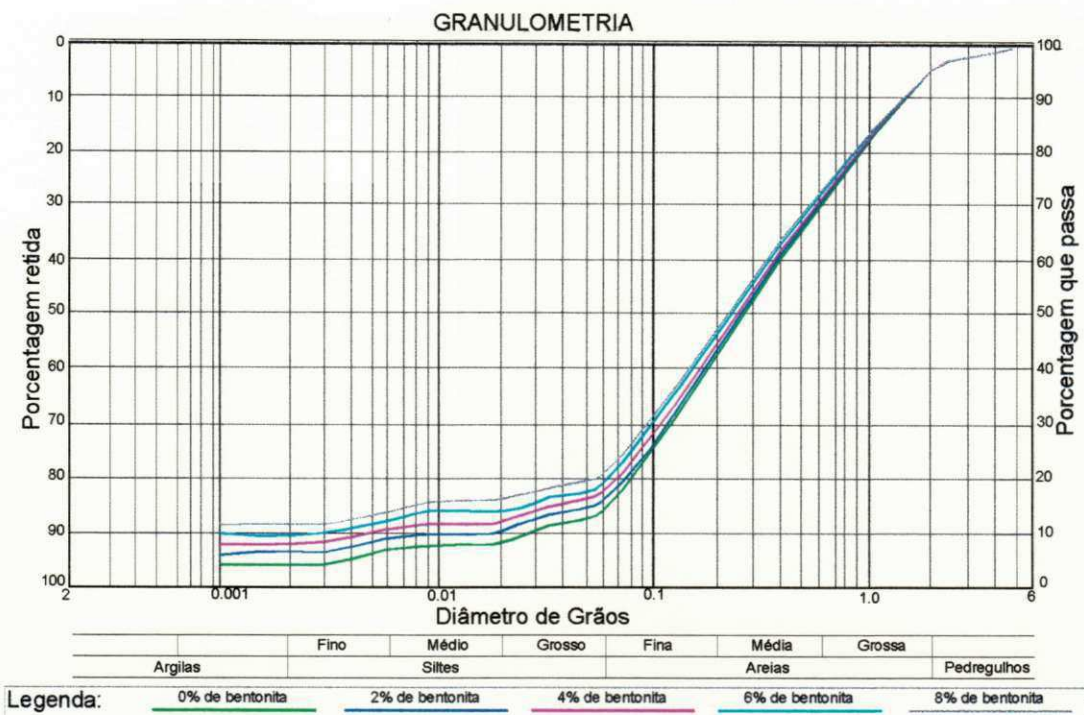


Figura A 1 - Distribuição granulométrica de solos e misturas entre solo e bentonita sobre amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Tabela A 2 - Limites de liquidez e limites de plasticidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de bentonita (%)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
0	NL	NP	-
0	NL	NP	-
2	NL	NP	-
2	NL	NP	-
4	NL	NP	-
4	NL	NP	-
6	30.8	23.3	7.5
6	30.9	22.2	8.7
8	35.1	25.9	9.2
8	35.3	26.4	8.9

Tabela A 3 – Resistência à compressão simples de solos, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm ³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.913	10.7	101.6	43
02	1.935	10.3	102.7	42
03	1.920	10.6	102.0	37
04	1.948	10.2	103.4	38
05	1.911	10.0	101.5	38
06	1.908	10.2	101.3	42
07	1.918	10.6	101.9	40
08	1.951	10.3	103.6	40
09	1.909	10.6	101.4	-
10	1.934	10.2	102.7	38

Tabela A 4 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm ³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.952	10.7	102.1	99
02	1.963	10.2	102.7	110
03	1.956	9.8	102.3	126
04	1.980	10.7	103.6	124
05	1.943	10.4	101.6	140
06	1.936	10.4	101.2	131
07	1.979	9.9	103.5	122
08	1.928	9.6	100.8	130
09	1.968	10.4	102.9	139
10	1.956	10.6	102.3	127

Tabela A 5 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm ³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.942	9.9	104.2	177
02	1.930	10.3	103.6	165
03	1.925	10.6	103.3	161
04	1.946	9.9	104.5	157
05	1.881	10.3	101.0	154
06	1.902	10.4	102.1	157
07	1.888	10.6	101.3	157
08	1.914	10.1	102.7	178
09	1.894	9.7	101.7	167
10	1.938	9.9	104.0	-

Tabela A 6 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm ³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.885	11.8	101.8	157
02	1.891	11.6	102.2	165
03	1.881	11.9	101.6	161
04	1.914	12.1	103.4	173
05	1.895	11.9	102.4	187
06	1.926	12.0	104.1	195
07	1.875	11.7	101.3	-
08	1.932	12.2	104.4	176
09	1.867	11.8	100.9	-
10	1.891	11.6	102.2	180

Tabela A 7 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm ³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.872	12.2	102.4	136
02	1.840	12.1	100.7	147
03	1.859	11.9	101.7	174
04	1.831	12.4	100.2	172
05	1.854	11.4	101.4	169
06	1.895	12.1	103.7	183
07	1.850	11.7	101.2	158
08	1.836	11.3	100.4	168
09	1.854	12.2	101.4	155
10	1.844	12.5	100.9	169

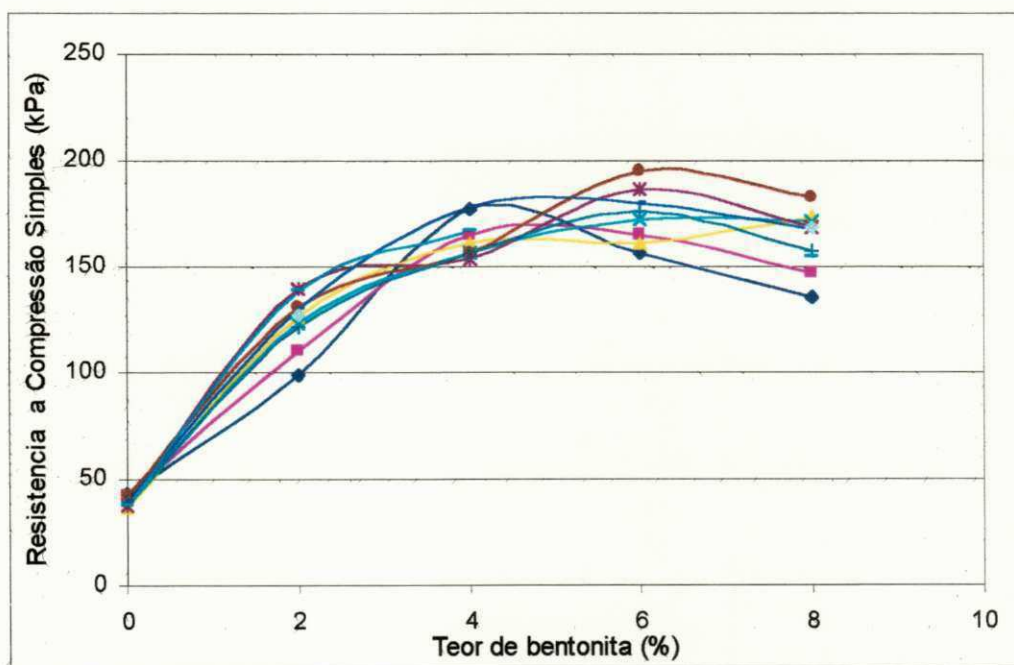


Figura A 2 - Resistência à compressão simples de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

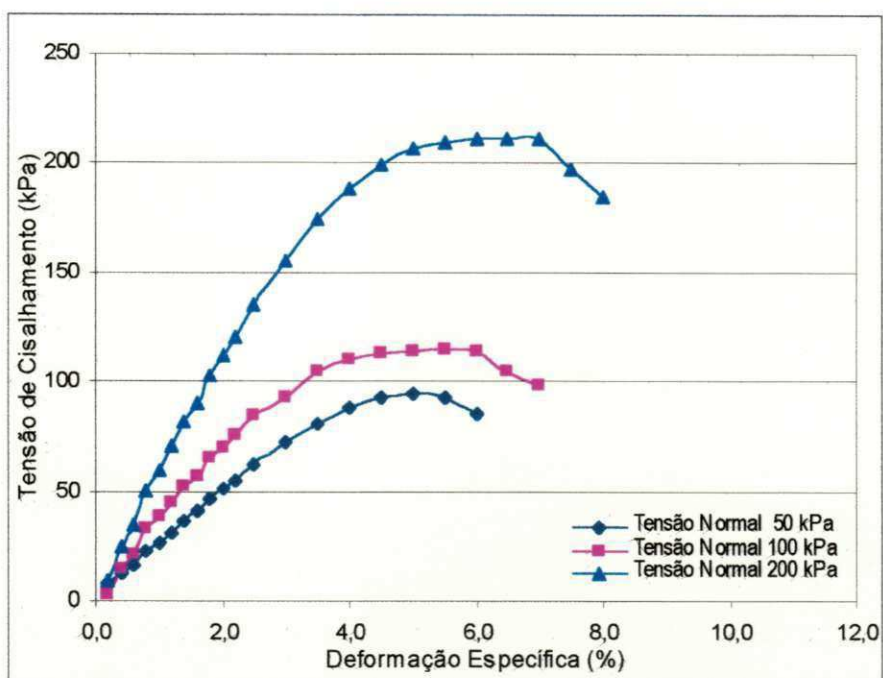


Figura A 3 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos proveniente de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

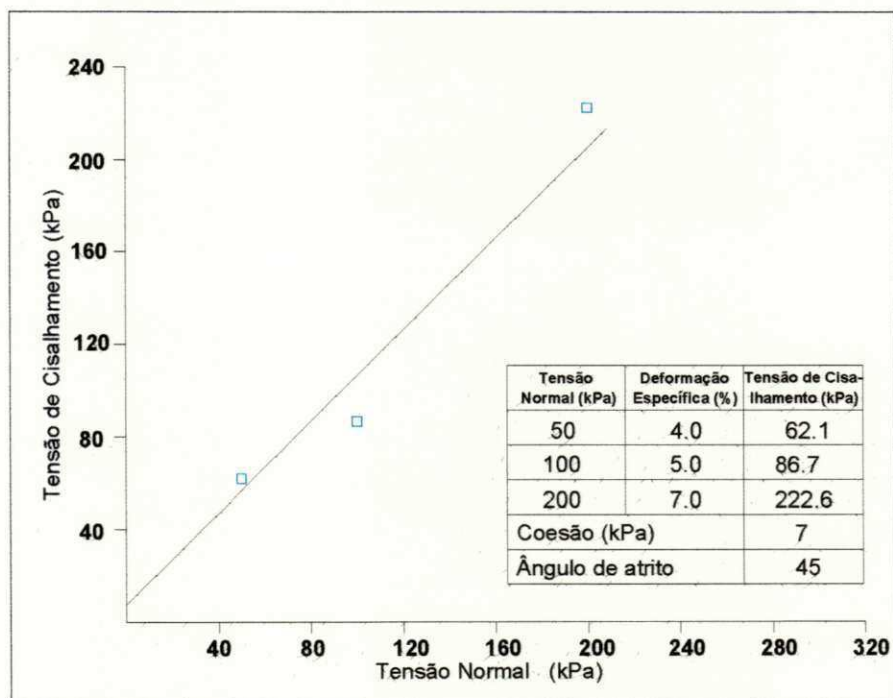


Figura A 4 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

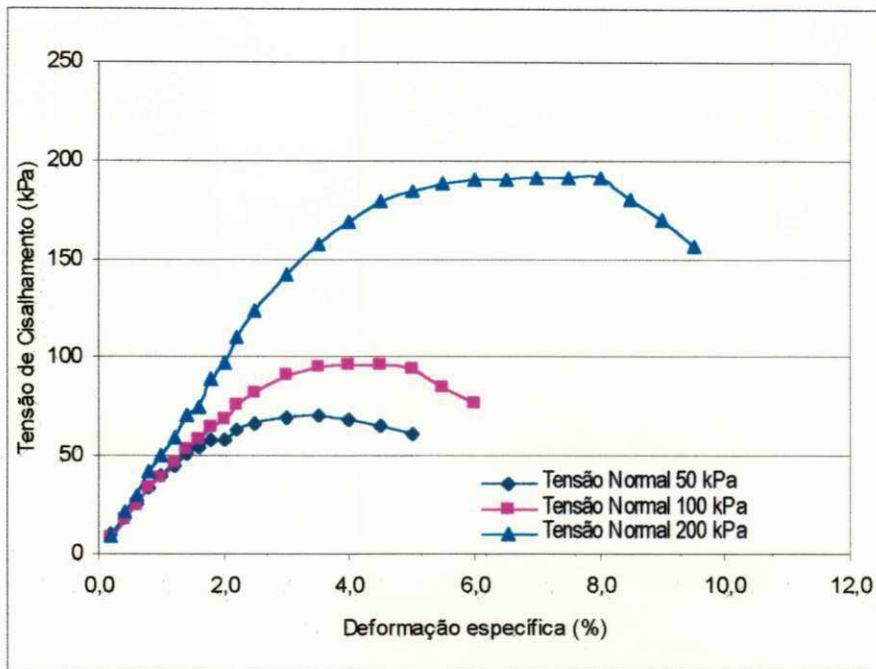


Figura A 5 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos proveniente de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

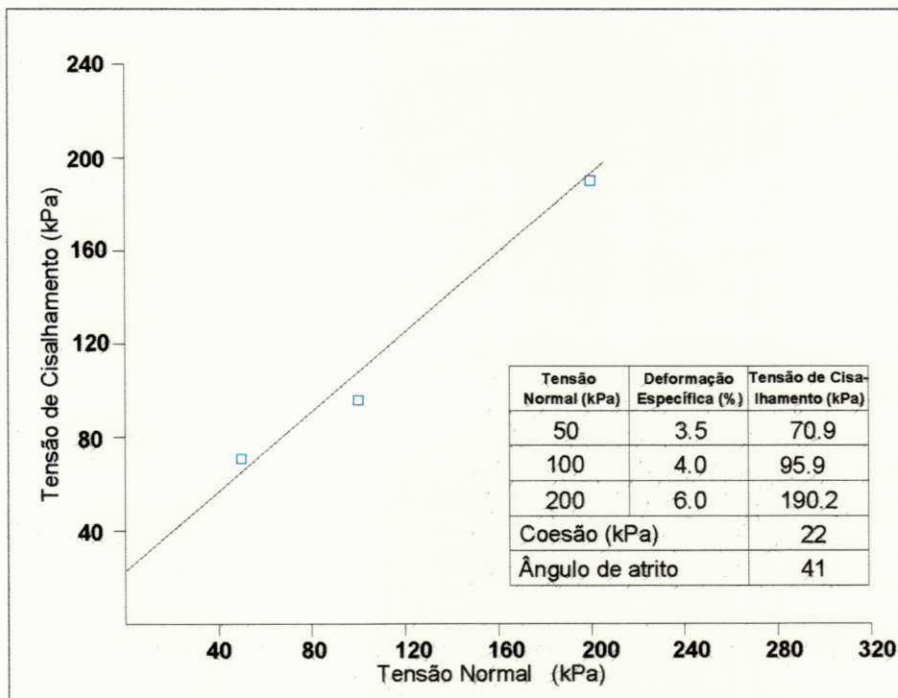


Figura A 6 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

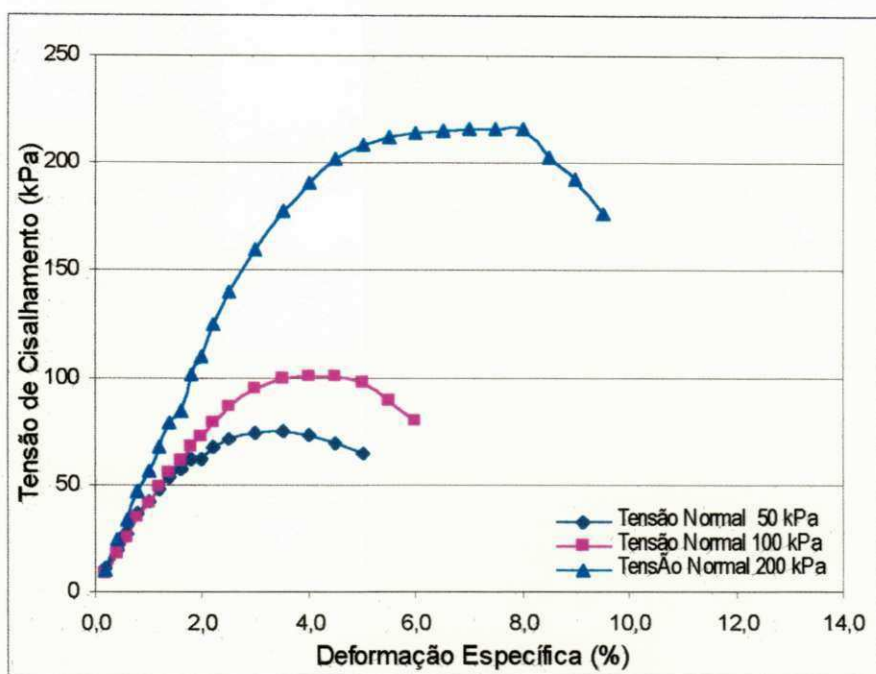


Figura A 7 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

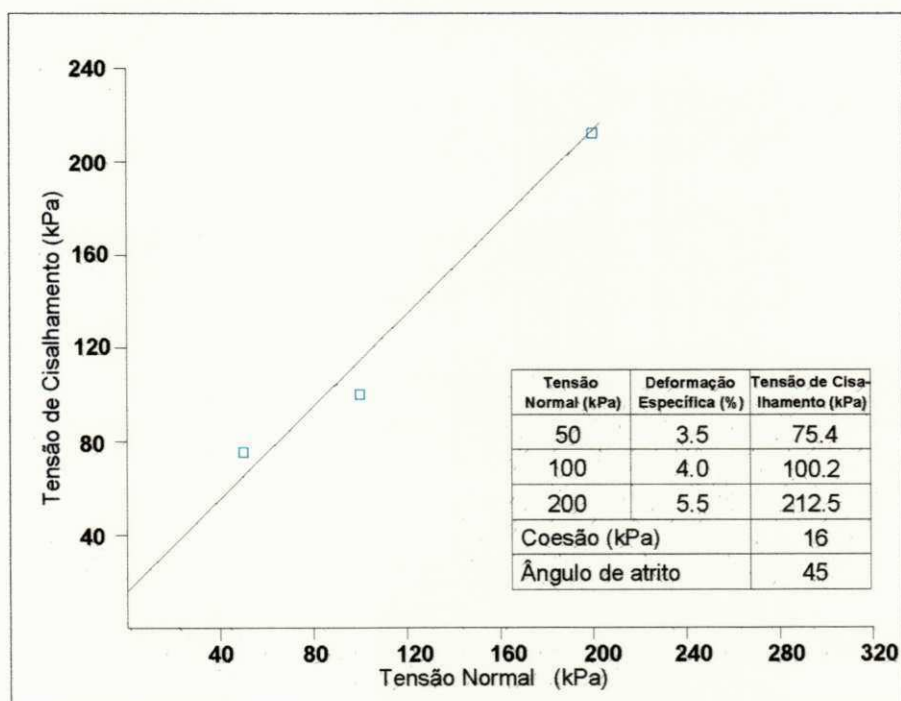


Figura A 8 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

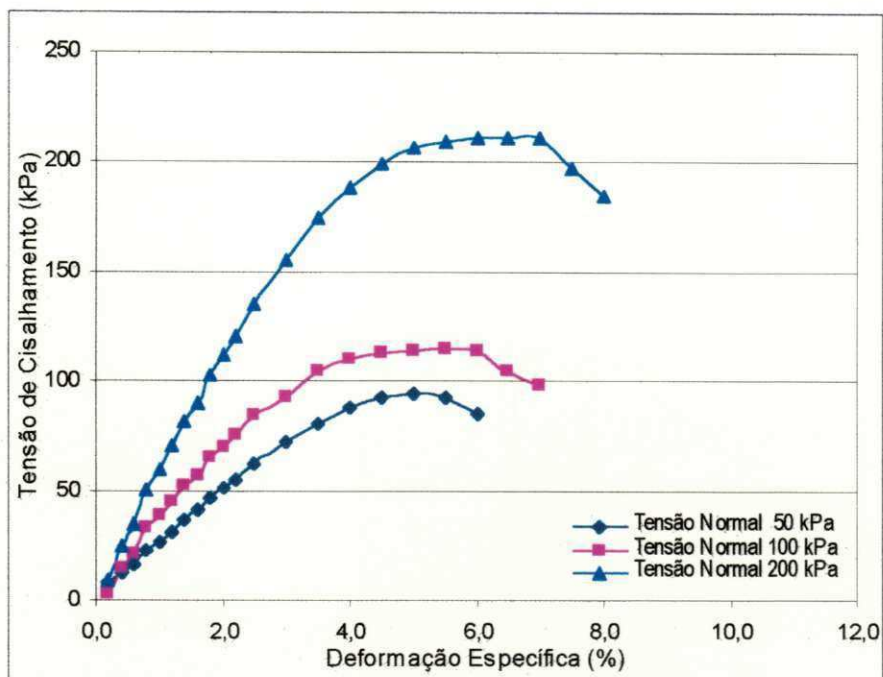


Figura A 9 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

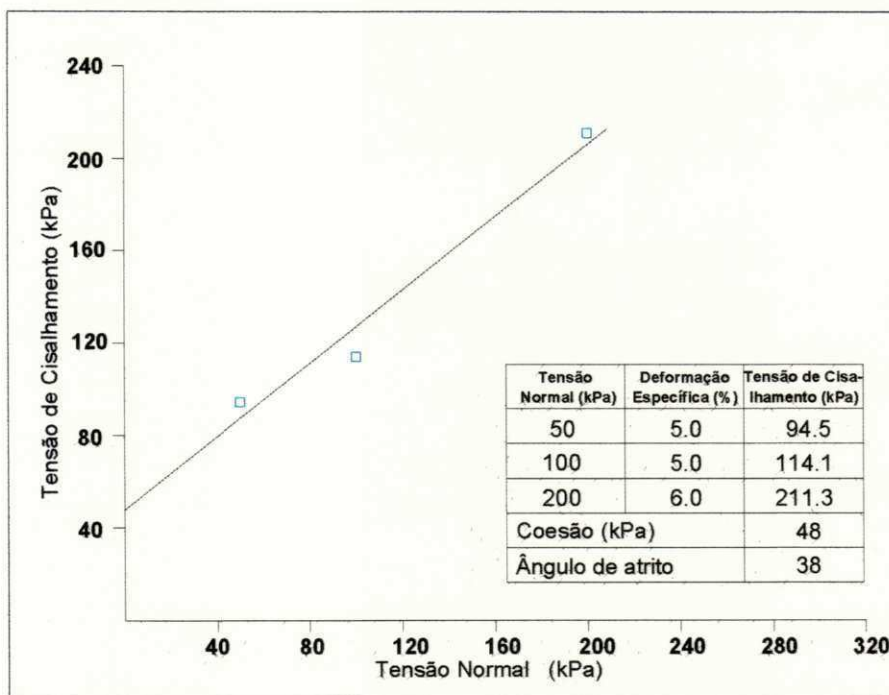


Figura A 10 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

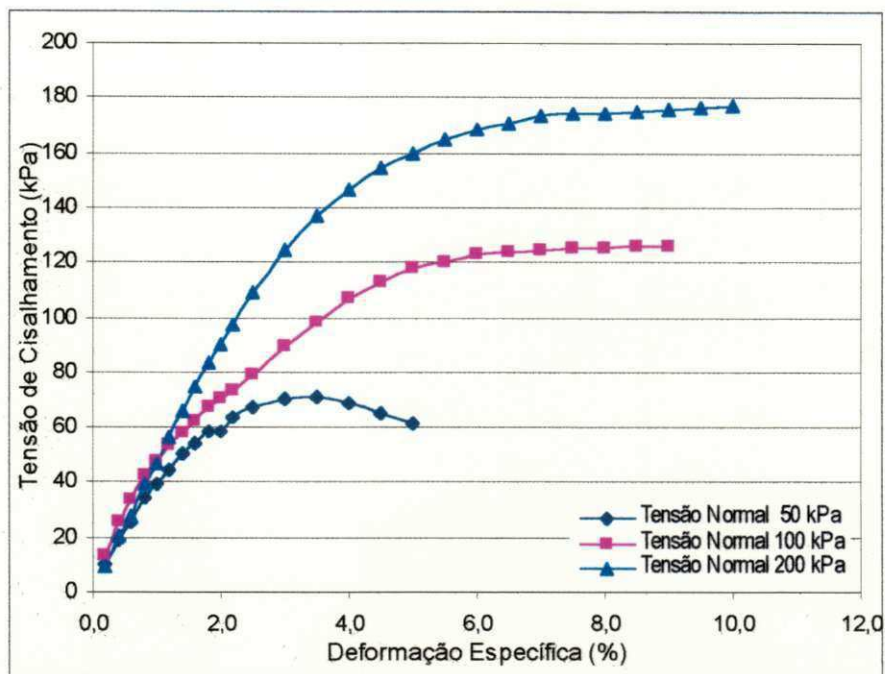


Figura A 11 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

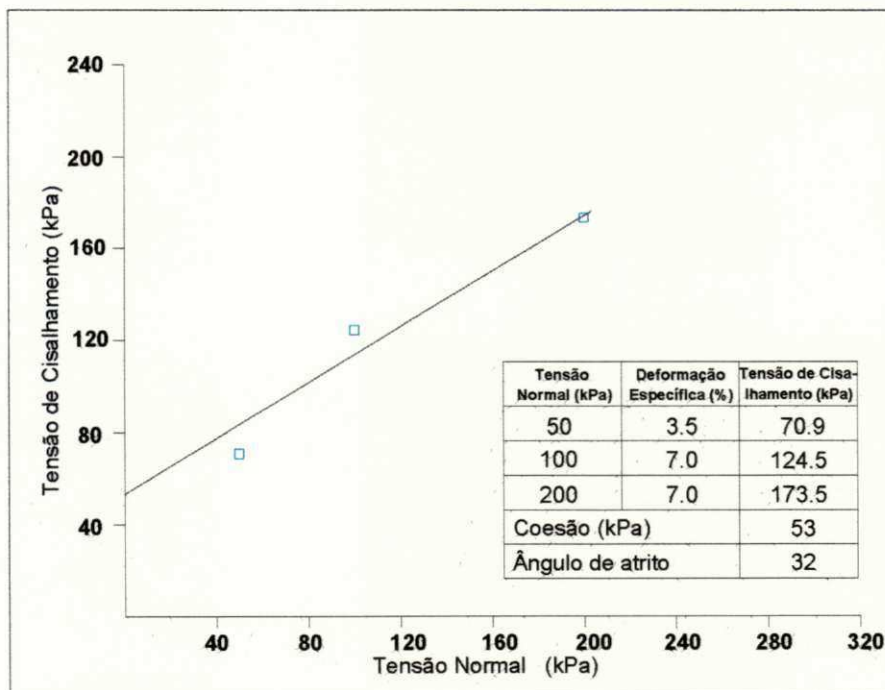


Figura A 12 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

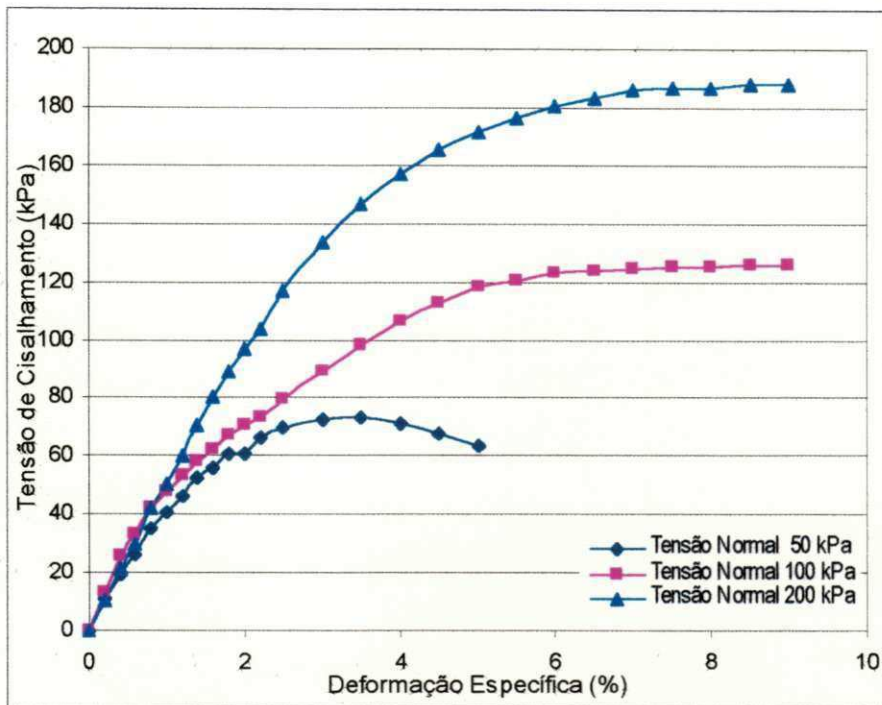


Figura A 13 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

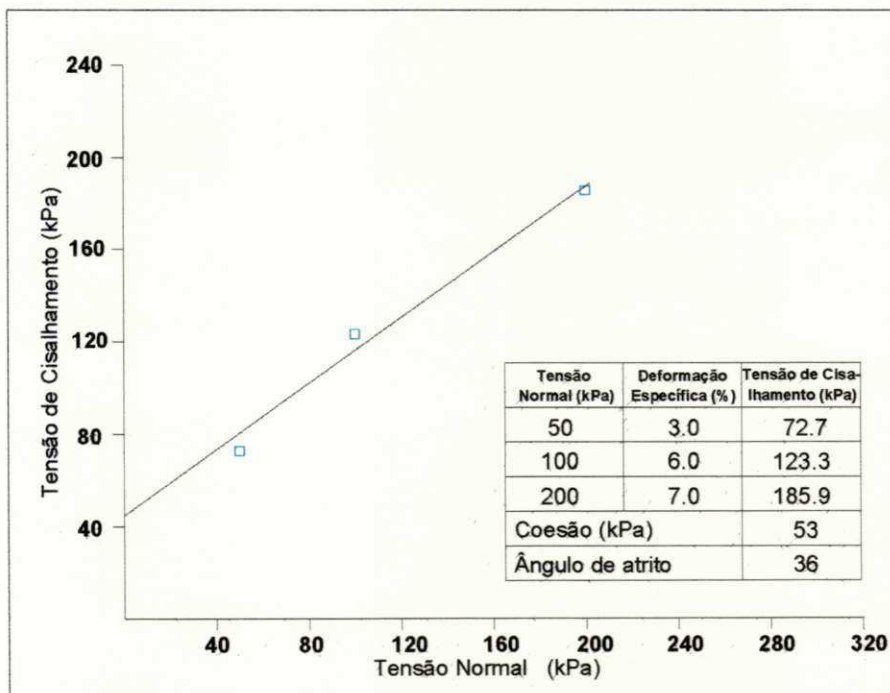


Figura A 14 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

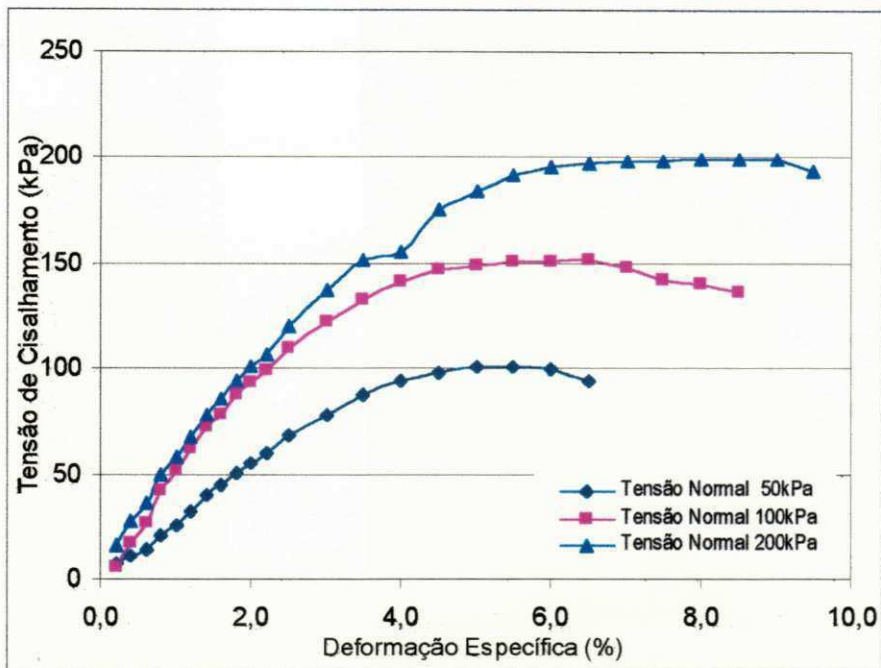


Figura A 15 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

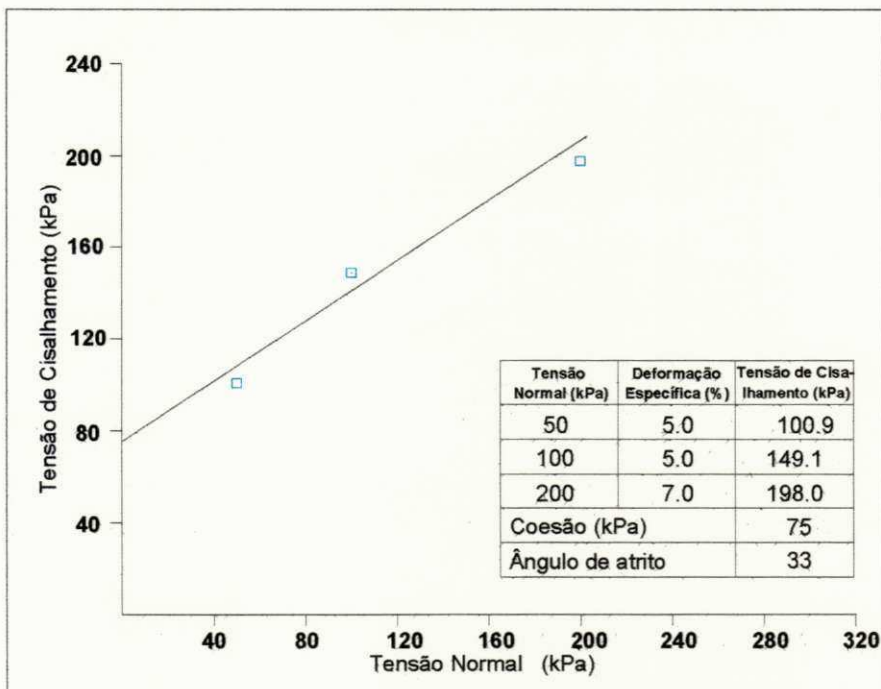


Figura A 16 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

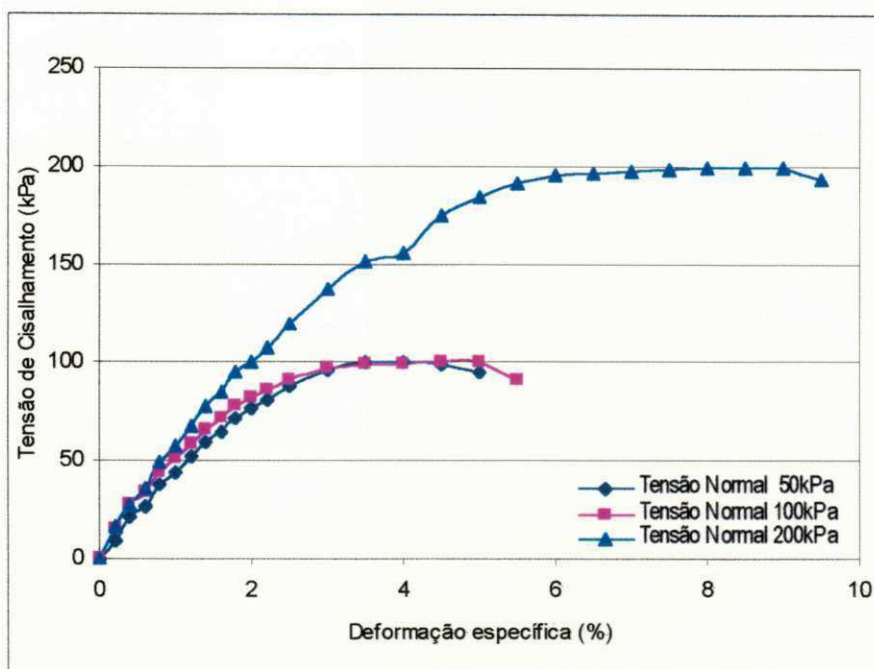


Figura A 17 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

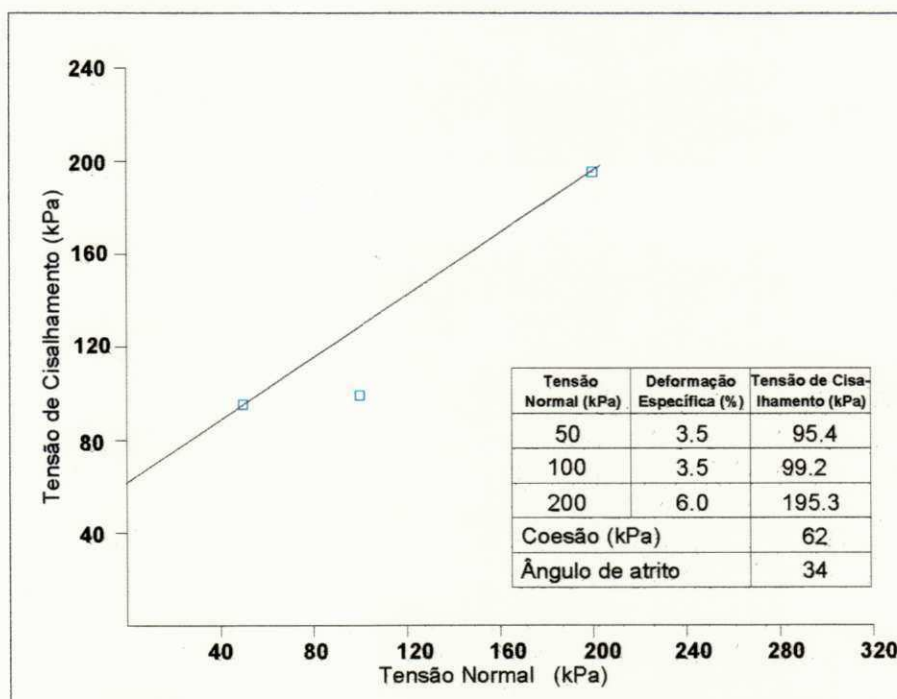


Figura A 18 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

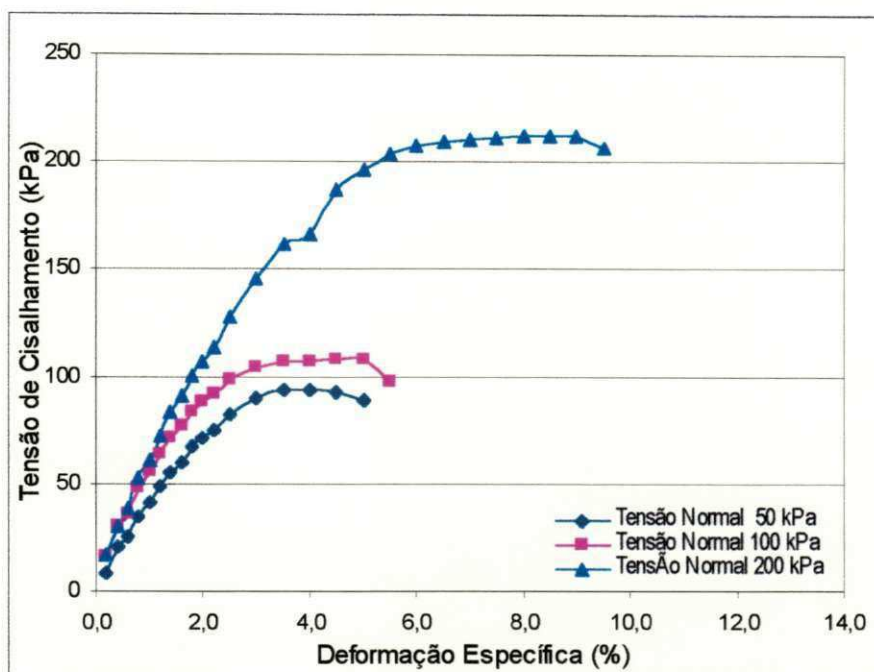


Figura A 19 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

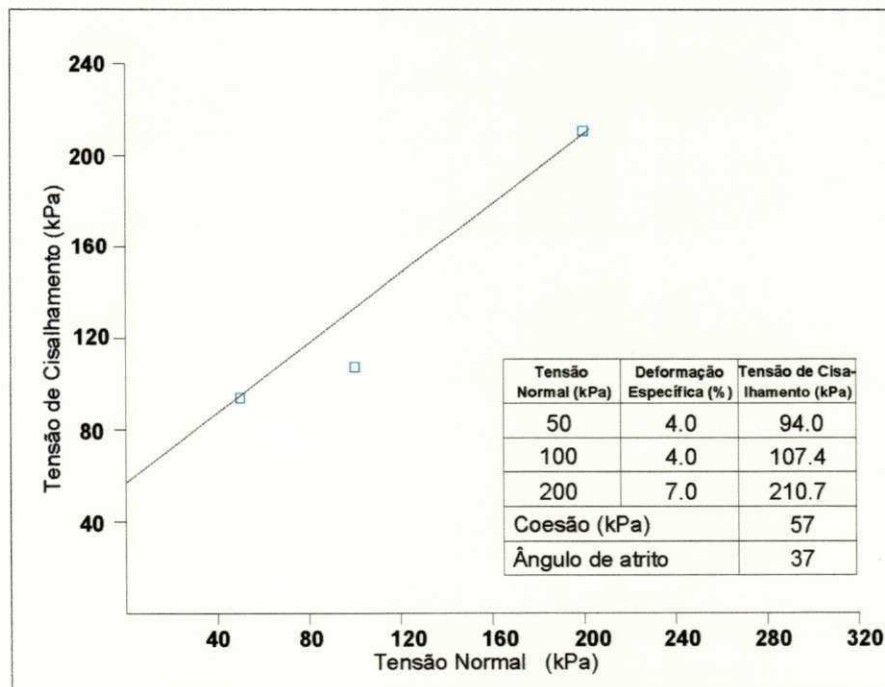


Figura A 20 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

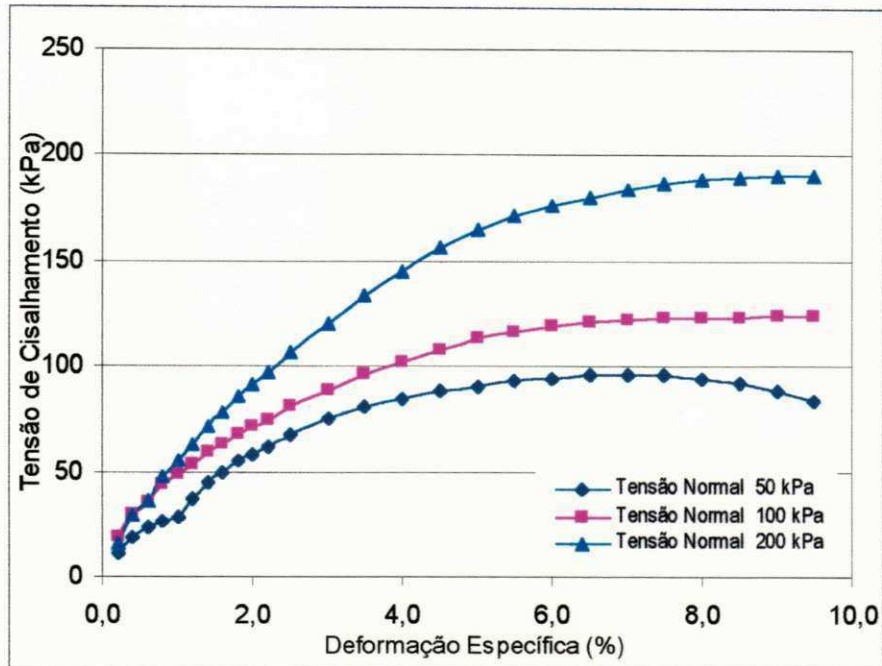


Figura A 21 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

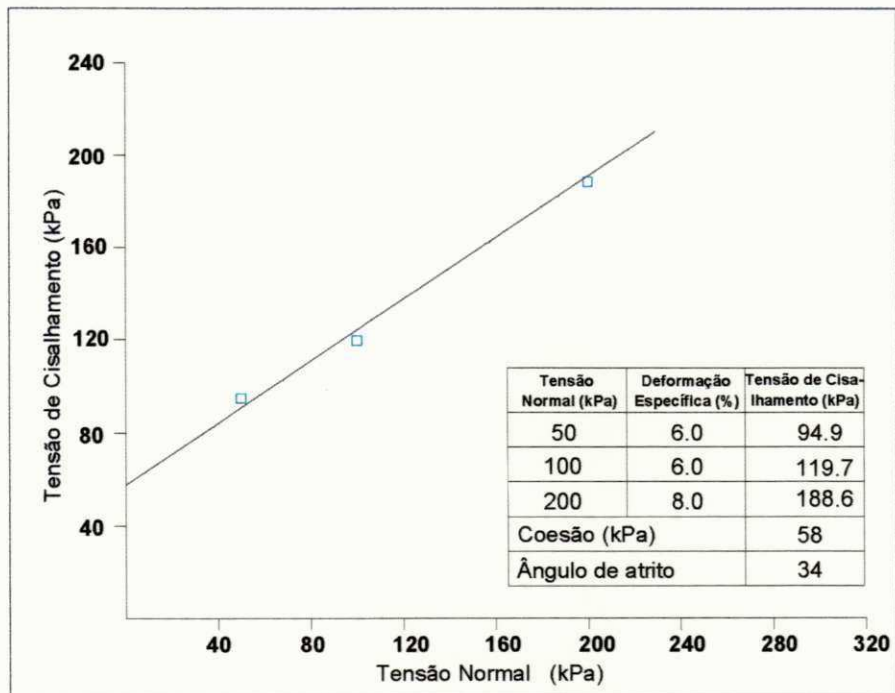


Figura A 22 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

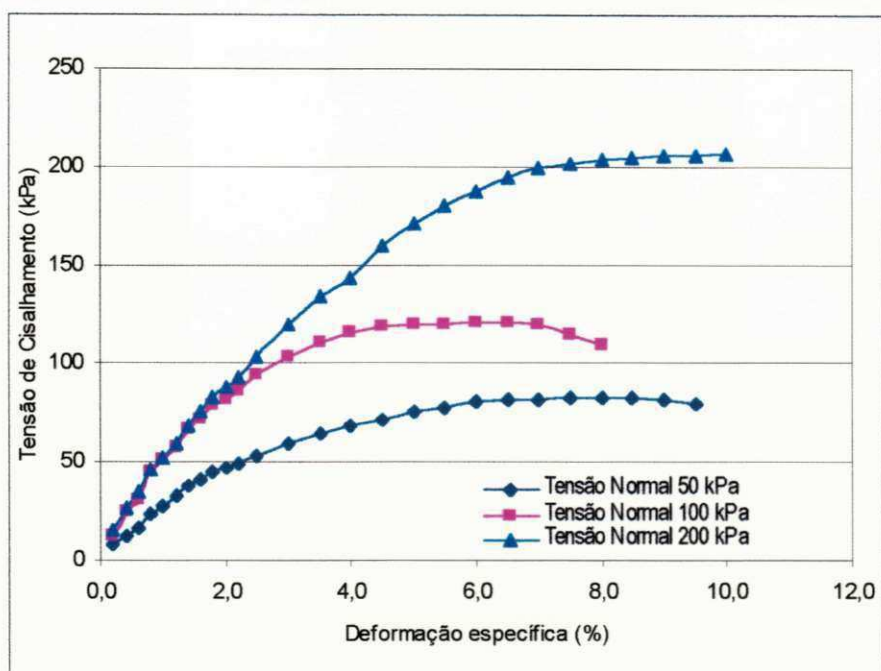


Figura A 23 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

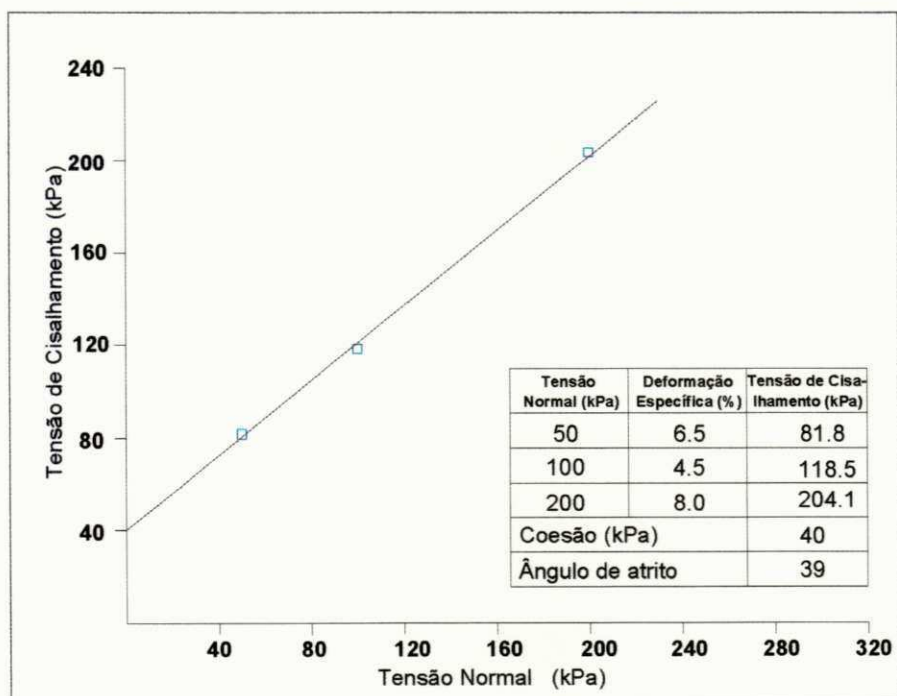


Figura A 24 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

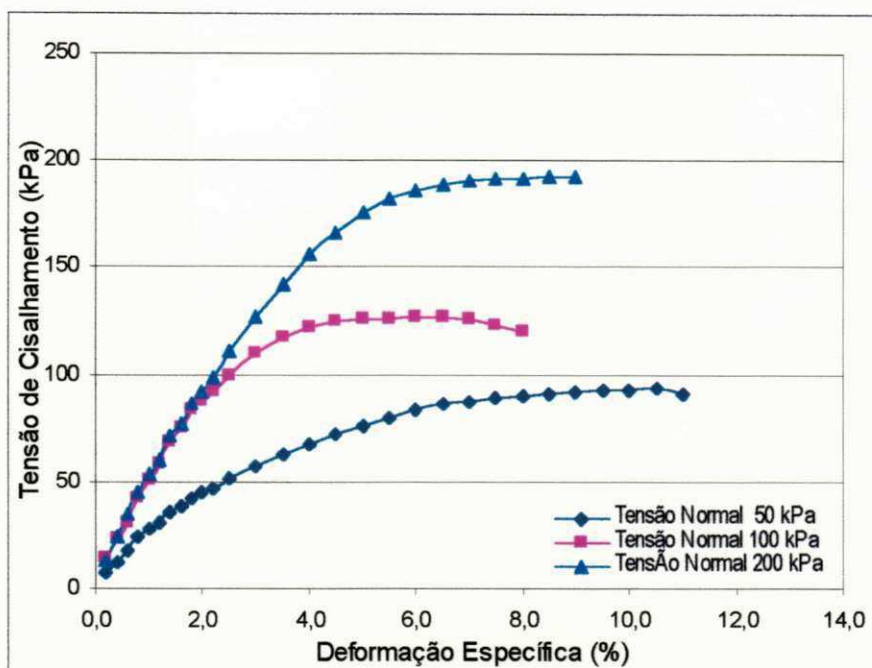


Figura A 25 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

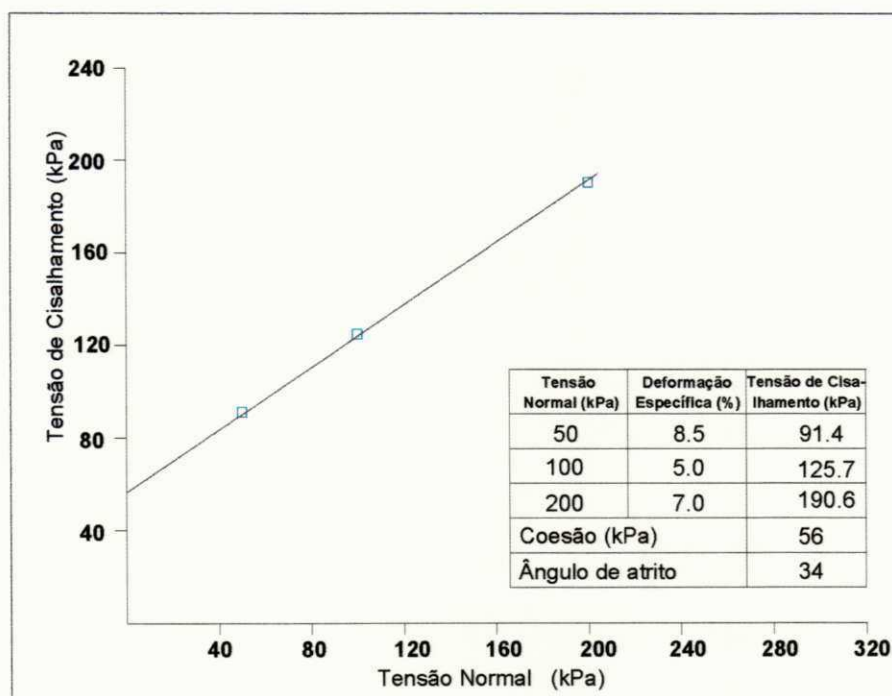


Figura A 26 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

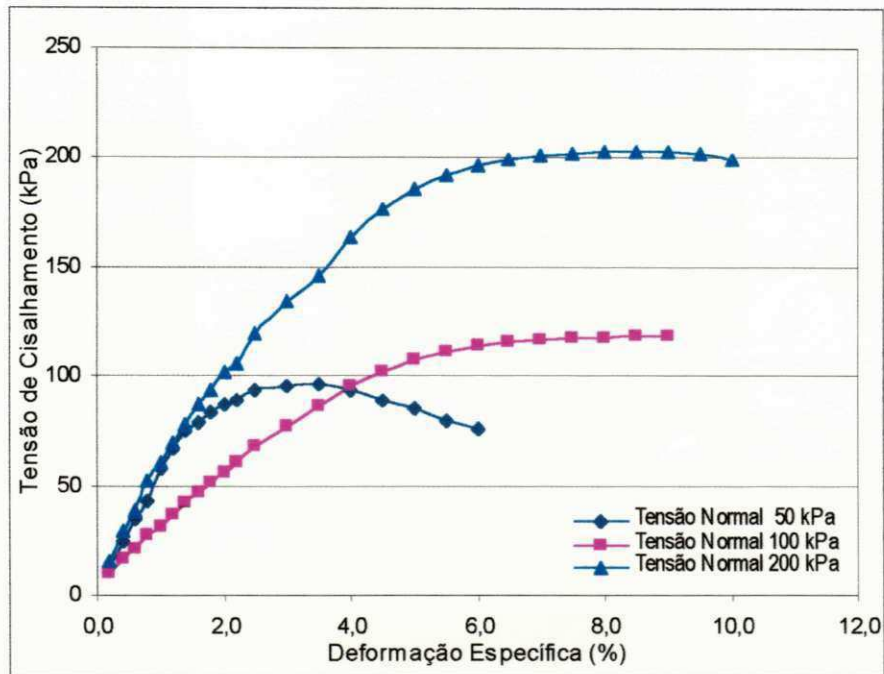


Figura A 27 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

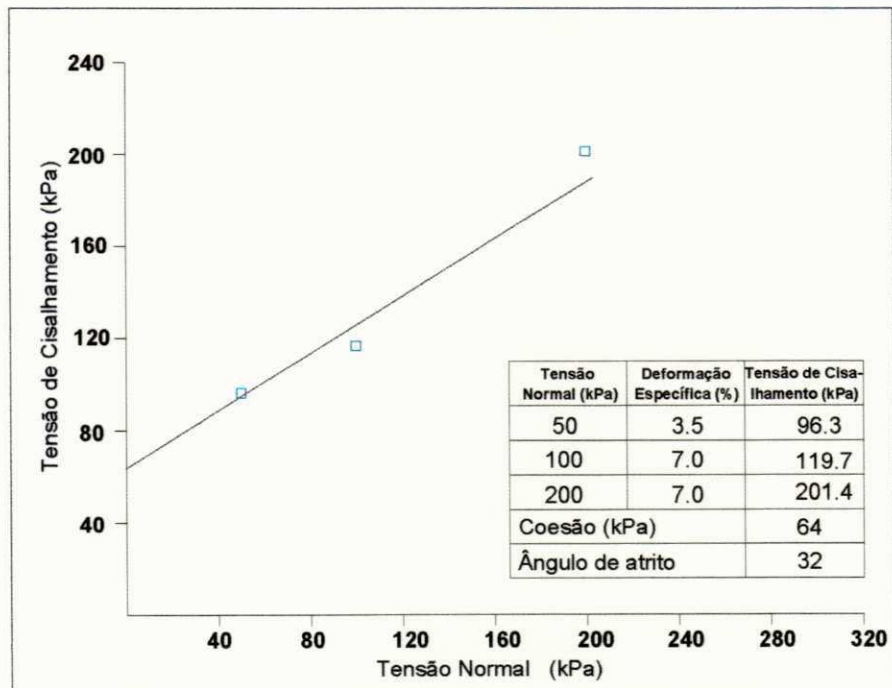


Figura A 28 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 1.

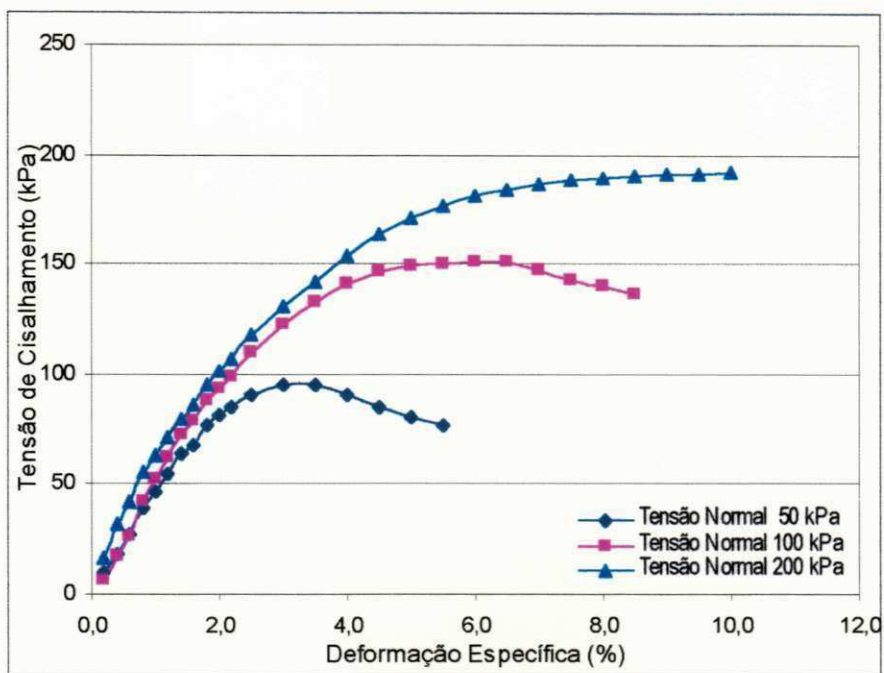


Figura A 29 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

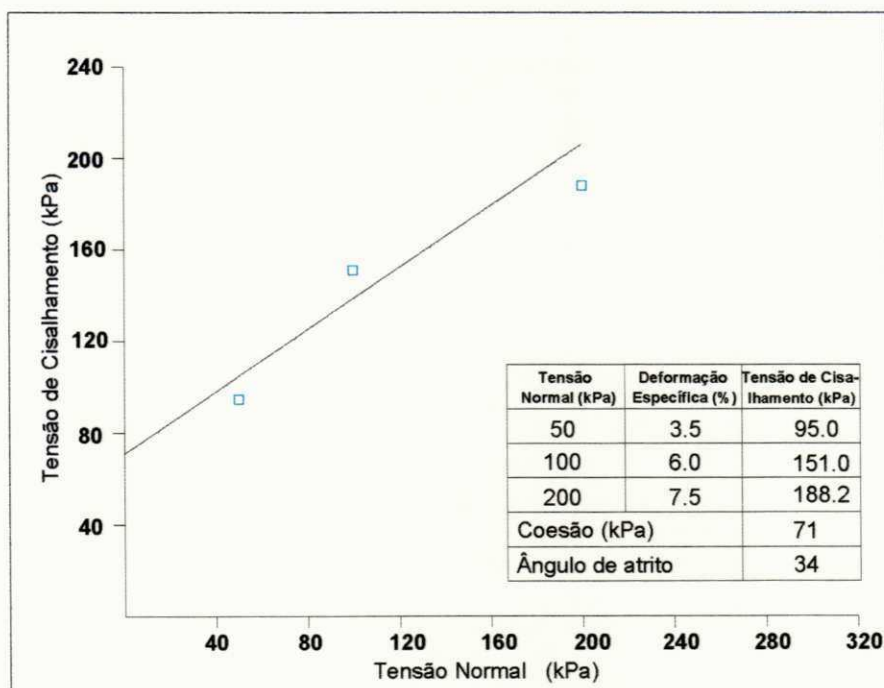


Figura A 30 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 2.

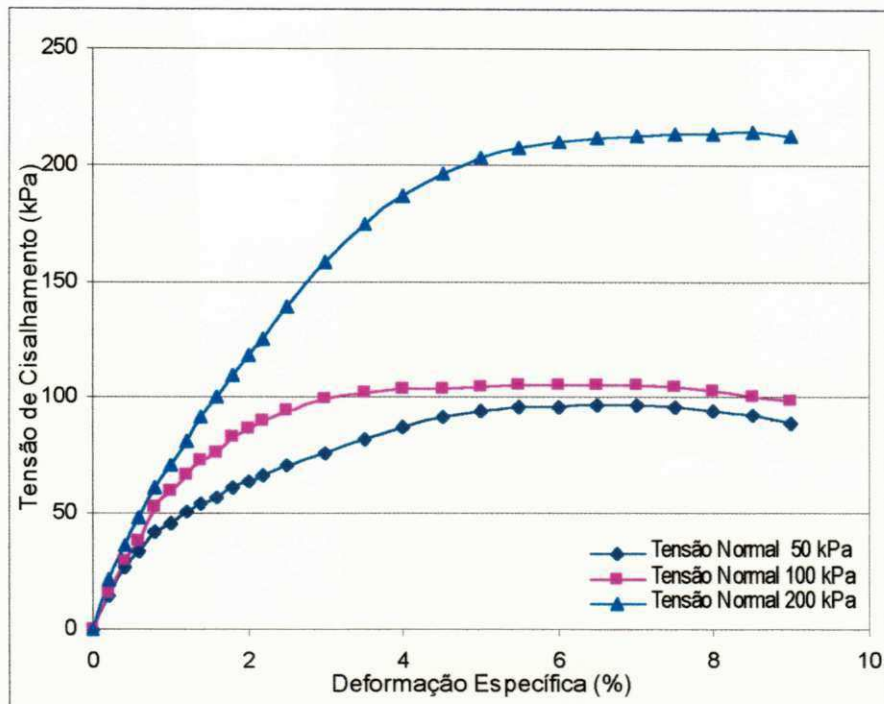


Figura A 31 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

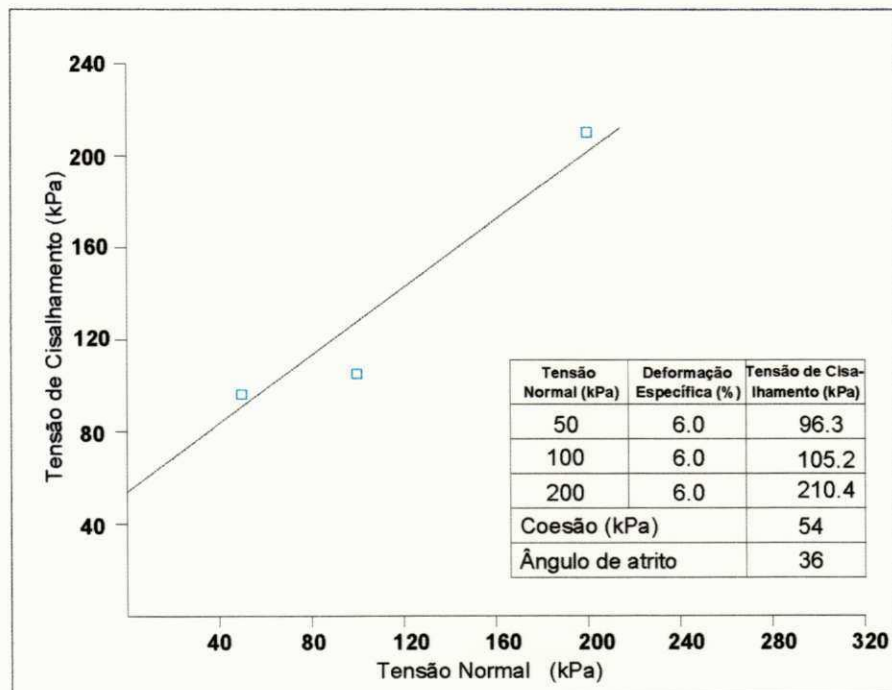


Figura A 32 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã, ensaio 3.

Tabela A 8 - Resultados de ensaios de permeabilidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

Teor de bentonita (%)	Massa específica seca máxima (g/cm ³)	Massa específica de moldagem (g/cm ³)	Grau de compactação (%)	Umidade ótima (%)	Umidade de moldagem (%)	Umidade de saturação (%)	Coefficiente de permeabilidade (cm/s)
0	1,883	1,952	103.4	7,1	9.85	13.55	2.69x10 ⁻⁵
0	1,883	1,941	103.1	7,1	9.85	13.35	4.42x10 ⁻⁵
0	1,883	1,926	102.3	7,1	10.2	15.30	7.60x10 ⁻⁵
2	1,912	1,995	104.3	10,3	9.91	12.93	2.34x10 ⁻⁶
2	1,912	1,990	104.1	10,3	9.91	12.62	1.34x10 ⁻⁶
2	1,912	1,963	102.3	10,3	10.5	13.10	6.26x10 ⁻⁶
4	1,863	1,936	103.9	11,7	10.23	14.74	2.23x10 ⁻⁶
4	1,863	1,896	101.8	11,7	10.23	14.70	5.36x10 ⁻⁶
4	1,863	1,933	103.8	11,7	10.6	13.50	6.97x10 ⁻⁶
6	1,851	1,923	103.9	11,4	11.36	16.46	2.01x10 ⁻⁷
6	1,851	1,893	102.3	11,4	11.40	16.80	2.00x10 ⁻⁷
6	1,851	1,890	102.1	11,4	11.37	16.60	5.11x10 ⁻⁷
8	1,828	1,886	103.2	12,5	11.39	17.61	1.24x10 ⁻⁶
8	1,828	1,869	102.2	12,5	11.41	16.73	7.38x10 ⁻⁷
8	1,828	1,843	100.8	12,5	11.00	17.10	8.93x10 ⁻⁷

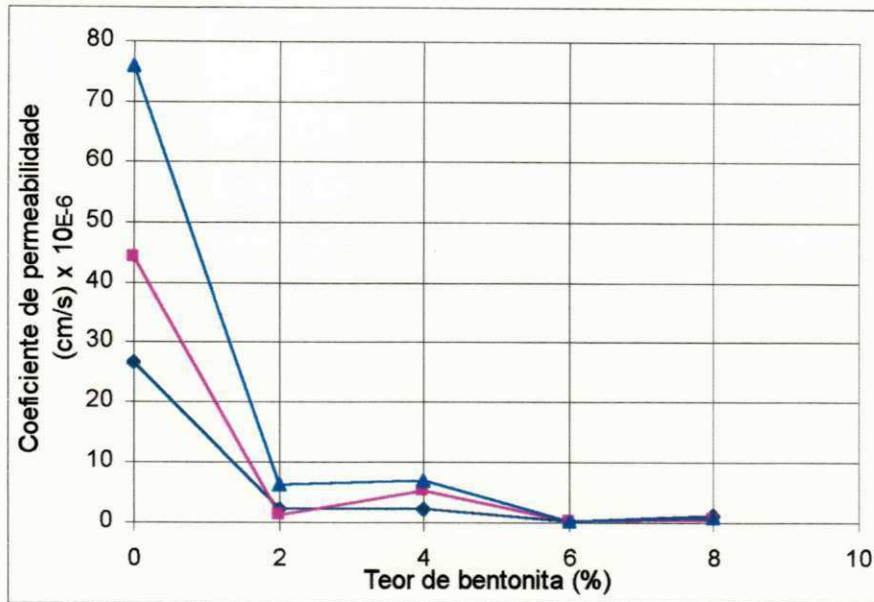


Figura A 33 – Coeficientes de permeabilidade (10^{-6} cm/s) em função de teor de bentonita nas misturas entre solo e bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem Milhã.

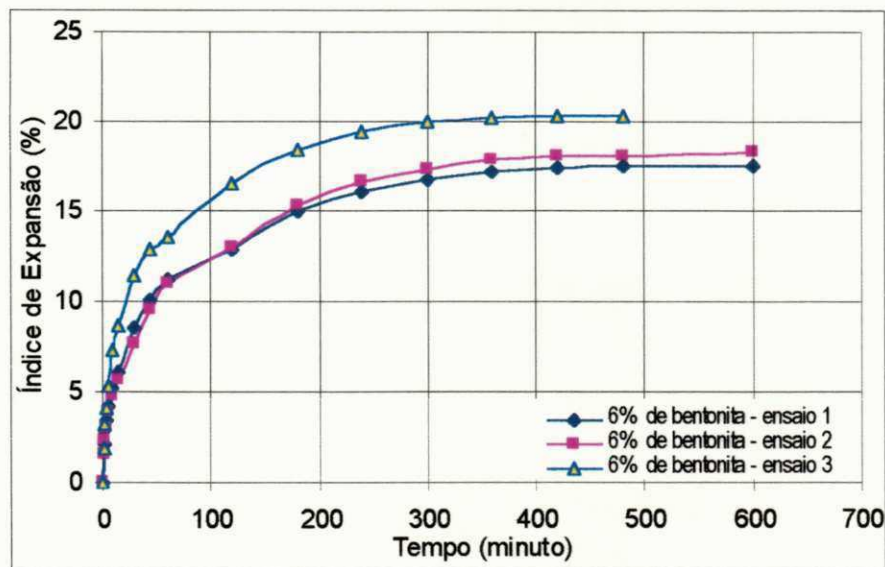


Figura A 34 – Índice de expansão em função do tempo para misturas com 0% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

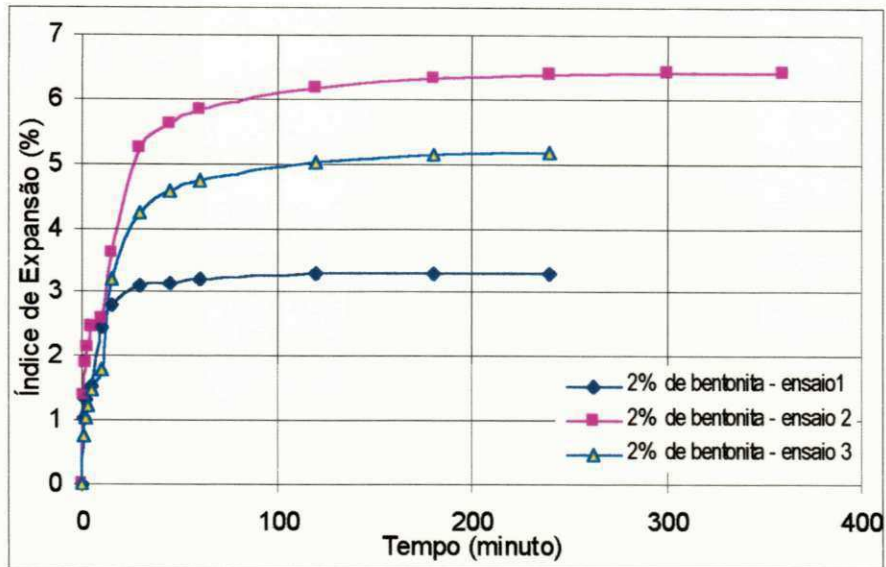


Figura A 35 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

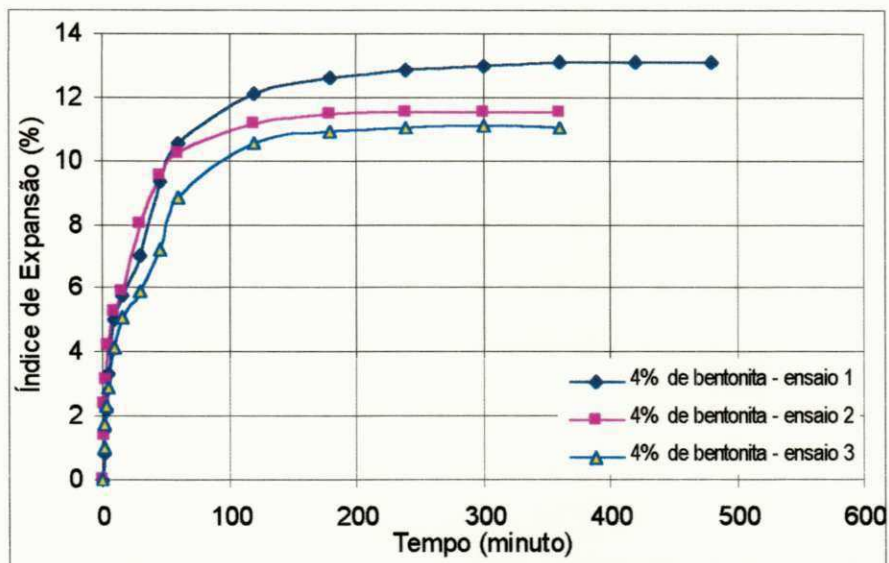


Figura A 36 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

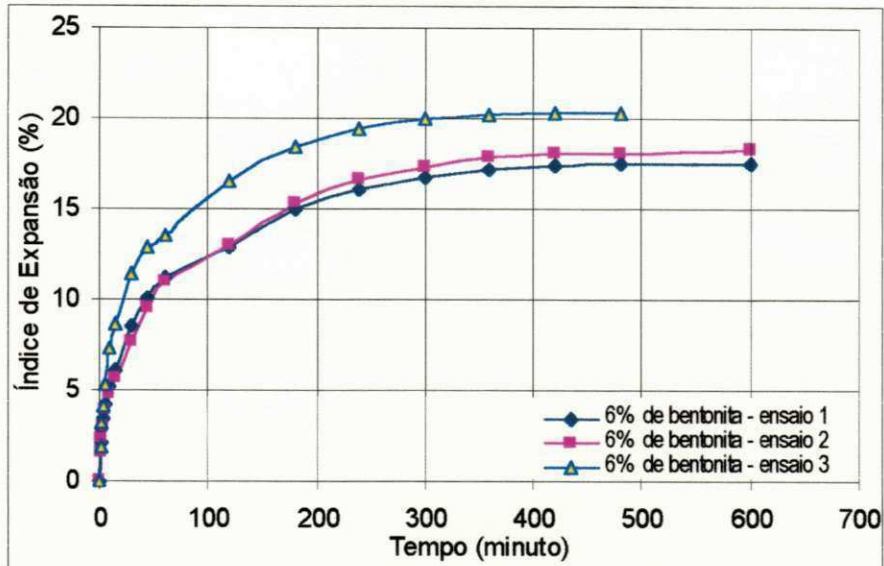


Figura A 37 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

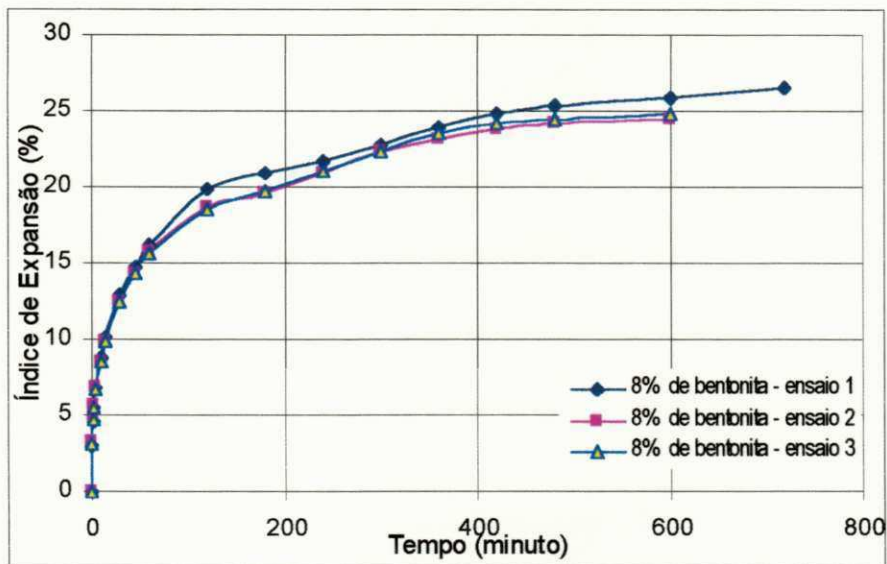


Figura A 38 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida da Barragem de Milhã.

2 RESULTADOS DE ENSAIOS SOBRE SOLOS E MISTURAS ENTRE SOLO E BENTONITA – JAZIDA DO SHOPPING CENTER

As Tabela A 9 até a Tabela A 16 e as Figura A 39 até a Figura A 76 resumem e ilustram os resultados obtidos em ensaios para estimar propriedades físicas de solos e misturas entre solo e bentonita, amostras de solo provenientes da área de construção do Shopping Center.

Tabela A 9 - Resultados obtidos de granulometria de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Teor de bentonita (%)	% que passa abertura de 4,8 mm	% que passa abertura de 2,0 mm	% que passa abertura de 0,42 mm	% que passa abertura de 0,15 mm	% que passa abertura de 0,075 mm
0	99.56	93.93	56.23	33.85	17.72
0	99.60	94.56	52.91	32.71	18.14
2	99.57	94.05	57.11	35.17	19.37
2	99.61	94.67	53.85	34.06	19.78
4	99.58	94.17	57.98	36.50	21.01
4	99.62	94.78	54.79	35.40	21.41
6	99.59	94.29	58.86	37.82	22.66
6	99.62	94.89	55.74	36.75	23.05
8	99.60	94.42	59.73	39.14	24.30
8	99.63	95.00	56.68	38.09	24.69

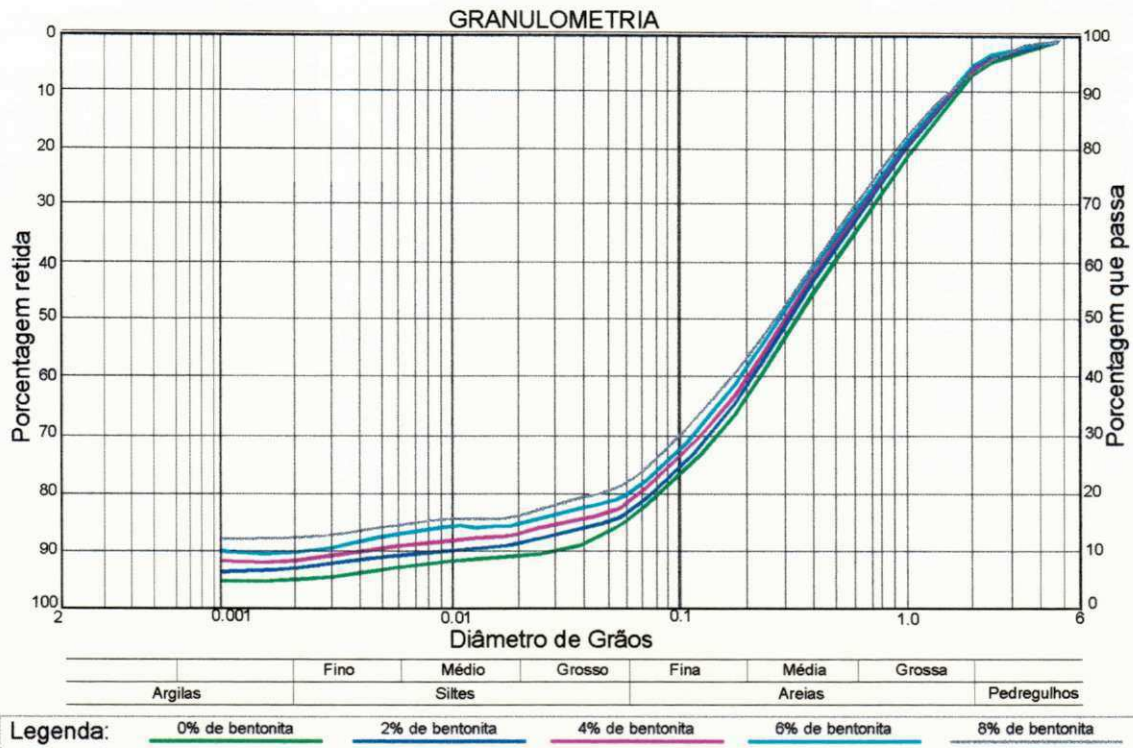


Figura A 39 - Distribuição granulométrica de solos e misturas entre solo e bentonita sobre amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Tabela A 10 - Limites de liquidez e limites de plasticidade de solos e misturas entre solo e bentonita sobre amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Teor de bentonita (%)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
0	NL	NP	-
0	NL	NP	-
2	19.3	NP	-
2	19.0	NP	-
4	24.1	NP	-
4	23.9	NP	-
6	27.6	20.8	6.8
6	28.6	20.0	8.6
8	33.7	23.9	9.8
8	34.0	24.3	9.7

Tabela A 11 - Resistência à compressão simples para solos de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.955	6.3	98.2	52
02	1.964	5.8	98.6	43
03	1.969	6.1	98.9	43
04	1.933	6.3	97.1	35
05	1.925	5.9	96.7	43
06	1.947	6.3	97.8	43
07	1.938	6.0	97.3	43
08	1.927	5.9	96.8	52
09	1.944	6.4	97.6	46
10	1.953	5.9	98.1	43

Tabela A 12 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.989	9.3	101.2	153
02	1.994	9.4	101.4	140
03	1.989	10.2	101.2	153
04	1.978	10.4	100.6	125
05	1.975	10.1	100.5	122
06	1.977	9.6	100.6	127
07	1.978	9.2	100.6	122
08	1.978	10.2	100.6	141
09	1.981	10.4	100.8	125
10	1.963	10.4	99.8	148

Tabela A 13 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm ³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.881	12.6	98.2	178
02	1.874	12.7	97.9	166
03	1.884	12.1	98.4	171
04	1.899	11.4	99.2	160
05	1.867	12.1	97.5	163
06	1.864	12.3	97.3	161
07	1.871	12.8	97.7	168
08	1.878	12.3	98.1	145
09	1.869	11.6	97.6	161
10	1.885	11.9	98.4	151

Tabela A 14 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm ³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.816	12.1	96.7	178
02	1.856	11.9	98.8	204
03	1.822	12.0	97.0	216
04	1.872	11.3	99.6	204
05	1.810	12.5	96.3	191
06	1.870	11.9	99.5	203
07	1.883	11.5	100.2	216
08	1.812	12.1	96.4	191
09	1.837	12.0	97.8	204
10	1.862	12.3	99.1	229

Tabela A 15 – Resistência à compressão simples para solos e misturas entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Corpo de Prova	Massa Específica (g/cm ³)	Umidade de Moldagem (%)	Grau de Compactação (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)
01	1.805	12.1	97.1	140
02	1.848	12.1	99.4	115
03	1.794	12.2	96.5	140
04	1.817	12.0	97.7	178
05	1.845	12.2	99.2	140
06	1.842	10.8	99.1	166
07	1.813	11.6	97.5	153
08	1.837	12.0	98.8	178
09	1.849	11.7	99.5	140
10	1.828	11.9	98.3	178

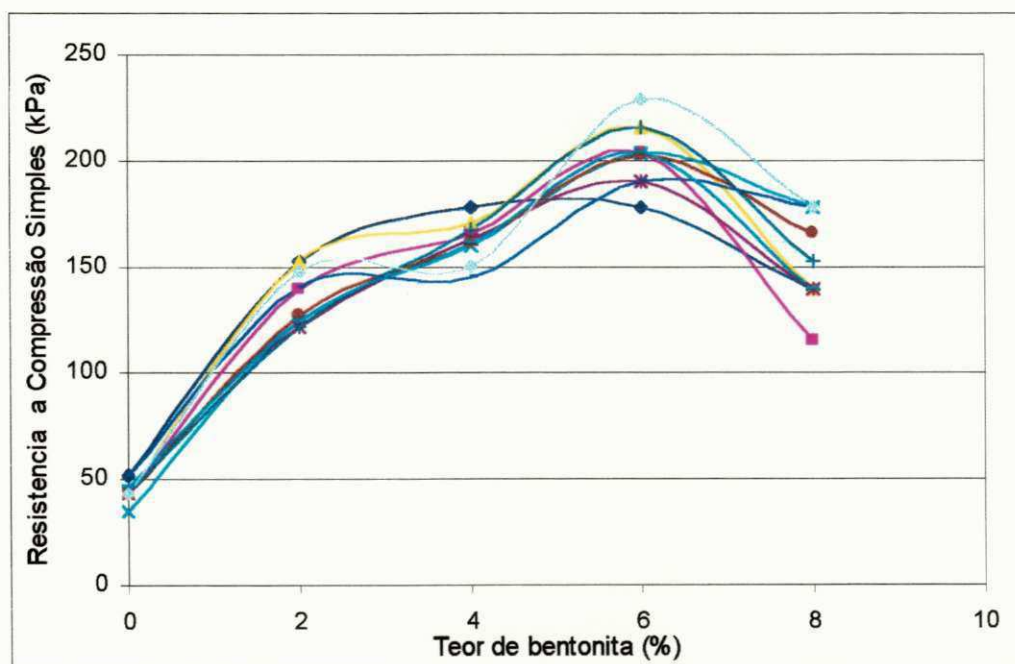


Figura A 40 – Resistência à compressão simples de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

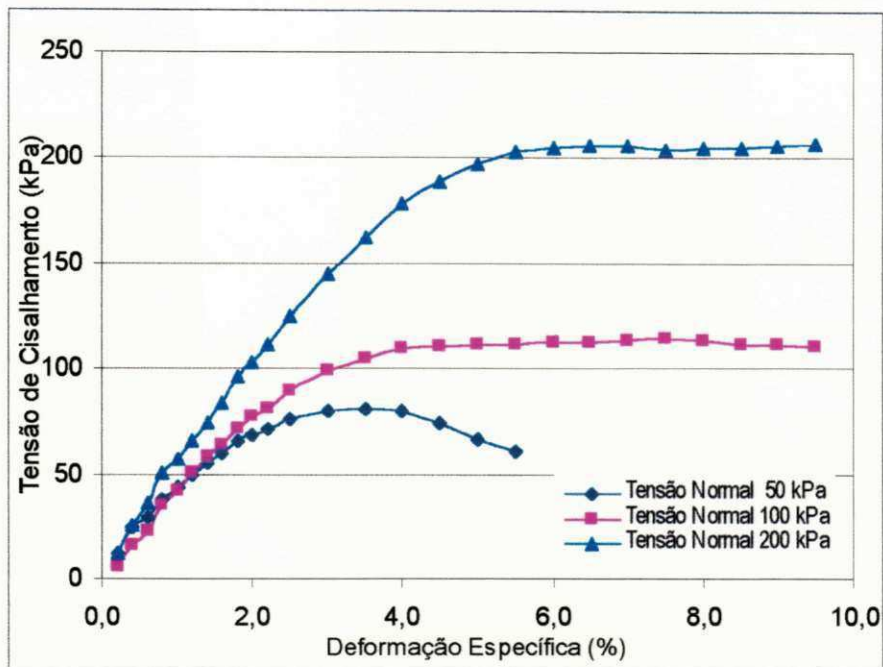


Figura A 41 – Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

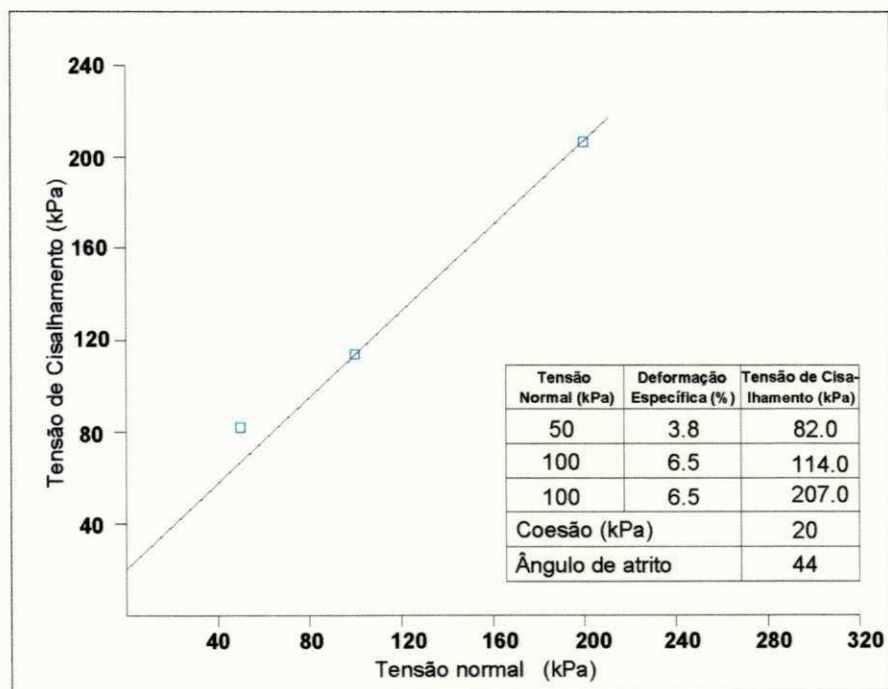


Figura A 42 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

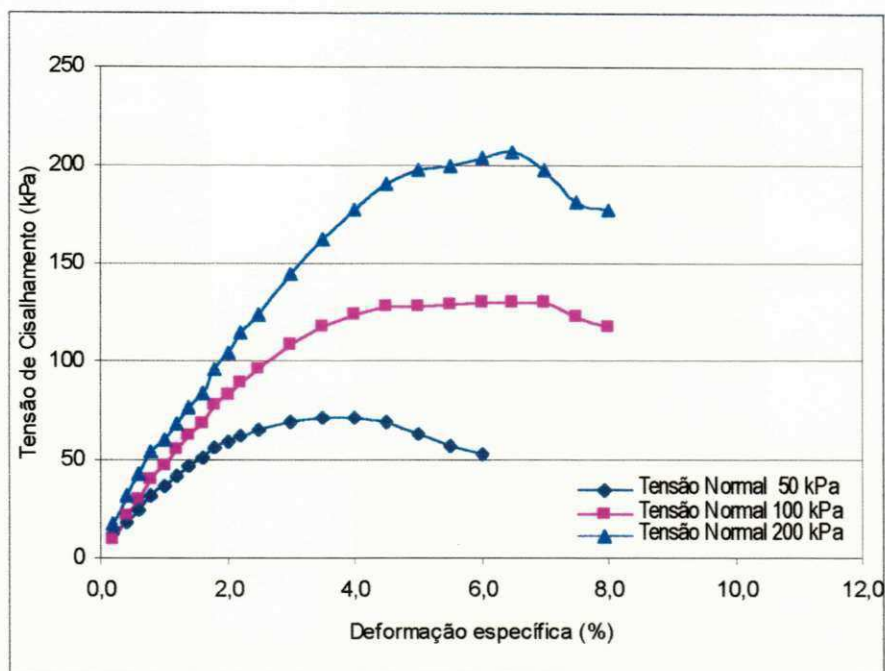


Figura A 43 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

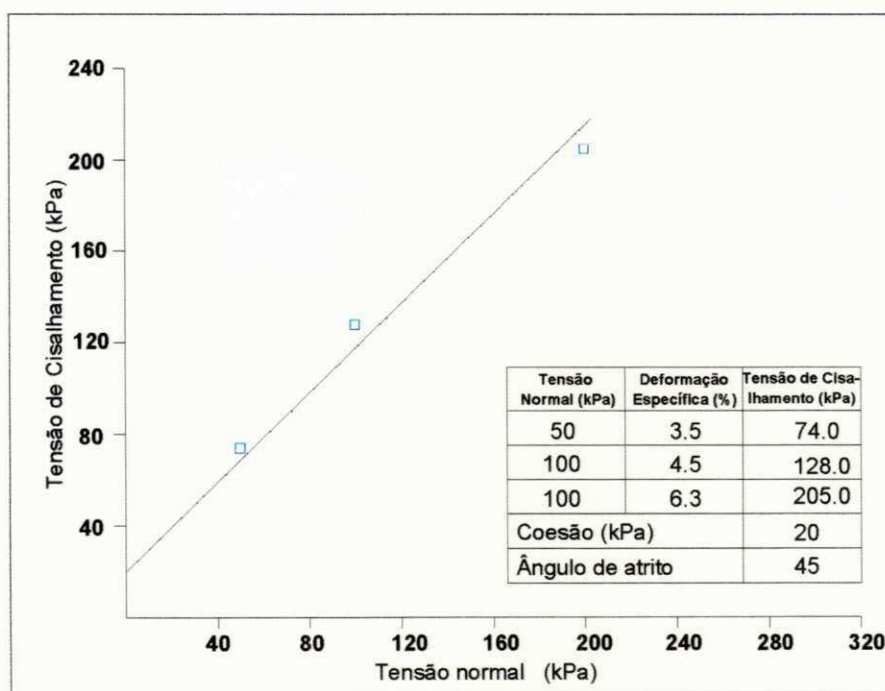


Figura A 44 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

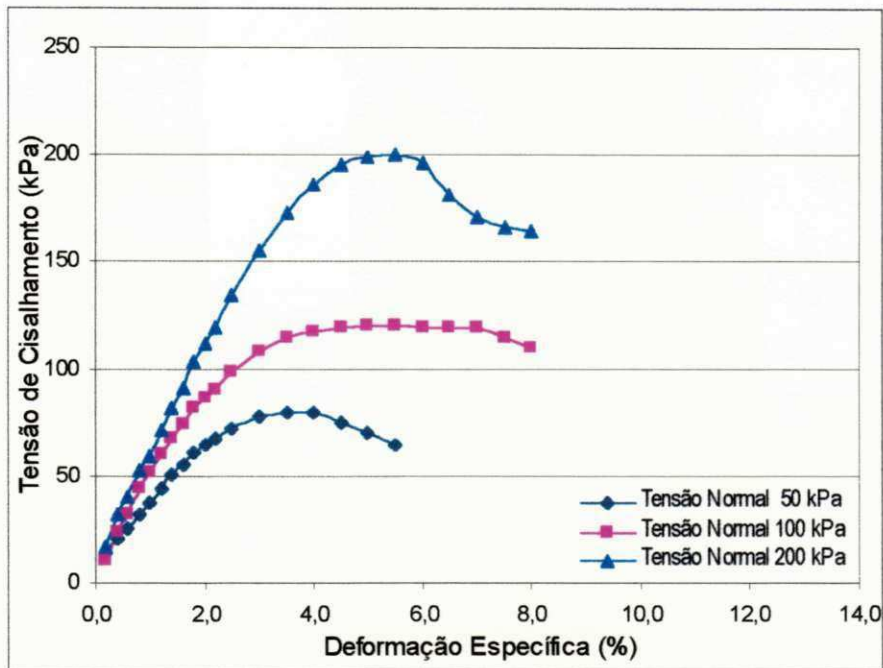


Figura A 45 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

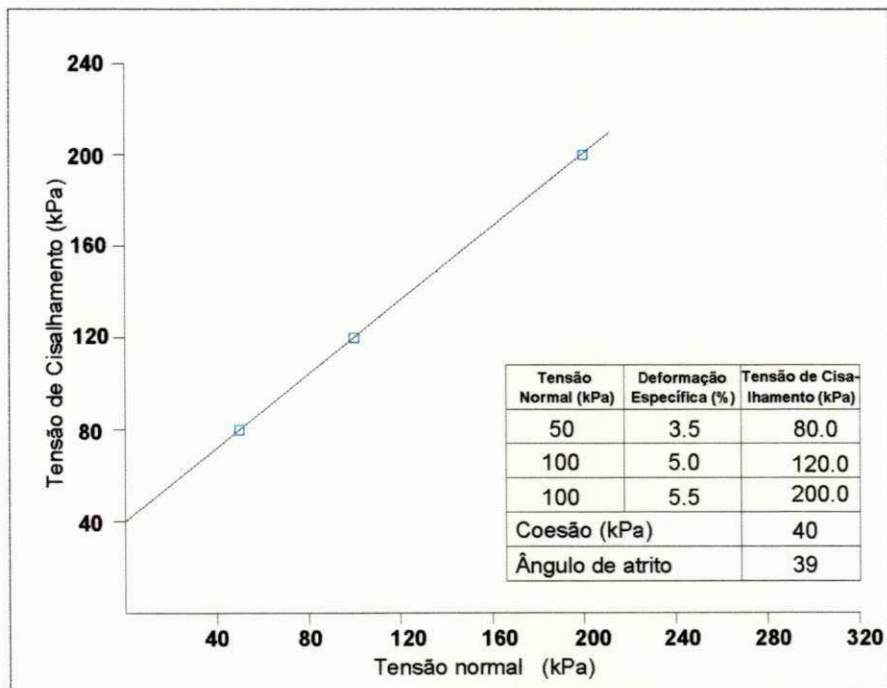


Figura A 46 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de solos provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

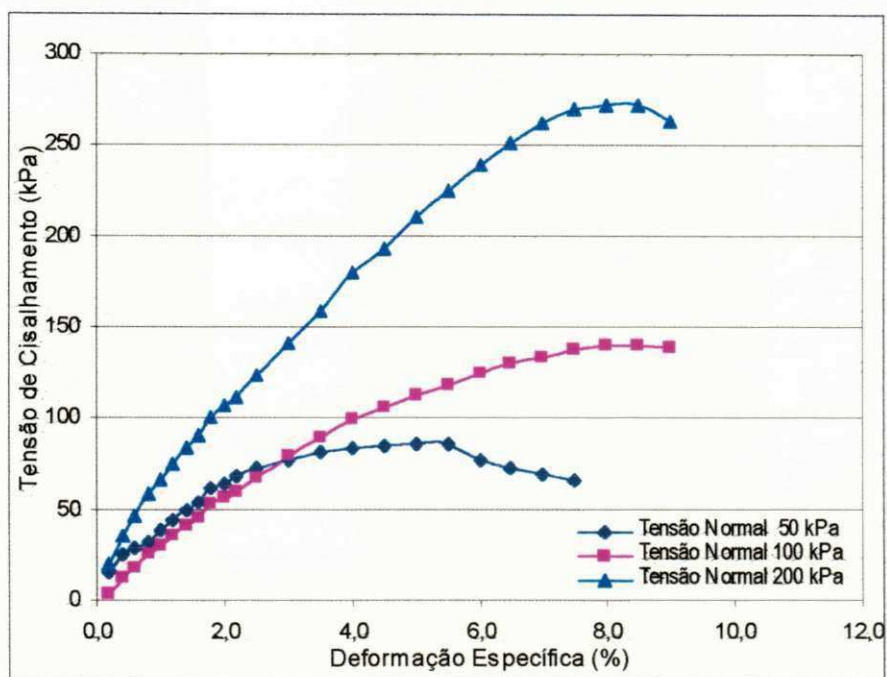


Figura A 47 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

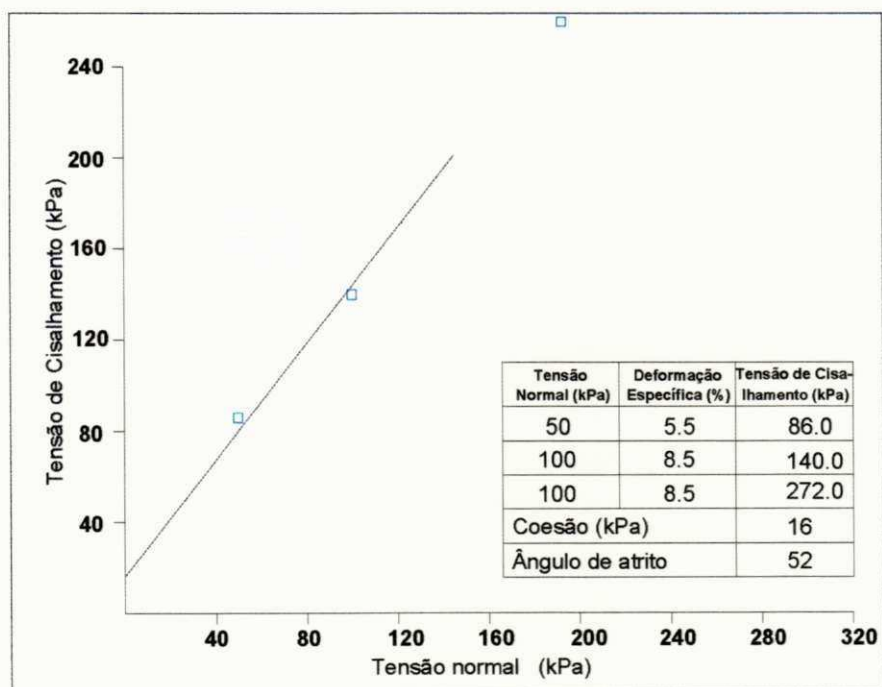


Figura A 48 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

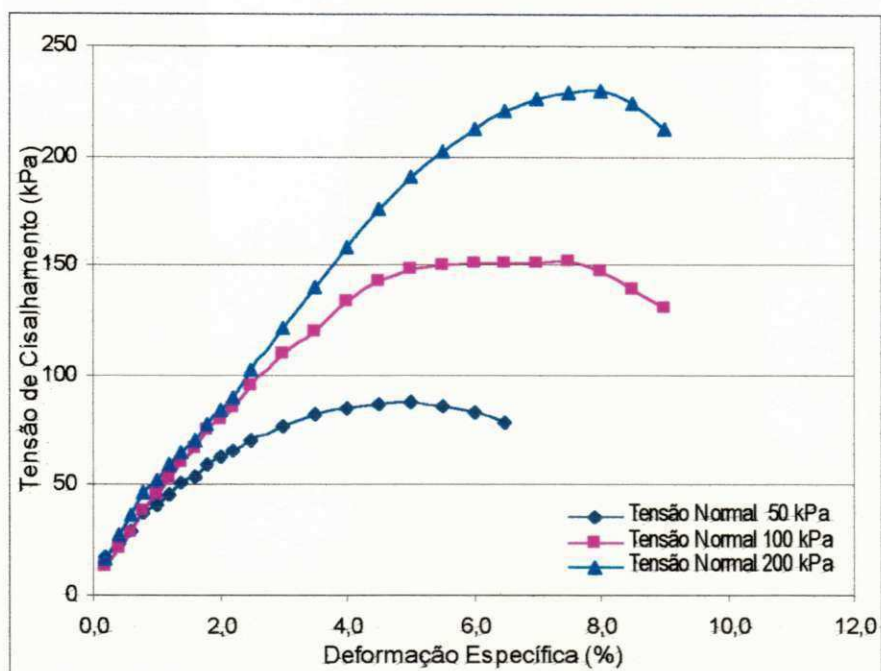


Figura A 49 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

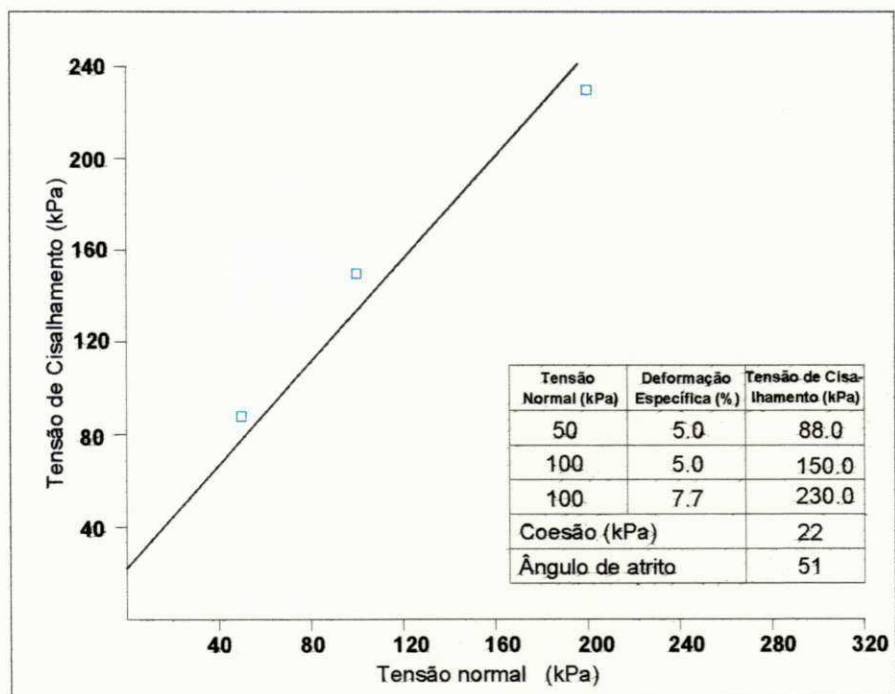


Figura A 50 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

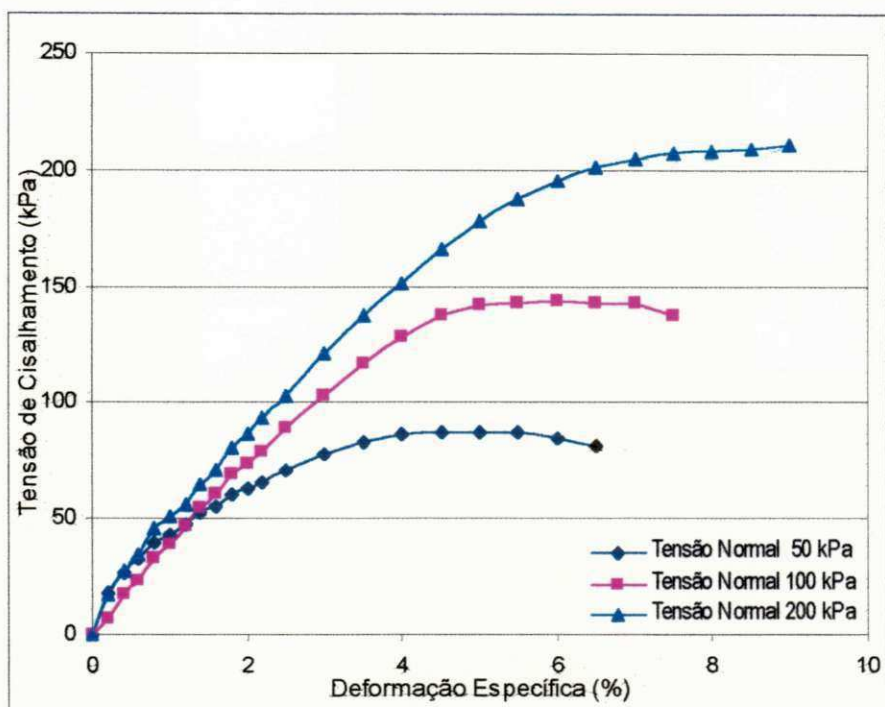


Figura A 51 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

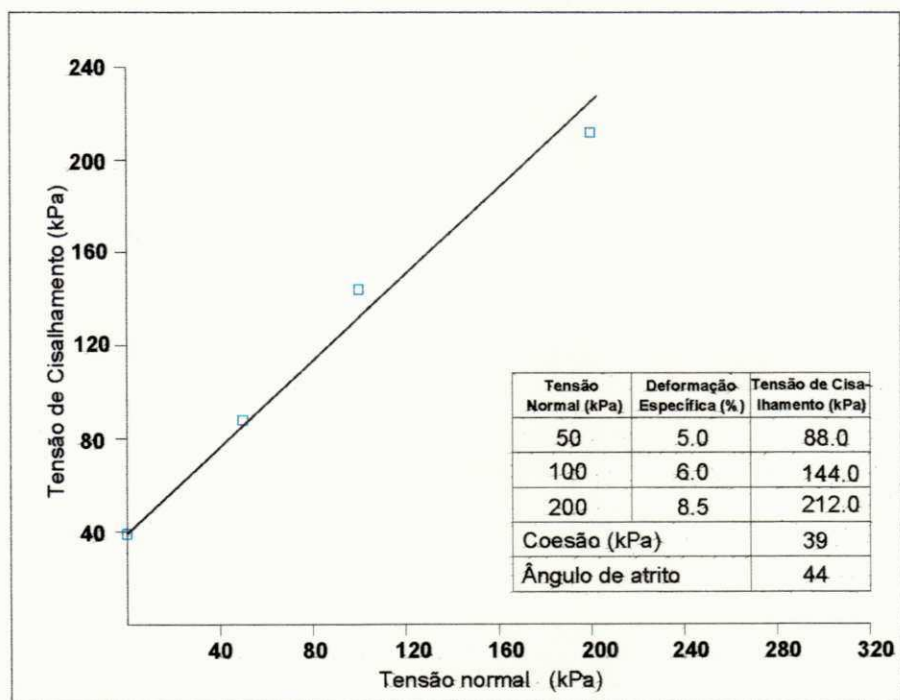


Figura A 52 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

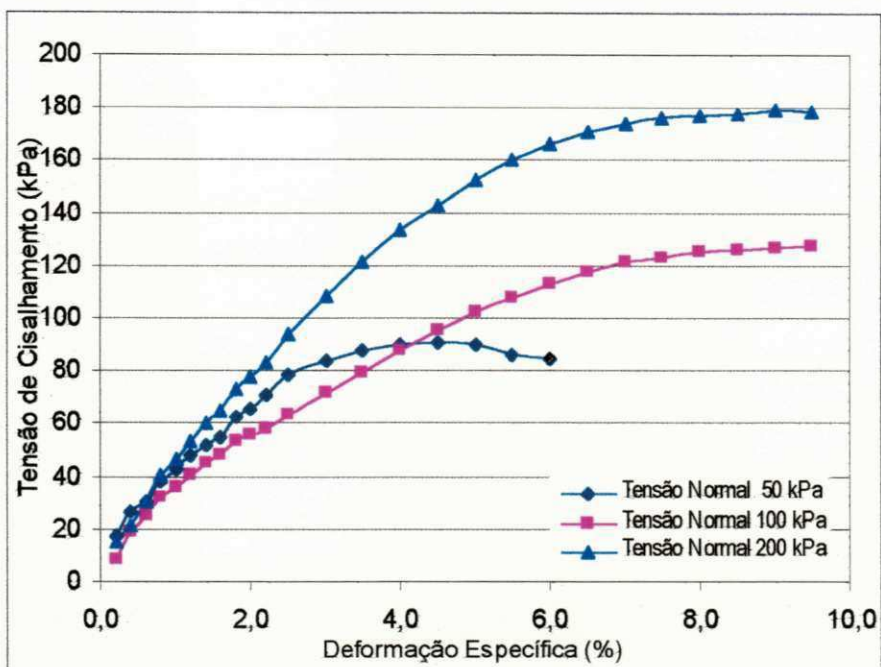


Figura A 53 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

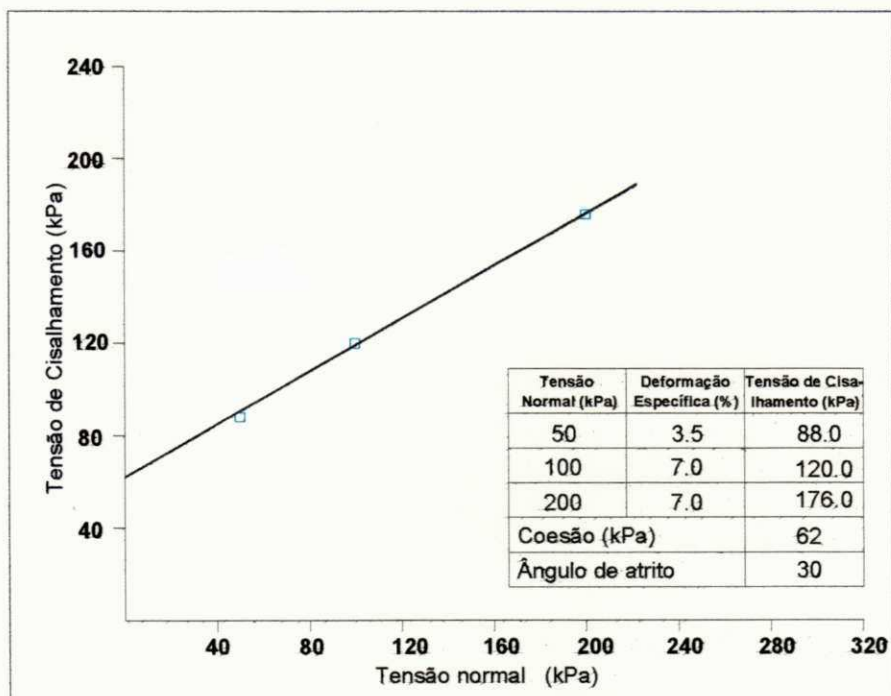


Figura A 54 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

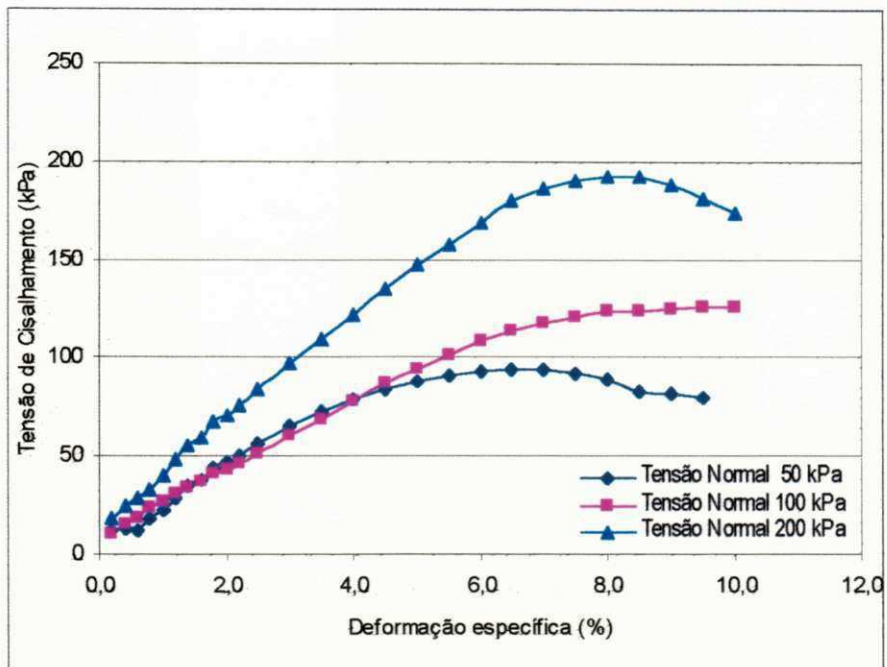


Figura A 55 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

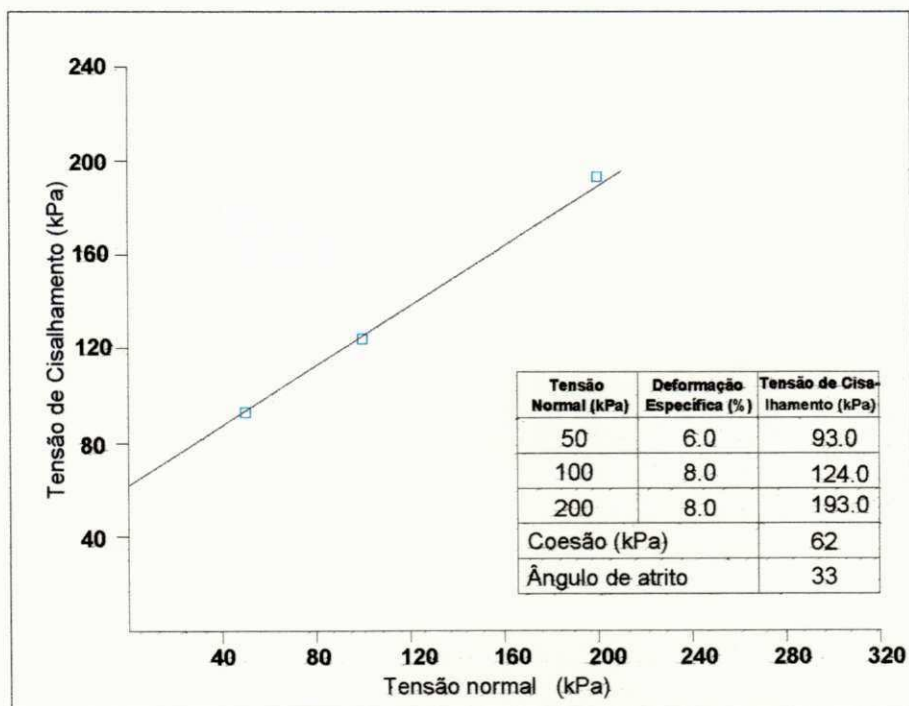


Figura A 56 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

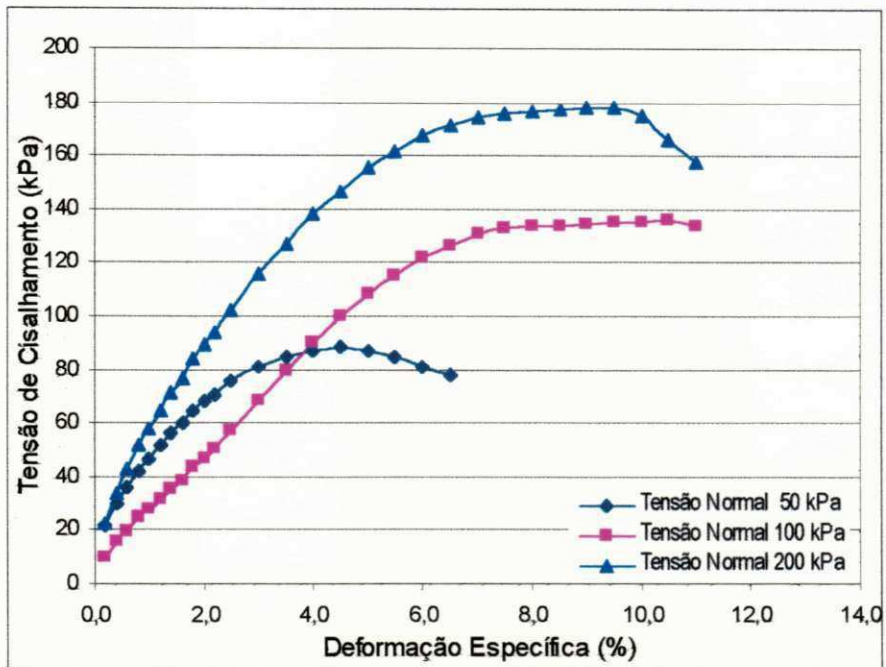


Figura A 57 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

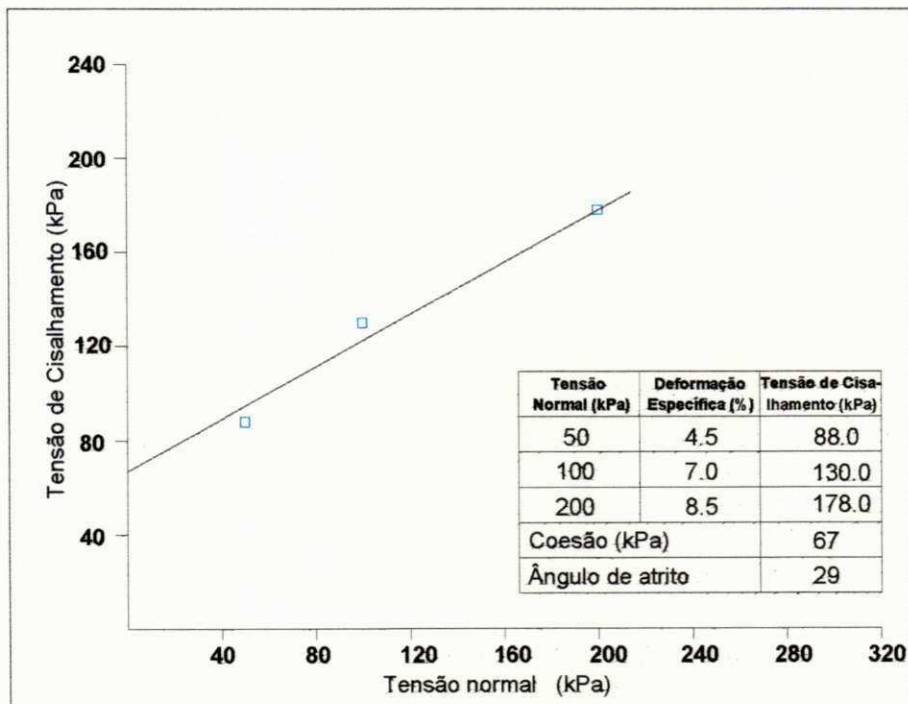


Figura A 58 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

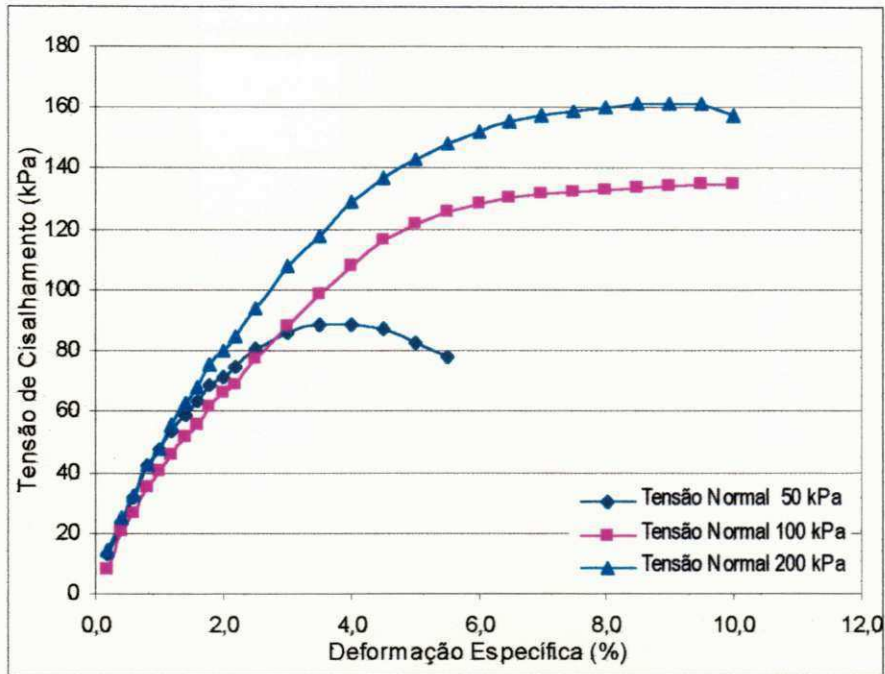


Figura A 59 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

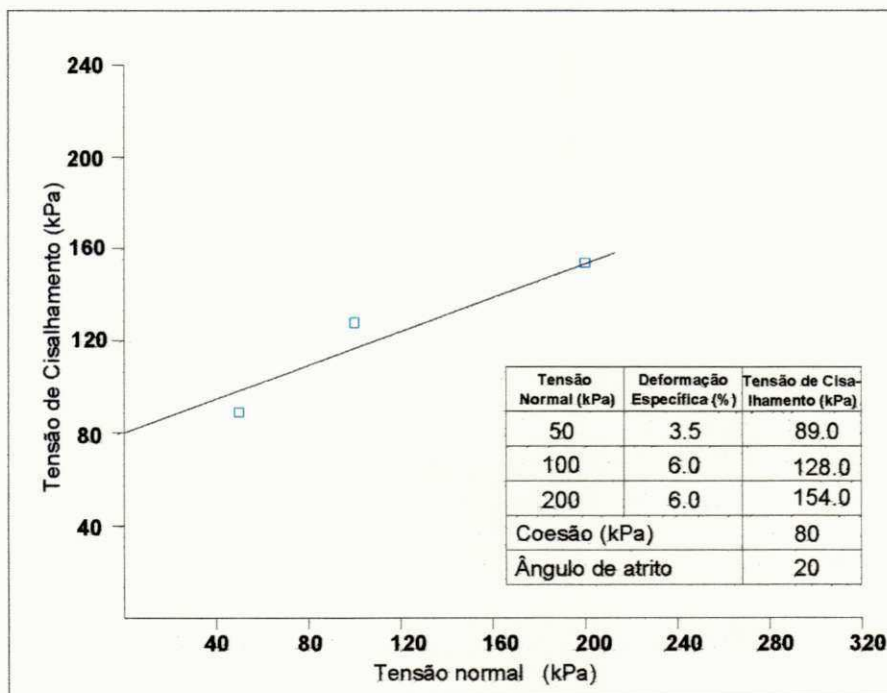


Figura A 60 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

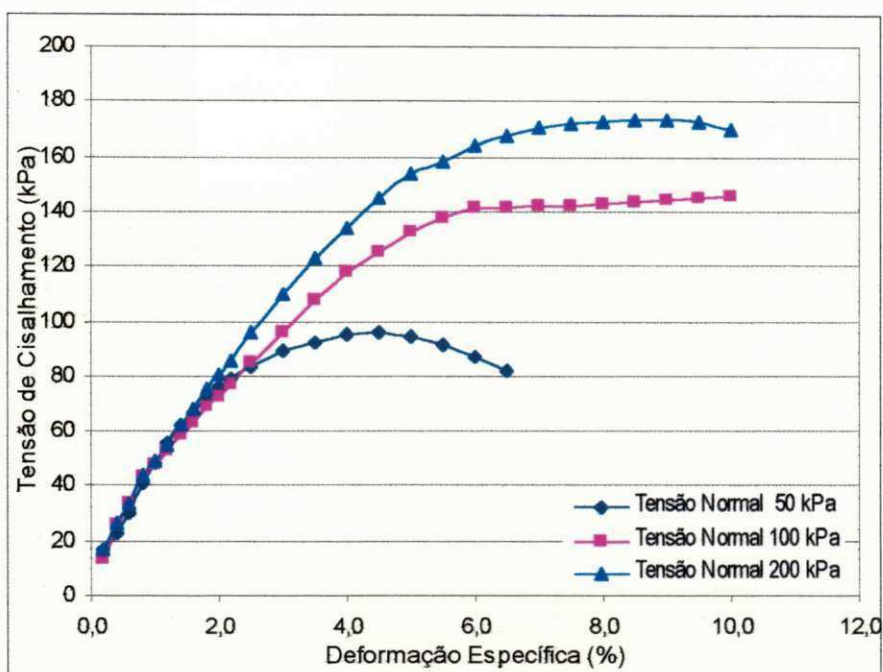


Figura A 61 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

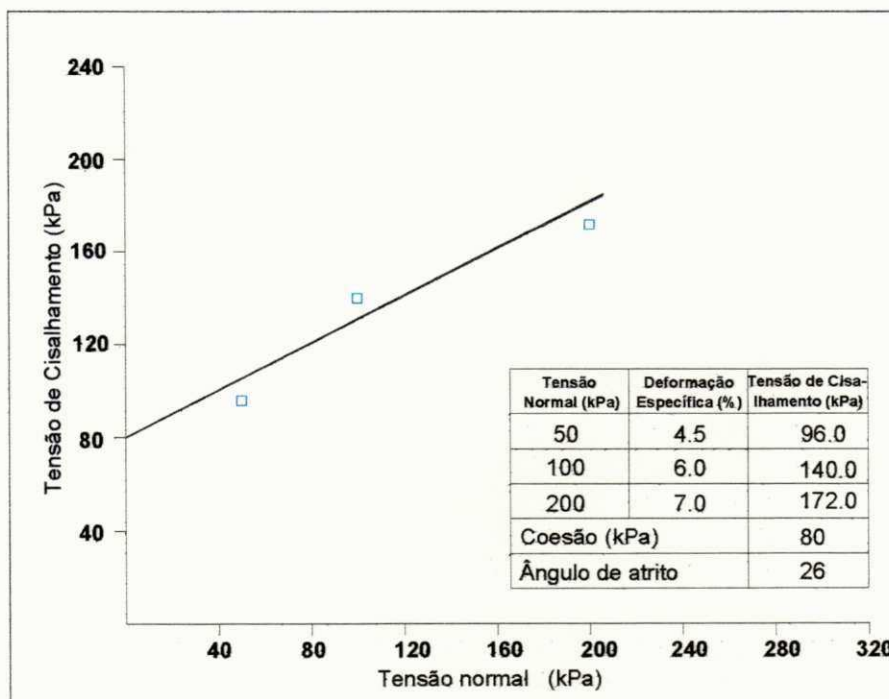


Figura A 62 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

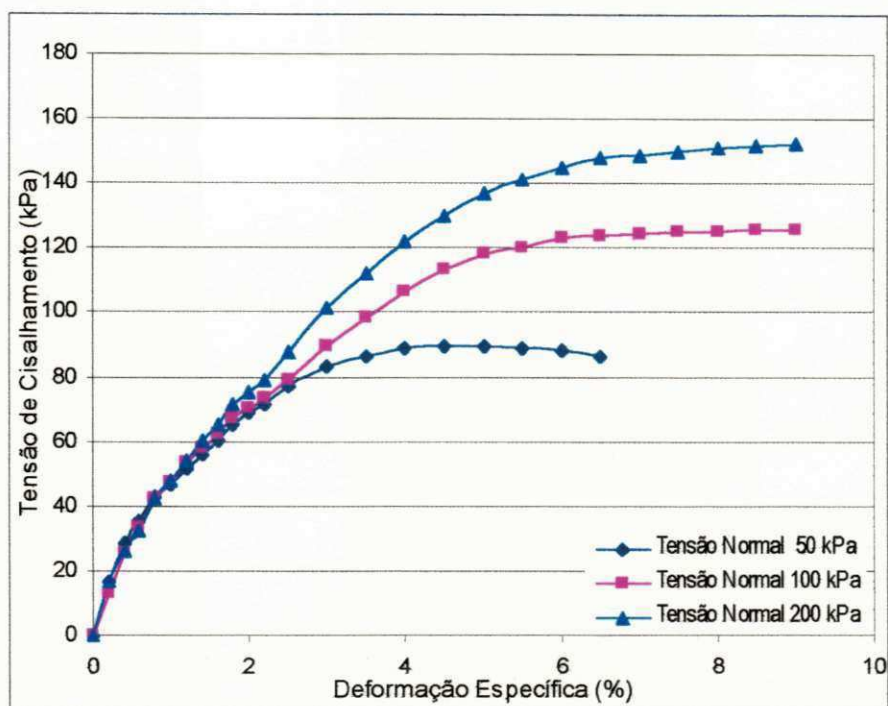


Figura A 63 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

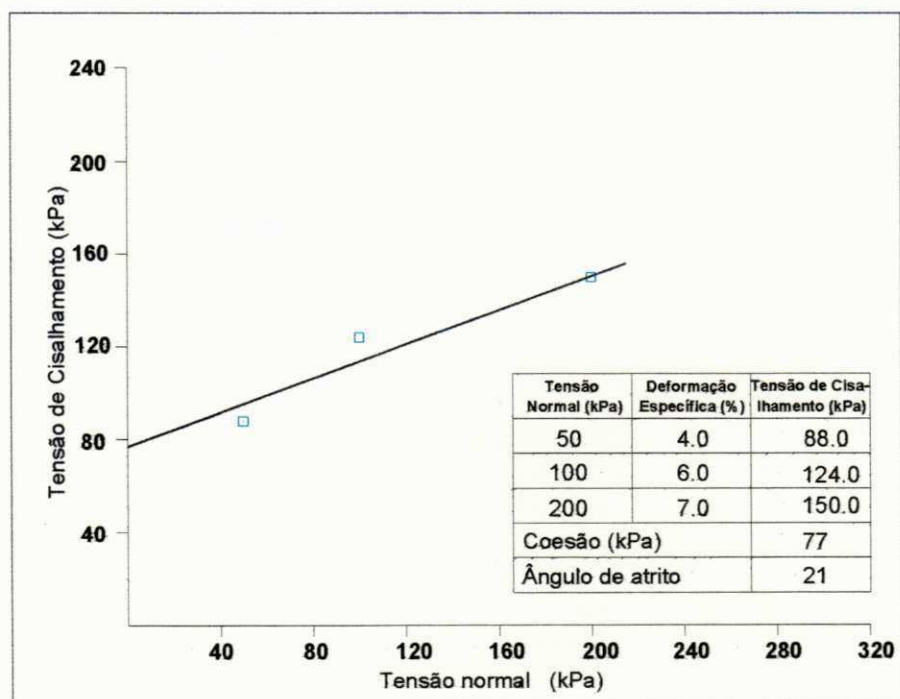


Figura A 64 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

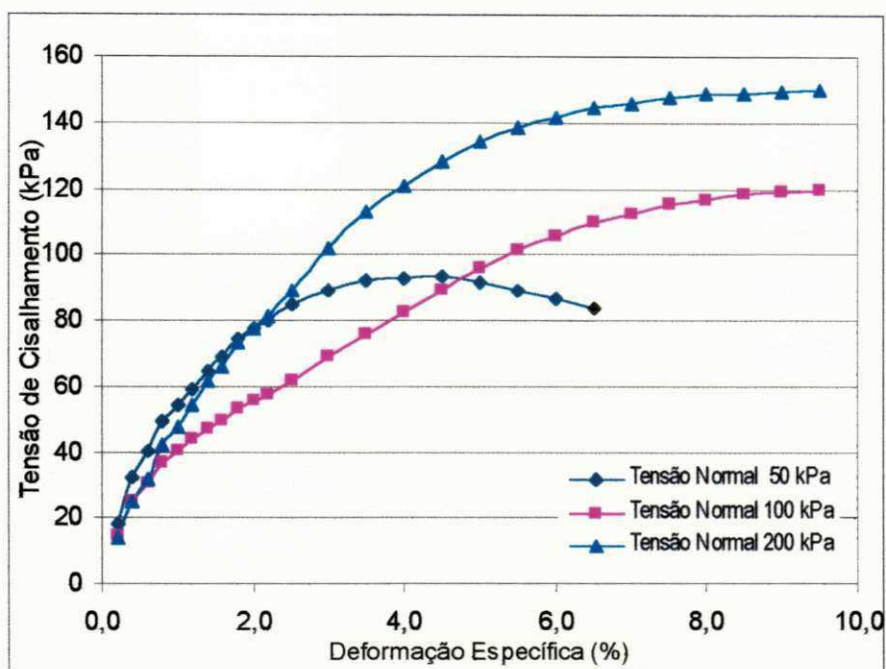


Figura A 65 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

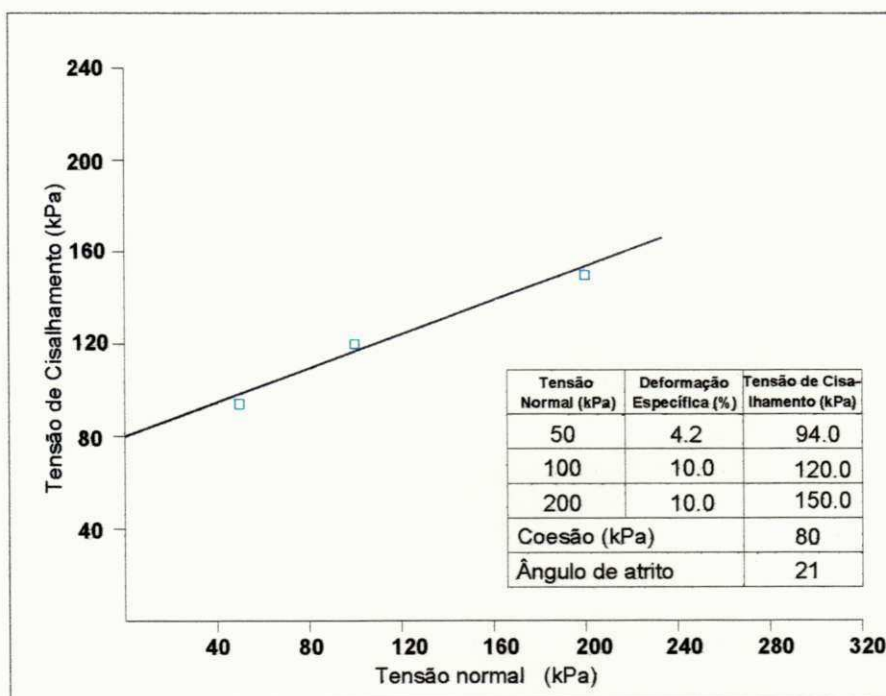


Figura A 66 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 1.

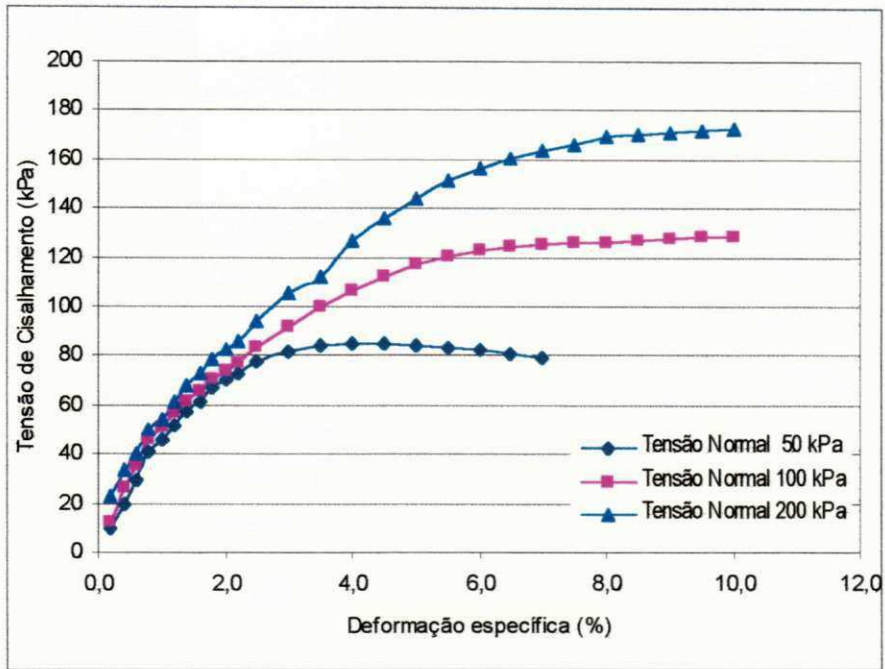


Figura A 67 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

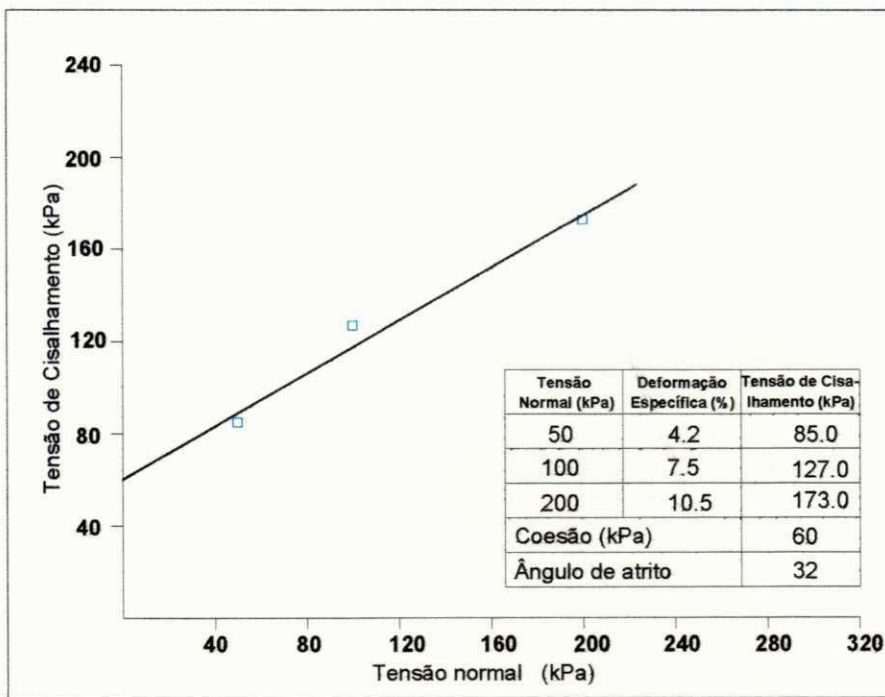


Figura A 68 - Tensão normal em função de tensão de cisalhamento de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 2.

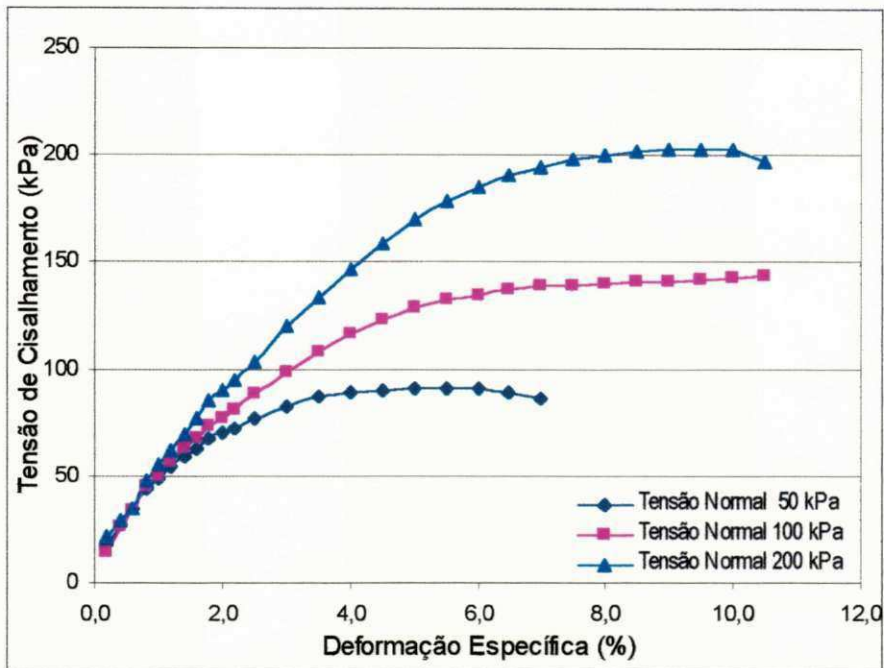


Figura A 69 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

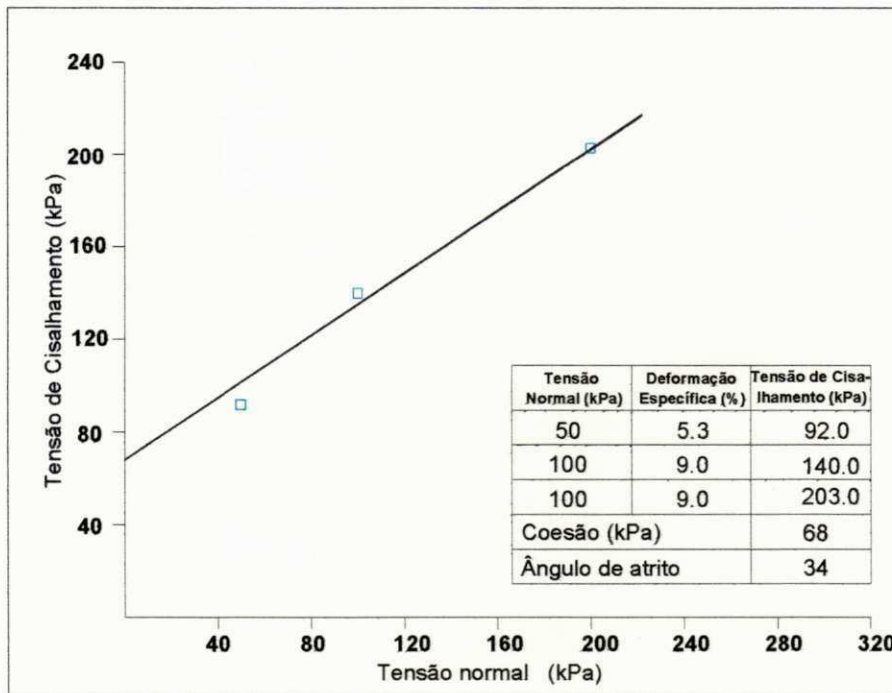


Figura A 70 - Tensão de cisalhamento em função de deformação específica de mistura entre solo e 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center, ensaio 3.

Tabela A 16 - Coeficientes de permeabilidade de solos e misturas entre solo e bentonita de amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

Teor de bentonita (%)	Massa específica seca máxima (g/cm ³)	Massa específica de moldagem (g/cm ³)	Grau de compactação (%)	Umidade ótima (%)	Umidade de moldagem (%)	Umidade de saturação (%)	Coefficiente de permeabilidade (cm/s)
0	1,991	2,003	100,6	7,1	6,5	13,0	1,34x10 ⁻⁴
0	1,991	1,992	100,0	7,1	6,5	12,5	1,46x10 ⁻⁴
0	1,991	2,031	102,0	7,1	7,2	10,3	2,41x10 ⁻⁵
0	1,991	2,023	101,6	7,1	7,2	10,3	5,35x10 ⁻⁵
2	1,996	1,988	101,1	10,3	10,1	11,7	1,00x10 ⁻⁵
2	1,996	2,034	103,0	10,3	10,1	11,4	3,65x10 ⁻⁶
2	1,996	2,039	104,0	10,3	10,0	11,0	2,33x10 ⁻⁶
2	1,996	1,957	99,6	10,3	10,0	11,8	2,74x10 ⁻⁶
4	1,915	1,919	100,2	11,7	11,4	13,9	5,83x10 ⁻⁷
4	1,915	2,005	104,7	11,7	11,4	13,0	2,79x10 ⁻⁸
4	1,915	1,900	99,2	11,7	11,4	14,1	1,08x10 ⁻⁶
4	1,915	1,935	101,1	11,7	11,4	13,3	1,24x10 ⁻⁶
6	1,879	1,884	100,2	11,4	11,0	15,3	5,18x10 ⁻⁷
6	1,879	1,945	103,5	11,4	11,0	13,9	1,01x10 ⁻⁶
6	1,879	1,896	100,9	11,4	10,5	14,2	2,43x10 ⁻⁷
6	1,879	-	-	11,4	11,0	14,8	8,30x10 ⁻⁶
8	1,859	1,862	100,2	12,5	12,6	16,6	1,52x10 ⁻⁷
8	1,859	1,870	100,6	12,5	12,6	16,7	4,30x10 ⁻⁷
8	1,859	1,913	102,9	12,5	11,9	15,9	6,36x10 ⁻⁷
8	1,859	1,923	103,4	12,5	11,9	16,0	1,23x10 ⁻⁷

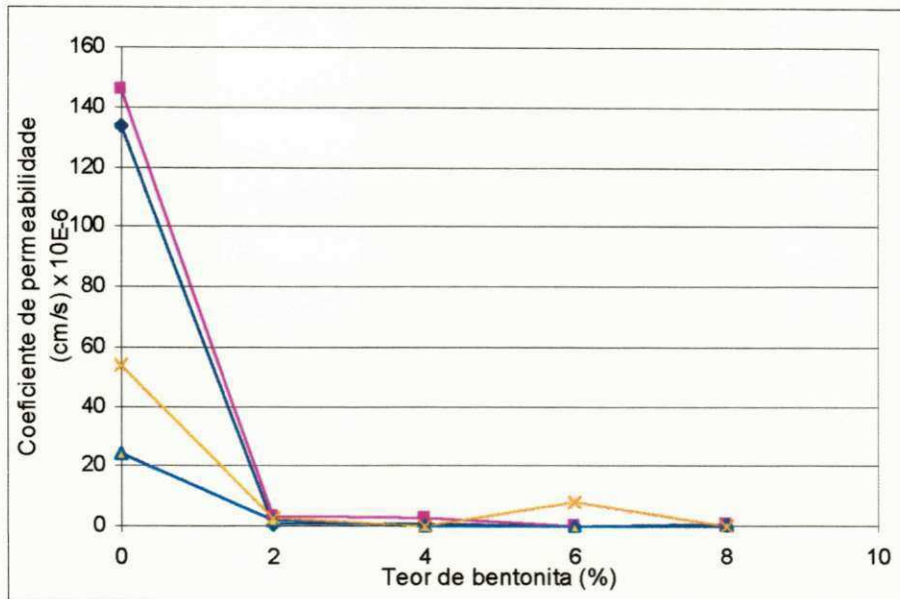


Figura A 71 - Coeficientes de permeabilidade (10^{-6} cm/s) de solos e misturas entre solo e bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

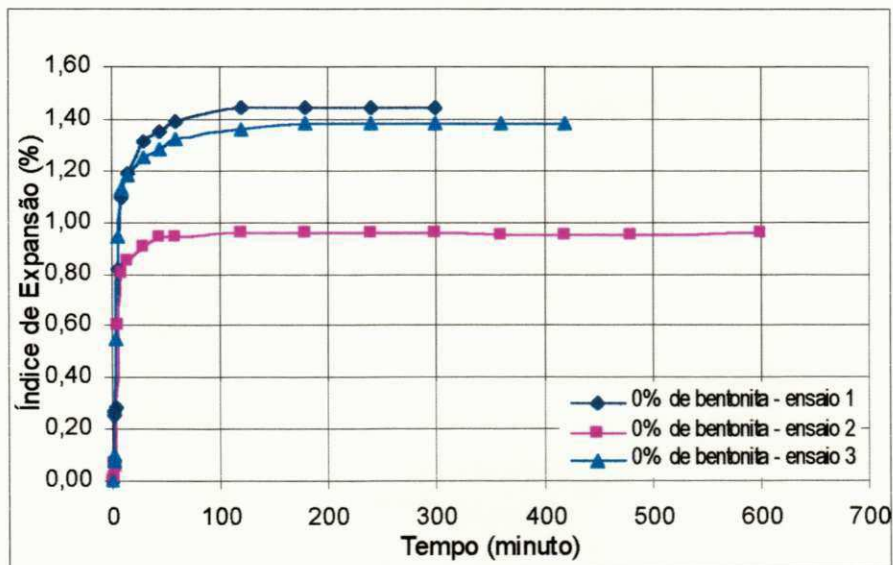


Figura A 72 - Índice de expansão em função do tempo, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

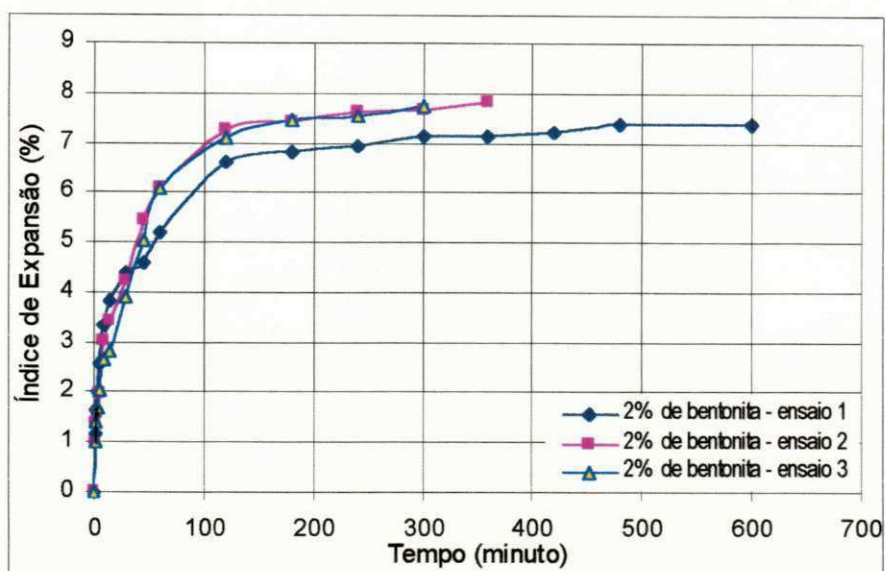


Figura A 73 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 2% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

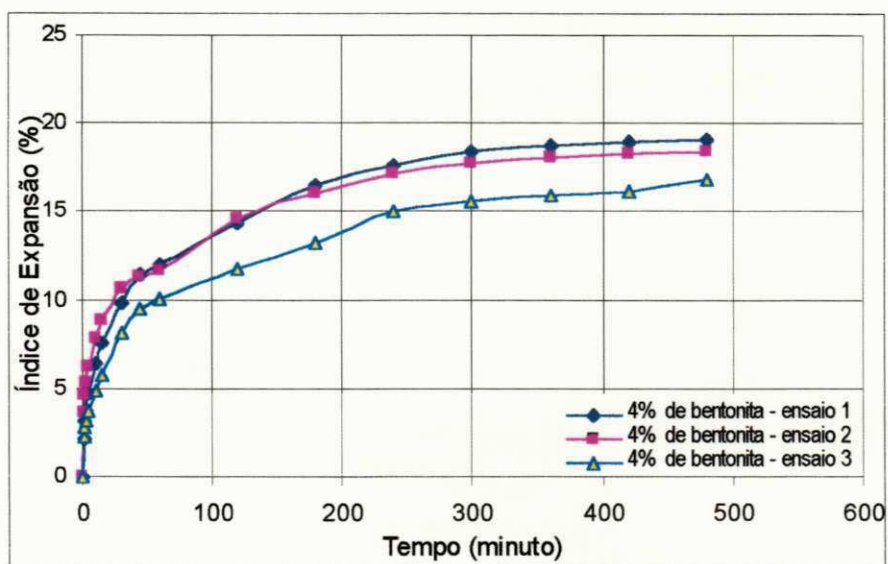


Figura A 74 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 4% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

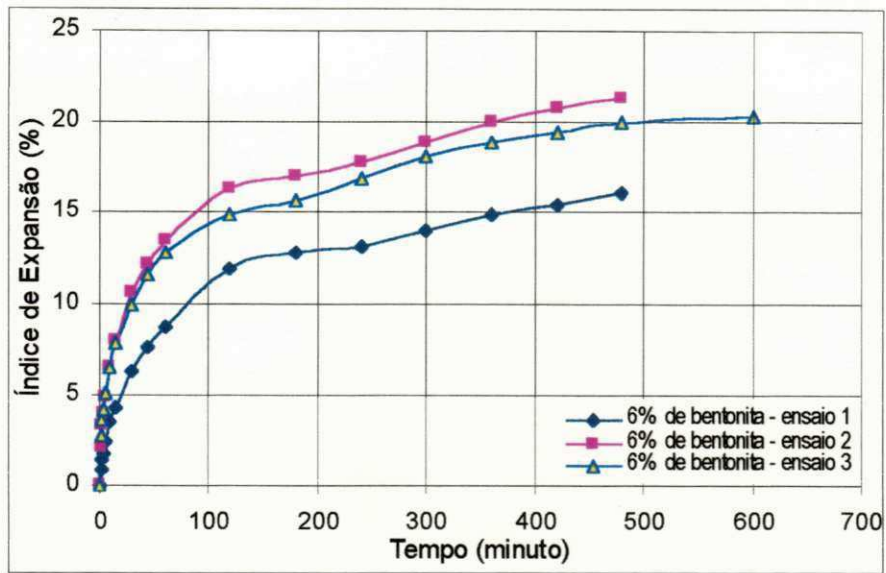


Figura A 75 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 6% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.

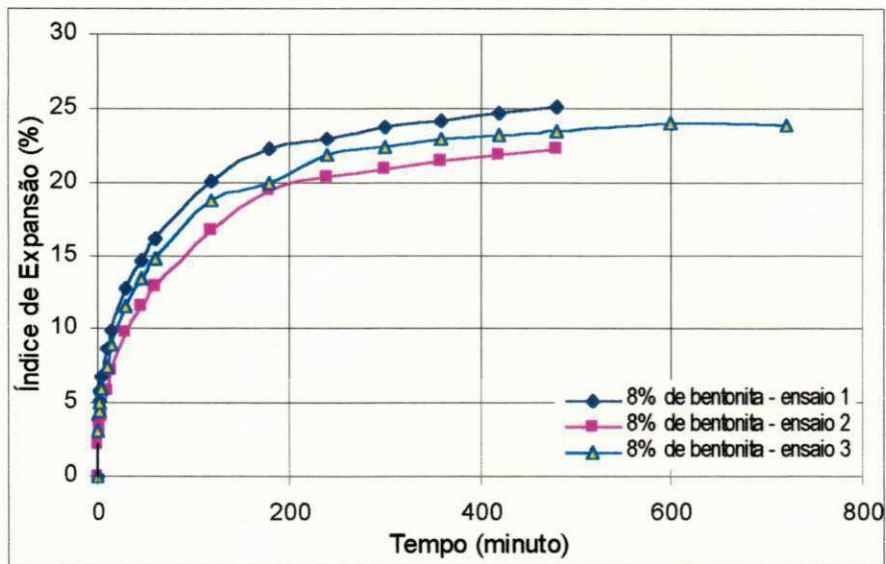


Figura A 76 - Índice de expansão em função do tempo para misturas com 8% de bentonita, amostras provenientes de jazida do Shopping Center.