

# CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE FELDSPATO E QUARTZO, VISANDO APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO.

Thabata de Aguiar Martins (1), Adailton Antonio dos Santos (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
(1)[thabata\\_5@hotmail.com](mailto:thabata_5@hotmail.com), (2)[adailton@unesc.net](mailto:adailton@unesc.net)

## RESUMO

Baseado nos interesses econômicos e executivos para a implantação de rodovias, a sustentabilidade e a preocupação com a escassez dos recursos naturais são itens de grande importância em nossa sociedade. Estudos que analisem o comportamento de resíduos de mineração e soluções que os façam se enquadrar como materiais úteis para a construção civil tornam-se indispensáveis para manter o equilíbrio entre meio ambiente e desenvolvimento. Para conhecer as características do resíduo de mineração, foram realizados ensaios físicos, mecânicos e químicos. Nos ensaios químicos foi determinada a classificação do resíduo de acordo com a NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação. No ensaio físico teve-se como objetivo classificar o solo de acordo com a HRB e no ensaio mecânico obtiveram-se valores de ISC e expansão. Foi também realizado o ensaio de Resistência à Compressão Simples do solo. Com o propósito de melhorar as condições químicas e mecânicas do material, adicionou-se cimento em teores de 2% e 4% em relação ao seu peso seco, de maneira a fazer o resíduo de mineração apresentar propriedades que o torne capaz de ser aplicado como material para pavimentação. Para essas misturas, foram realizados os mesmos ensaios químicos aos quais o solo natural foi submetido, de modo a conhecer seu comportamento quando misturado com cimento, resultando em um comparativo entre os estudos.

*Palavras-Chave: Resíduo; Índice de Suporte Califórnia; Resistência à Compressão Simples.*

## 1. INTRODUÇÃO

A atividade de mineração, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2011), é responsável por 4,2% do PIB e 20% das exportações brasileiras. Ainda,

segundo a mesma fonte, de 1996 a 2005, estima-se um volume de resíduos de mineração de 2.179 milhões de toneladas.

Conclui-se que a atividade de mineração tem grande importância econômica. Em contrapartida, apresenta o inconveniente de ser uma grande geradora de resíduos. Logo, torna-se necessário que se encontrem finalidades para a reutilização desse material, de modo a evitar seu acúmulo e, conseqüentemente, problemas ambientais.

Paralelamente a isso, o aumento do tráfego nas rodovias faz com que o crescimento da pavimentação torne-se cada vez mais visível e necessário. A implantação e a melhoria de rodovias já existentes consomem grande parte de recursos naturais para utilização em suas camadas.

Muitas vezes o material encontrado no subleito não apresenta as propriedades físicas e mecânicas necessárias para garantir que o pavimento cumpra sua função estrutural e garanta conforto e segurança ao usuário ao trafegá-lo, necessitando removê-lo ou reforçá-lo com material que atenda a essas propriedades.

Partindo do exposto, surge a necessidade de estudos desses resíduos que comprovem sua eficácia como novos materiais para pavimentação, trazendo vantagens tanto para a engenharia rodoviária quanto à mineração, com um material que atenda as propriedades necessárias, proporcionando uma disposição final para o resíduo.

## **2. PROCESSO DE BENEFICIAMENTO**

Para obtenção de feldspato e quartzo, utilizados na indústria cerâmica e de vidro, é necessário que os minérios passem por um beneficiamento, pois nem sempre esses minerais apresentam-se na natureza na forma em que serão consumidos pela indústria, quer seja por suas granulometrias, quer por estarem associados a outros minerais, que não têm interesse ou são indesejáveis para o processo industrial a que se destinam.

O processo de beneficiamento é composto de duas etapas. A primeira etapa contempla os processos de britagem, moagem, peneiramento e classificação granulométrica.

Na segunda etapa, chamada de concentração, os minérios de interesse são separados dos de não interesse. Existem diversos métodos de concentração, mas os mais aplicados para obtenção dos minérios em questão, feldspato e quartzo, são a separação magnética e a flotação. O material em estudo é resíduo do processo de flotação.

### 2.1. Flotação

A flotação é uma técnica que consiste na introdução de bolhas de ar a uma suspensão de partículas. Com isso, verifica-se que as partículas aderem às bolhas, formando uma espuma que pode ser removida da solução e separando seus componentes de maneira efetiva. Permite a obtenção de concentrados com elevados teores e expressivas recuperações. É aplicado no beneficiamento de minérios com baixo teor e granulometria fina.

## 3. RESÍDUOS SÓLIDOS

Grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados na atividade de mineração, na qual dois tipos de resíduos sólidos são gerados em maiores quantidades, os estéreis e os rejeitos. O material em estudo é classificado como rejeito.

### 3.1. Classificação

Para a classificação dos resíduos, a ABNT elaborou um conjunto de normas técnicas que estão descritas na tabela 1:

Tabela 1 – Normas Técnicas para classificação de resíduos sólidos

<b>Ensaio</b>	<b>Normas</b>
Resíduos Sólidos	NBR 10004/2004
Lixiviação de Resíduos	NBR 10005/2004
Solubilização de Resíduos	NBR 10006/2004
Amostragem de Resíduos	NBR 10007/2004

Fonte: Thabata de Aguiar Martins

A NBR 10004/2004 estabelece os critérios para classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente. São classificados em:

- Perigosos
- Não perigosos

Os resíduos classificados em Não perigosos ainda são divididos em:

- Classe A – Não inerte
- Classe B – Inerte

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

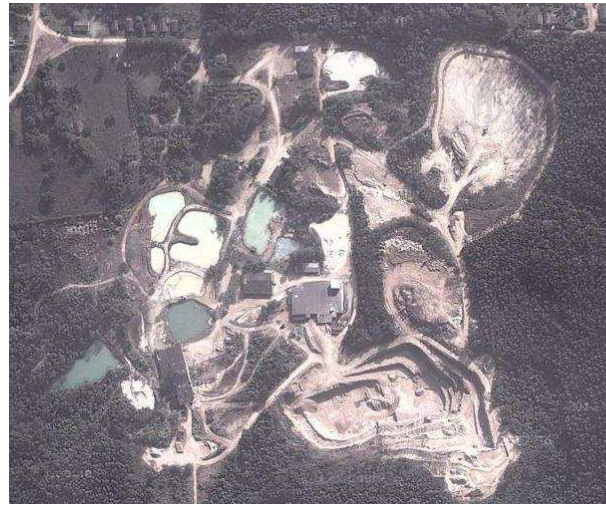
### 4.1. Materiais

Os materiais utilizados para o estudo foram o resíduo, que foi então chamado de solo, e o cimento, em que foram feitas adições conforme metodologia.

#### 4.1.1. Solo

O material de estudo foi coletado em uma área de mineração na região de Linha Torrens, no município de Morro da Fumaça – SC e levado ao Laboratório de Mecânica dos Solos, localizado no IPARQUE – Parque Científico e Tecnológico da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). O local da coleta, conforme figura 1, trata-se de uma área de deposição do material, nas imediações da área de mineração.

Figura 1 – Mineração Nossa Senhora do Carmo – Morro da Fumaça



Fonte: Google Earth

#### 4.1.2. Cimento

Com a finalidade de melhorar o comportamento químico e mecânico do material, foram definidas dosagens de 2% e 4% em relação ao peso do solo seco, de modo a enquadrá-lo como solo melhorado com cimento.

### 4.2. Métodos

#### 4.2.1. Ensaios Químicos

Como o solo em estudo se trata de um resíduo sólido resultante do processo de mineração, é necessário que o material passe por uma análise química, visando classificá-lo como um resíduo perigoso ou não. Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Resíduos Sólidos do Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas (IPAT) da UNESC e pelo Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do SENAI de Criciúma - SC. A análise do material consistiu nos ensaios de:

- Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX);
- Difração de Raios-X;
- Corrosividade;
- Reatividade;

- Lixiviação;
- Solubilização.

#### 4.2.2. Ensaios Físicos e Mecânicos

Todas as amostras de solo foram preparadas seguindo as especificações da NBR 6457 e os ensaios foram realizados seguindo as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essas amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização física e mecânica, descritos na Tabela 2:

Tabela 2 – Ensaios físicos e mecânicos e suas respectivas normas técnicas

Ensaios	Normas
Caracterização (Físicos)	
Preparação das amostras	NBR 6457/86
Granulometria	NBR 7181/84
Limite de Liquidez	NBR 6459/84
Limite de Plasticidade	NBR 7180/84
Mecânicos	
Compactação	NBR 7182/86
CBR e Expansão	NBR 9895/87
Resistência à Compressão	NBR 12253/92

Fonte: Thabata de Aguiar Martins

##### 4.2.2.1. Ensaios de Caracterização

Os ensaios de caracterização foram realizados com o propósito de conhecer as características físicas do solo em estudo e enquadrá-lo de acordo com a classificação HRB (TRB).

##### 4.2.2.2. Ensaios Mecânicos

Foram realizados ensaios de compactação, com o objetivo de encontrar a umidade ótima e o peso específico seco máximo do material no seu estado natural.

Com a finalidade de conhecer o comportamento do material, foram moldados os corpos de prova com os seguintes valores de umidade:

- na umidade ótima;
- 2% abaixo da ótima
- 2% acima da umidade ótima.

Foram pesadas e separadas amostras de solo e acrescentada água para atingir os referidos valores de umidade. O material foi moldado com a energia Proctor Normal em cinco camadas iguais, em um molde cilíndrico com peso e volume conhecidos. Após as moldagens, foram colocados extensômetros para determinar a expansão. Os cilindros foram submersos em um tanque por quatro dias, sendo que a leitura de sua expansão foi realizada todos os dias no mesmo horário. Ao quarto dia, os cilindros foram retirados da água e levados para prensa, onde determinou-se seu Índice de Suporte Califórnia (ISC). A prensa utilizada no ensaio é da marca Solotest, com capacidade para 5 toneladas.

#### 4.2.3. Adições

Com a intenção de melhorar sua capacidade de suporte e suas condições químicas, foram adicionadas ao solo pequenas quantidades de cimento, em teores de 2% e 4% em relação ao seu peso seco, de modo a enquadrar a mistura como solo melhorado com cimento.

Essas adições foram acrescentadas em dois quilos de solo com umidade natural e foram deixadas em repouso por 24 horas. Após esse período, foram realizadas compactações, encontrando-se assim, a umidade ótima e o peso específico seco máximo para o solo melhorado com cimento.

Devido ao comportamento do solo em estudo, que apresentou valores de ISC superiores no ramo seco, especificamente quando sua umidade se encontrava a 2% abaixo da umidade ótima, decidiu-se realizar o ensaio de Resistência à Compressão Simples (RSC) com corpos de prova nos dois teores de umidade: na umidade ótima e 2% abaixo.

Com esses valores, foram moldados cinco corpos de prova para cada teor de umidade. Os corpos de prova foram extraídos do molde, embalados em sacos plásticos, lacrados e etiquetados com sua data de moldagem, umidade e peso



específico seco. Foram acondicionados em local úmido por um período de cura de sete dias.

#### 4.2.4. Resistência à Compressão Simples

Após a cura, os corpos de prova foram levados a prensa e determinado sua RCS. A prensa utilizada no ensaio foi da marca EMIC, com capacidade para 200 toneladas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados encontrados nos diferentes ensaios realizados com o material permitirá conhecer suas características e propriedades, tanto químicas quanto físicas e mecânicas e classificá-lo de modo a definir uma tendência de comportamento do mesmo.

### 5.1. Análise Química

#### 5.1.1. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

De acordo com o ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, os elementos químicos presentes no material estão descritos na tabela 3, juntamente com seus respectivos teores encontrados na amostra.



Tabela 3 – Análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios X

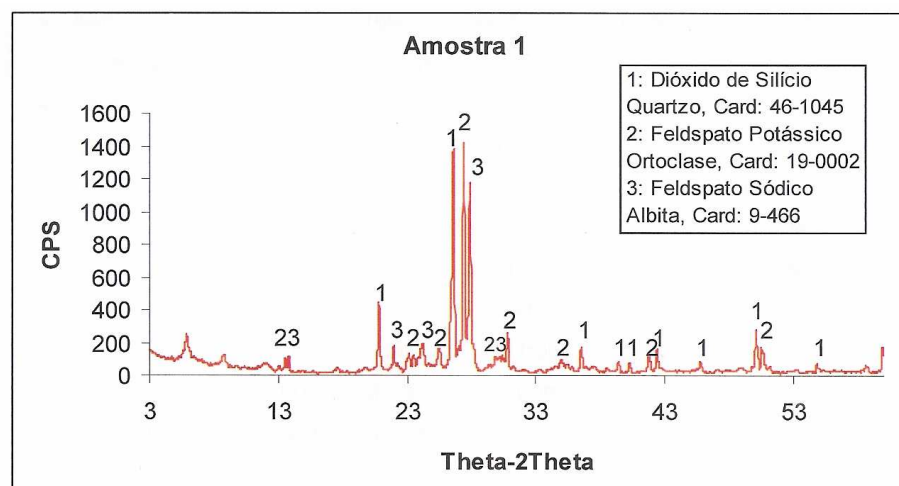
Elementos	Teor
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de Alumínio)	14,09
CaO (Óxido de Calcio)	1,96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de Ferro)	4,39
K <sub>2</sub> O (Óxido de Potássio)	3,65
MgO (Óxido de Magnésio)	0,68
MnO (Óxido de Manganês)	0,06
Na <sub>2</sub> O (Óxido de Sódio)	2,65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Óxido de Fósforo)	0,14
SiO <sub>2</sub> (Óxido de Silício)	69,92
TiO <sub>2</sub> (Óxido de Titânio)	0,77
Perda Fogo	1,69

Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – SENAI Criciúma - SC

### 5.1.2. Difração de Raios-X

A constituição mineralógica do material foi determinada através do ensaio de Difração de Raios-X. A composição mineralógica e suas quantidades são descritas na figura 2 e na tabela 4:

Figura 2 – Difratoograma do material



Fonte: Laboratório de Materiais – IDT - UNESC

Tabela 4 – Composição mineralógica do folhelho

Folhelho	Fração	Minerais Principais
AM1	Total	Quartzo, Albita e Feldspato-K
	Silte	Albita (30%) e Feldspato-K (36%)
	Areia	Quartzo (34%)

Fonte: Laboratório de Materiais – IDT - UNESC

### 5.1.3. Caracterização e Classificação do Resíduo

Seguem nas tabelas 5, 6, 7 e 8 os parâmetros analisados no material em seu estado natural de acordo com a NBR 10004/2004:

Tabela 5 – Valor de corrosividade

Parâmetro	Resultado	Valor Recomendado	L.Q.
pH em água (1:1)	6,62	2 a 12,4	0,1

Fonte: Laboratório de Resíduos Sólidos – IPAT – UNESC – Criciúma – SC

Tabela 6 – Valores de reatividade

Parâmetro	Resultado	Limite Liberável por kg de Resíduo	L.Q.
Ácido Cianídrico (HCN) <sub>(1)</sub>	NA	250 mg de HCN	0,05
Ácido Sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	< 40,0	500 mg de H <sub>2</sub> S	40

Fonte: Laboratório de Resíduos Sólidos – IPAT – UNESC – Criciúma – SC

Tabela 7 – Valores do ensaio de lixiviação

Parâmetro	Resultado	Limite Máximo no Lixiviado (mg/L)	L.Q.
Arsênio	< 0,001	1	0,001
Bário	0,9	70	0,1
Cádmio	< 0,01	0,5	0,01
Chumbo	< 0,05	1	0,05
Cromo Total	< 0,02	5	0,02
Fluoreto	2,3	150	0,1
Mercúrio	< 0,001	0,1	0,001
Prata	< 0,01	5	0,01
Selênio	< 0,001	1	0,001

Fonte: Laboratório de Resíduos Sólidos – IPAT – UNESC – Criciúma – SC

Tabela 8 – Valores do ensaio de solubilização

Parâmetros	Resultado	Limite Máximo no Extrato (mg/L)	L.Q.
Alumínio	<b>1,7</b>	0,2	0,1
Ferro	<b>0,72</b>	0,3	0,02
Fluoreto	<b>7,2</b>	1,5	0,1
Manganês	<b>0,38</b>	0,1	0,01
Sódio	11,1	200	0,01
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )	25	250	10
Surfactantes	< 0,1	0,5	0,1

Fonte: Laboratório de Resíduos Sólidos – IPAT – UNESC – Criciúma – SC

Com os resultados encontrados nos ensaios químicos, o material foi classificado como Resíduo Sólido Classe II A – Não Inerte. Isso significa dizer que o material apresentou-se como um resíduo Não perigoso, por isso Classe II. Quanto a sua classificação em “A”, deve-se ao fato de que, em contato com a água, o material solubiliza, liberando alguns de seus componentes químicos acima dos limites estabelecidos, os quais encontram-se grifados em vermelho na tabela 9.

Com o propósito de inertizar o material, transformando-o em um resíduo Classe II – B – Inerte, adicionou-se cimento no teor estudado de 4% e realizou-se os mesmo ensaios com a mistura. Os valores referentes ao ensaios da mistura solo e cimento encontram-se nas tabelas 9, 10, 11 e 12:

Tabela 9 – Valor de corrosividade

Parâmetro	Resultado	Valor Recomendado	L.Q.
pH em água (1:1)	12,3	2 a 12,4	0,1

Fonte: Laboratório de Resíduos Sólidos – IPAT – UNESC – Criciúma – SC

Tabela 10 – Valor de reatividade

Parâmetro	Resultado	Limite Liberável por kg de Resíduo	L.Q.
Ácido Cianídrico (HCN) <sub>(1)</sub>	NA	250 mg de HCN	0,05
Ácido Sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	< 40,0	500 mg de H <sub>2</sub> S	40

Fonte: Laboratório de Resíduos Sólidos – IPAT – UNESC – Criciúma – SC

Tabela 11 – Valores do ensaio de lixiviação

Parâmetro	Resultado	Limite Máximo no Lixiviado (mg/L)	L.Q.
Arsênio	< 0,001	1	0,001
Bário	1,6	70	0,1
Cádmio	< 0,01	0,5	0,01
Chumbo	< 0,05	1	0,05
Cromo Total	0,06	5	0,02
Fluoreto	1,6	150	0,1
Mercúrio	< 0,001	0,1	0,001
Prata	< 0,01	5	0,01
Selênio	< 0,001	1	0,001

Fonte: Laboratório de Resíduos Sólidos – IPAT – UNESC – Criciúma – SC

Tabela 12 – Valores do ensaio de solubilização

Parâmetros	Resultado	Limite Máximo no Extrato (mg/L)	L.Q.
Alumínio	<b>1,3</b>	0,2	0,1
Ferro	< 0,02	0,3	0,02
Fluoreto	1,3	1,5	0,1
Manganês	< 0,01	0,1	0,01
Sódio	20,18	200	0,01
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )	< 10	250	10
Surfactantes	0,1	0,5	0,1

Fonte: Laboratório de Resíduos Sólidos – IPAT – UNESC – Criciúma – SC

É possível perceber que, com a adição de cimento, três dos quatro parâmetros analisados que apresentavam concentrações superiores aos limites de norma, tiveram seus valores diminuídos, ficando assim dentro das concentrações máximas. Apenas o Alumínio continuou com seu valor acima do permitido por norma, sendo então classificado como resíduo Classe II – A – Não Inerte. Nota-se também que, com a adição de 4% de cimento, o valor do pH do material aumentou, ficando muito próximo do valor máximo estabelecido pela NBR 10004/2004.

## 5.2. Caracterização do Solo

O solo em seu estado natural foi analisado pelos ensaios geotécnicos de laboratório, cujos valores referentes às suas características físicas estão descritas na tabela 13:

Tabela 13 – Características físicas do solo no estado natural

Características	AM 1	AM 2
LL	NL	NL
LP	NP	NP
IP	NP	NP
Classificação HRB	A-4	A-4
IG	0	0

Fonte: Thabata de Aguiar Martins

O solo foi classificado em A-4(0), que são solos que têm como material típico silte não plástico ou moderadamente plástico. O material apresentou 55% passante na peneira 200, sendo composto por uma mistura de areia e 56% de silte.

## 5.3. Índice de Suporte Califórnia e Expansão

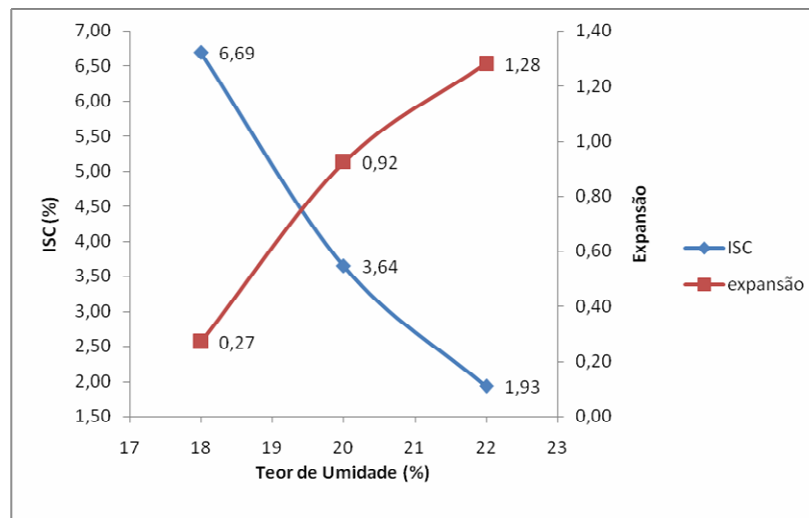
A tabela 14 e a Figura 3 mostram os resultados de ISC e Expansão encontrados. Foram realizados os ensaios com o material com os três valores de umidade: Umidade Ótima; 2% abaixo da Umidade Ótima e 2% acima da Umidade Ótima.

Tabela 14 – Valores de ISC e expansão para os três teores de umidade

Amostra	Ensaio	h <sub>-2% ót</sub> (%)	h <sub>ót</sub> (%)	h <sub>+2% ót</sub> (%)
AM 01 A	ISC (%)	5,37	4,39	1,49
	Expansão (%)	0,31	1,2	1,74
AM 01 B	ISC (%)	7,88	3,28	1,45
	Expansão (%)	0,38	0,77	1,03
AM 01 C	ISC (%)	6,82	3,26	2,84
	Expansão (%)	0,12	0,8	1,07
<b>Média</b>	ISC (%)	<b>6,69</b>	<b>3,64</b>	<b>1,93</b>
	Expansão (%)	<b>0,27</b>	<b>0,92</b>	<b>1,28</b>

Fonte: Thabata de Aguiar Martins

Figura 3 – Gráfico de ISC e Expansão em função do teor de umidade



Fonte: Thabata de Aguiar Martins

Conforme é observado na tabela 14 e na figura 3, de uma maneira geral, os valores de ISC e expansão apresentados pelo solo a 2% abaixo da umidade ótima foram satisfatórios, quando comparados com materiais de subleitos naturalmente encontrados na região, como, por exemplo, o solo da Formação Palermo, que apresenta ISC em torno de 3% e expansão, em média, maiores que 2%. Isso significa que o resíduo apresentou um ISC, aproximadamente, 123% maior e uma expansão 86% menor que um solo da Formação Palermo.

À medida que a umidade vai aumentando, o valor de ISC diminui. Com a expansão, observa-se o comportamento contrário, visto que quanto maior a umidade, maior a expansão.

Com os presentes dados, pode-se concluir que o material apresenta um melhor comportamento quando seu teor de umidade encontra-se no ramo seco, a 2% abaixo da umidade ótima, seja para o parâmetro de ISC e de Expansão.

#### 5.4. Valores de Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas de solo e cimento

Devido material ter apresentado melhores valores de suporte com a umidade no ramo seco da curva de compactação, optou-se por determinar a resistência à compressão simples com dois teores de umidade diferentes, um na umidade ótima e outro a 2% abaixo da umidade ótima. Os valores de RCS médios foram calculados

utilizando a distribuição t de Student, com um nível de confiança de 95%, segundo BARBETTA (2003).

#### 5.4.1. Valores de RCS moldados na umidade ótima

A tabela 15 apresenta os valores de RCS das amostras de solo em seu estado natural e com adições de 2% e 4% de cimento moldados na umidade ótima.

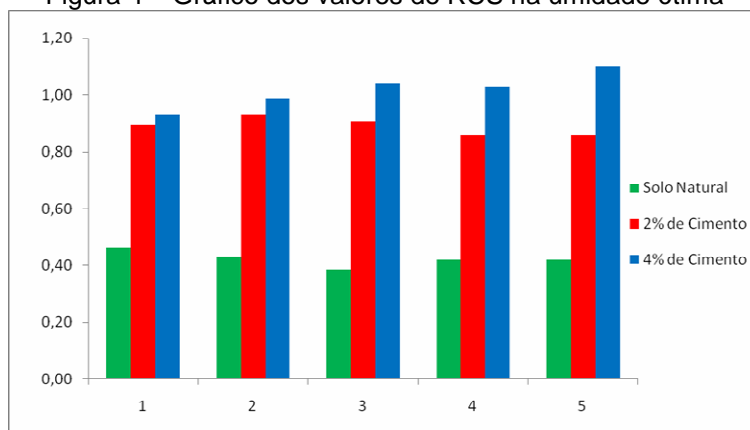
Tabela 15 – Valores de RCS para o solo natural e com adições de 2% e 4% de cimento na umidade ótima

	Solo Natural	2% de Cimento	4% de Cimento	F
RCS (Mpa)	0,46	0,90	0,93	1
	0,43	0,93	0,99	1
	0,39	0,91	1,04	1
	0,42	0,86	1,03	1
	0,42	0,86	1,10	1
RCS . F	2,12	4,45	5,09	<u>5</u>
RCSm (%)	0,42	0,89	1,02	
(RCS - RCSm) <sup>2</sup>	0,00	0,00	0,02	
DESVIO PADRAO (S)	0,0254	0,03	0,06	
t Student	2,015	2,015	2,015	
<b>RCS p (%) - (Mpa)</b>	<b>0,40</b>	<b>0,87</b>	<b>0,96</b>	

Fonte: Thabata de Aguiar Martins

A figura 4 mostra os valores de RCS em MPa dos cinco corpos de prova do solo natural e com as duas adições, 2% e 4% de cimento.

Figura 4 – Gráfico dos valores de RCS na umidade ótima



Fonte: Thabata de Aguiar Martins



Comparando os valores médios de RCS do solo natural com as adições, observa-se um aumento de 116% e 140%, para 2% e 4% de cimento, respectivamente. Já comparando os dois teores de adições, percebe-se que seu ganho de RCS foi pouco significativo, onde a adição de 4% de cimento apresentou-se com um aumento de 11% em relação ao teor de 2%.

#### 5.4.2. Valores de RCS moldados a 2% abaixo da umidade ótima

Os valores de RCS dos corpos de prova moldados com umidade a 2% abaixo da umidade ótima, para os dois teores de adição de cimento, de 2% e 4%, segue descritos na tabela 16:

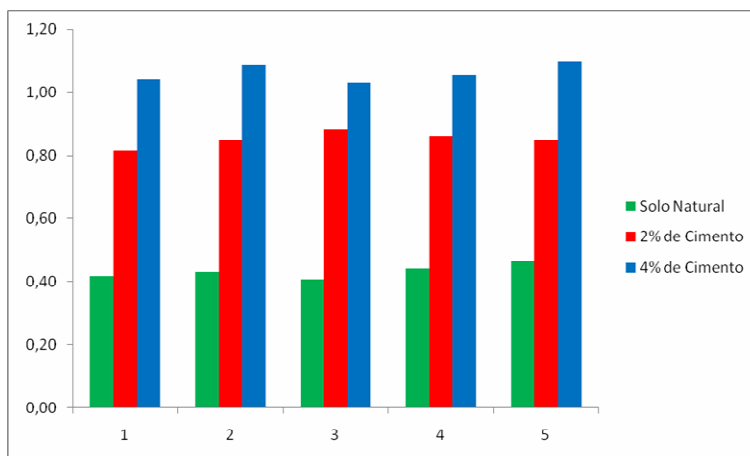
Tabela 16 - Valores de RCS do solo natural e com adição de 2% e 4% de cimento a 2% abaixo da umidade ótima

	Solo Natural	2% de Cimento	4% de Cimento	F
	0,42	0,82	1,04	1
	0,43	0,85	1,09	1
<b>RCS (Mpa)</b>	0,41	0,88	1,03	1
	0,44	0,86	1,05	1
	0,46	0,85	1,10	1
<b>RCS . F</b>	2,16	4,26	5,31	5
<b>RCSm (%)</b>	0,43	0,85	1,06	
<b>(RCS - RCSm)<sup>2</sup></b>	0,0019	0,0024	0,0034	
<b>DESVIO PADRAO (S)</b>	0,02	0,02	0,03	
<b>t Student</b>	2,015	2,015	2,015	
<b>RCS p (%) - (Mpa)</b>	<b>0,41</b>	<b>0,83</b>	<b>1,04</b>	

Fonte: Thabata de Aguiar Martins

Com os valores de RCS encontrados foi determinado o gráfico da figura 5, onde é possível analisar melhores resultados com adições na ordem de 4% de cimento com relação ao peso seco do solo.

Figura 5 - Gráfico dos valores de RCS a 2% abaixo da umidade ótima



Fonte: Thabata de Aguiar Martins

Os valores médios de RCS do solo com 2% de cimento mostraram-se 101% maiores do que o solo natural, e com o teor de 4% de cimento, esse aumento foi de 151%. Já comparando as duas adições, teve-se um pequeno aumento de 25% com relação à adição de 4% de cimento.

Conclui-se que a adição de cimento traz um relevante aumento na RCS quando comparado com o solo natural. Porém, a diferença de RCS entre os teores é pouco significativa.

## 6. CONCLUSÕES

O estudo foi realizado objetivando conhecer o comportamento de um resíduo de mineração visando aplicá-lo como material para pavimentação.

Do ponto de vista químico, foi classificado como um resíduo Classe II A – Não Inerte, pois não apresenta nenhum parâmetro que o classifique como um resíduo perigoso, por isso classificação do tipo II. Já a classificação em A – Não Inerte, se deve ao fato de apresentar valores de alguns elementos (Alumínio, Ferro, Fluoreto e Manganês) acima do permitido por norma, o que significa que esses elementos podem solubilizar quando em contato com a água, podendo contaminá-la.

Os resultados encontrados nos ensaios físicos e mecânicos permitem as seguintes conclusões:

- O material pode ser classificado como um solo do grupo A-4(0), não apresenta plasticidade nem variações de volume;

- Em seu estado natural, apresenta valores de ISC e expansão melhores quando no ramo seco, mais especificamente quando sua umidade encontra-se 2% abaixo da umidade ótima. O ISC nesta condição de umidade é, em média, 84% maior que o ISC na umidade ótima e a expansão apresenta uma redução de 70%;
- Quando misturado com cimento, com teor de 4% e a 2% abaixo da umidade ótima, apresenta valor de RCS, em média, 151% maior quando comparado com o material em seu estado natural.
- Quando adicionado 4% de cimento, tem seus valores de Ferro, Fluoreto e Manganês diminuídos, ficando assim, dentro dos limites de norma. Porém, o valor da concentração de Alumínio é superior ao permitido em ambos os casos, com e sem cimento, mantendo a classificação inicial do mesmo (Classe II - A).

A análise dos resultados permite concluir que o resíduo apresenta bom comportamento como material de pavimentação, com baixos valores de expansão e elevados valores de ISC quando comparados ao ISC de solos da Formação Palermo. Também apresenta bons resultados de RCS com 4% de cimento. Para todos os parâmetros estudados, o material tem melhor comportamento a 2% abaixo da umidade ótima. Cabe ressaltar, porém, que a concentração de Alumínio permaneceu superior ao limite máximo estabelecido pela NBR 10004/2004, mesmo quando adicionado cimento. Além disso, o teor de adição deve ficar em, no máximo, 4% sob pena de elevar o pH de modo a torná-lo corrosivo.

## 7. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos - Classificação**: NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.

BARBETTA, Pedro A. **Estatística Aplicada às Ciências Sociais**, Editora Da UFSC, Florianópolis, v.3, 2003, p. 211-241.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, versão preliminar – Brasília, 2011.