

SAMUEL SANTOS DE SOUZA PINTO

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS DE MISTURAS DE DIFERENTES TIPOS DE
REJEITO PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS-BRASIL

2013

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

P659c
2013

Pinto, Samuel Santos de Souza, 1984-

Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de misturas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos / Samuel Santos de Souza Pinto. – Viçosa, MG, 2013.

80 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 77-80.

1. Resíduos industriais. 2. Minérios de ferro. 3. Flotação. 4. Escória (Metalurgia). 5. Pavimentos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 625.8

SAMUEL SANTOS DE SOUZA PINTO

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS DE MISTURAS DE DIFERENTES TIPOS DE
REJEITO PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 22 DE MARÇO DE 2013

Taciano Oliveira da Silva
(UFSJ)

Carlos Alexandre Braz de Carvalho
(Co-orientador)
(UFV)

Cláudio Henrique de C. Silva
(Orientador)
(UFV)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade de concluir mais essa maravilhosa oportunidade a mim oferecida.

À Universidade Federal de Viçosa pela possibilidade de realizações desse trabalho.

Ao professor Enivaldo Minette, por todas as oportunidades, aprendizado e amizade.

Ao professor Eduardo Marques pela orientação, aprendizado e amizade.

Aos professores Paulo Sérgio de Almeida, Izabel Christina Azevedo pelo aprendizado.

Os meus sinceros agradecimento aos professores Cláudio Henrique de Carvalho Silva, Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Dario Cardoso Lima, Taciano Oliveira da Silva por todo aprendizado e por toda orientação oferecida para realização deste trabalho.

Aos colaboradores e amigos, Júlio, Jorge e Paulo P3.

Aos GRANDES e fieis escudeiros Dedé e Jonathan por toda a ajuda oferecida para realização desse trabalho.

Aos grandes amigos José Cezar Junqueira e Emerson Pereira por toda a ajuda e amizade.

Os velhos e bons amigos da “famosa” Inconfidentes, por todos os momentos de diversões e descontrações vividos, tão importantes para o espírito para conclusão de mais essa etapa.

Aos meus avós José Pedro e Maria Julia por todo apoio e orações a mim oferecidas.

A minha avó Adriana Alba (*in memoriam*) pelo exemplo de como devemos encarar a vida.

A minha irmã Jussara por todo apoio e encorajamento.

Ao meu irmão Otávio, por todo incentivo, amizade, apoio, encorajamento e acima de tudo, pela ajuda de minha evolução neste período.

E por último, mais não menos importante aos meus pais Walter Roberto e Maria Guadalupe, por simplesmente tudo, sem o apoio de vocês eu nada seria.

BIOGRAFIA

SAMUEL SANTOS DE SOUZA PINTO, filho de Walter Roberto de Souza Pinto e Maria Guadalupe dos Santos de Souza Pinto, nasceu em 25 de Novembro de 1984, na cidade de Campinas, São Paulo.

Em 31 de agosto de 2010, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP

Em Setembro de 2010 iniciou o Curso de Pós-Graduação em nível de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa-UFV, concentrando seus estudos na área de Geotecnia com ênfase em pavimentação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

LISTA DE SIMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Justificativas	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo geral	3
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.3.3 Organização da dissertação	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Rejeito de mineração	6
2.1.1 A problemática do armazenamento dos rejeitos de mineração	7
2.1.2 O aproveitamento econômico dos rejeitos de mineração	10
2.2 Escória de aciaria	11
2.2.1 Aspectos de Produção	11
2.2.2 A problemática do armazenamento de escória	13
2.2.3 O aproveitamento econômico da escória	15
2.2.4 Exemplo de aplicação de escória de aciaria	16

3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Materiais	20
3.1.1 Rejeito de minério de ferro	21
3.1.2 Escória de aciaria	24
3.2 Metodologias dos ensaios de laboratório	27
3.2.1. Fase I: Coleta e preparo das amostras	27
3.2.2. Fase II: Misturas dos rejeitos de flotação e concentração magnética em diferentes proporções	27
3.2.3. Fase III: Ensaio de caracterização geotécnica	29
3.2.4. Fase IV: Adição de escória e cascalho à “Mistutra 1”	29
3.2.5. Fase V: Determinação da resistência ao cisalhamento em ensaios triaxiais	30
3.2.6. Fase VI: Módulo de Resiliência	32
3.2.7. Fase VII: Ensaio de Equivalente de Areia	34
4. RESULTADOS E ANÁLISES	36
4.1 Ensaio de caracterização geotécnica	36
4.2 Ensaio de compactação e CBR na energia do Proctor normal	38
4.3 Ensaio de compactação e CBR na energia do Proctor intermediário	40
4.4 Ensaio de compactação e CBR na energia do Proctor modificada	42
4.5 Ensaio triaxiais CID	45
4.6 Ensaio de módulo de resiliência	58
4.7 Ensaio de equivalente de areia	74
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	75

5.1 Conclusão	75
5.2 Sugestões para estudos futuros	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de minério de ferro no Brasil e no mundo na última década	1
Figura 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos construção de barragens	8
Figura3 - Rejeitos de mineração transportada por caminhões	9
Figura 4 - Processo de fabricação do aço (IBS, 2006)	12
Figura 5 - Conversor LD (CST, 2005)	13
Figura 6 - Utilização de escória de aciaria em vias urbanas e rurais (CST, 2012)	17
Figura 7- (A) Obra no pátio da BRASIL QUARIES (B) Obras em pátio na Rodovia do Contorno (CST, 2012)	18
Figura 8 - Obras no Contorno de BR 393 em Volta Redonda - R.J. (CST, 2012)	19
Figura 9 - Complexo Mariana - Mina de Alegria	21
Figura 10 - Ponto de coleta da amostra (rejeito de flotação)	22
Figura 11 - Coluna de flotação	22
Figura 12 - Vista superior do cone desaguador do rejeito da separação magnética	23
Figura 13 - Ponto de coleta do rejeito de concentração magnética	23
Figura 14 - Vista inferior do cone desaguador e ponto de amostragem do rejeito denominado de “concentração magnética”	24
Figura 15 - Diferentes tipos de escória em função da granulometria	25
Figura 16 - Escória de aciaria fina	26
Figura 17 - Curva granulométrica da escória de aciaria fina	26
Figura 18 - Corpos de prova compactados e imersos em água durante 4 dias, em atendimento ao ensaio de CBR	28

Figura 19 - Prensa triaxial	31
Figura 20 - Detalhe do ensaio de Equivalente de Areia	35
Figura 21 - Curva Granulométrica da Mistura 1 (60% Flotação + 40% Concentração magnética)	36
Figura 22 - Curva granulométrica da mistura 2 (60% Rejeito de minério de ferro + 40% Escória)	37
Figura 23 - Curva Granulométrica da Mistura 3 (40% Rejeito de minério de ferro + 30% Escória + 30% Cascalho)	37
Figura 24 - Curva de compactação da Mistura 1 na Energia do Proctor normal: (60% Flotação + 40% Concentração magnética)	40
Figura 25 - Curva de compactação para Mistura 1 na Energia do Proctor intermediário: (60% Flotação + 40% Concentração magnética)	41
Figura 26 - Curva de compactação para a Mistura 2 na energia do Proctor intermediário: (60 % Rejeito + 40 % Escória)	41
Figura 27 - Curva de compactação para a Mistura 3 na energia do Proctor intermediário: (40 % Rejeito + 30 % Escória + 30 % Cascalho)	42
Figura 28 - Curva de compactação para a Mistura 1 na energia do Proctor modificado: (60 % Flotação + 40 % Concentração magnética)	43
Figura 29 - Curva de compactação para a Mistura 2 na Energia do Proctor modificado: (60 % Rejeito + 40 % Escória)	43
Figura 30 - Curva de compactação para a Mistura 3 na Energia do Proctor modificado: (40 % Rejeito + 30 % Escória + 30 % Cascalho)	44
Figura 31 - Detalhes dos corpos de prova após ruptura – Mistura 1 (Energia do Proctor intermediário)	45
Figura 32 - TTE para a Mistura 1 – Energia do Proctor intermediário	46

Figura 33 - Gráfico de Tensão x Deformação para a Mistura 1 - Energia do Proctor intermediário	46
Figura 34 - Gráfico de Deformação Axial x Deformação Volumétrica para a Mistura 1 – Energia do Proctor intermediário	47
Figura 35 - Detalhes dos corpos de prova após ruptura para a Mistura 2 – Energia do Proctor intermediário	47
Figura 36 - TTE para a Mistura 2 - Energia do Proctor intermediário	48
Figura 37 - Gráfico de Tensão x Deformação para a Mistura 2 – Energia do Proctor intermediário	48
Figura 38 - Gráfico de Def. Axial x Def. Volumétrica para a Mistura 2 – Energia do Proctor intermediário	49
Figura 39 – Corpos de prova após ruptura para a Mistura 3 – Energia do Proctor intermediário (40 % Rejeito + 30 % Escória + 30 % Cascalho)	49
Figura 40 - TTE para a Mistura 3 – Energia do Proctor intermediário	50
Figura 41 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 3 - Energia do Proctor intermediário	50
Figura 42 - Gráfico de Def. Axial x Def. Volumétrica para a Mistura 3 - Energia do Proctor intermediário	51
Figura 43 - Corpos de prova após ruptura para a Mistura 1 – Energia do Proctor modificado	51
Figura 44 - TTE para a Mistura 1 - Energia do Proctor modificado	52
Figura 45 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 1 - Energia do Proctor modificado	52
Figura 46 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 1 - Energia do Proctor modificado	53

Figura 47 - Corpos de prova após ruptura para a Mistura 2 - Energia do Proctor modificado	53
Figura 48 - TTE para a Mistura 2 - Energia do Proctor modificado	54
Figura 49 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 2 - Energia do Proctor modificado	54
Figura 50 - Gráfico de Tensão x Def. Volumétrica para a Mistura 2 - Energia do Proctor modificado	55
Figura 51 - Corpos de prova após ruptura para a Mistura 3 – Energia do Proctor modificado	55
Figura 52 - TTE para a Mistura 3 - Energia do Proctor modificado	56
Figura 53 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 3 – Energia do Proctor modificado	56
Figura 54 - Gráfico de Def. Axial x Def. Volumétrica para a Mistura 3 - Energia do Proctor modificada	57
Figura 55 - Gráfico referente ao módulo de resiliência Mistura 1 (60 % Flotação e 40 % concentração magnética)	61
Figura 56 - Gráfico referente ao módulo de resiliência Mistura 2 (60 % rejeito e 40 % escória)	63
Figura 57 - Gráfico referente ao módulo de resiliência Mistura 3. (40 % rejeito, 30% escória e 30 % cascalho)	65
Figura 58 - Gráfico referente ao módulo de resiliência Mistura1 (60 % Flotação e 40 % Concentração Magnética)	67
Figura 59 – Gráfico referente ao módulo de resiliência Mistura 2. (60 % rejeito e 40 % escória)	69

Figura 60 - Gráfico referente ao módulo de resiliência Mistura 3 (60 % Flotação e 40 %
concentração magnética) 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Composição química da escória de aciaria da ArcelorMittal Tubarão	15
Tabela 2– Propriedades principais da escória de aciaria - Fonte IBS 1998	19
Tabela 3 – Granulometria da escória de aciaria utilizada	25
Tabela 4 – Misturas realizadas em diversas proporções de agregados	28
Tabela 5 – Proporções das misturas estudadas	30
Tabela 6a – Sequência de tensões para a fase de condicionamento (DNIT, 2010)	33
Tabela 6b – Sequência de tensões para determinação do Módulo de Resiliência (DNIT 2010)	34
Tabela 7– Composição granulométrica das misturas ensaiadas	36
Tabela 8– Limites de consistência e peso específico dos sólidos	38
Tabela 9– Classificação geotécnica das misturas segundo os sistemas TRB e USCS	38
Tabela 10– Resultado do ensaio de compactação e CBR – Energia do Proctor normal.....	39
Tabela 11– Resultado do ensaio de compactação e CBR na Energia do Proctor intermediário	40
Tabela 12– Resultado do ensaio de compactação e CBR – energia do Proctor modificado	44
Tabela 13 – Resumo dos resultados dos ensaios triaxiais CID	57
Tabela 14– Valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a Mistura 1 (60 % Flotação e 40 % concentração magnética)	60

Tabela 15 – Valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a Mistura 2 (60 % rejeito e 40 % escória)	62
Tabela 16– Valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a Mistura 3 (40 % rejeito, 30% escória e 30 % cascalho)	64
Tabela 17– Valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a Mistura 1 (60 % Flotação e 40 % concentração magnética)	66
Tabela 18– Valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a Mistura 2 (60 % rejeito e 40 % escória)	68
Tabela 19– Valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a Mistura 3 (40 % rejeito, 30 % escória e 30 % concentração magnética)	70
Tabela 20 – Relações constitutivas para o módulo resiliente (melhor ajuste)	73
Tabela 21 – Resultados do ensaio de EA (equivalente de areia)	73

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BOF	<i>Blast OxygenFurnance</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CID	<i>ConsolidatedIsotropically Drained</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAF	<i>Electric ArcFurnace</i>
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FOB	<i>Free On Board</i>
IBS	Instituto Brasileiro de <i>Siderurgia</i>
ISC	Índice de Suporte Califórnia
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
TIMS	Terminal Industrial Multimodal da Serra
TPS	Terminal de Produtos Siderúrgicos
TRB	<i>Transpotation Research Board</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa
Unctad	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i>
USCS	<i>Un'fied SoilClassification System</i>

LISTA DE SIMBOLOS

σ_d	Tensão desvio axial
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor
θ	Primeiro invariante de tensões
c'	Coesão efetiva
CaO	Óxido de Cálcio
CBR	<i>California BearingRatio</i>
Fe	Ferro
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
K1, K2 e K3	Coefficientes de ajuste obtidos experimentalmente
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MgO	Óxido de Magnésio
M_R	Módulo de resiliência
R^2	Coefficientes de determinação linear
w_{ot}	umidade ótima
γ_s	peso específico
ϕ'	ângulo de atrito efetivo
γ_{dmax}	peso específico seco máximo

RESUMO

SOUZA PINTO, Samuel Santos de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Março de 2013. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos.** Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Co-orientadores: Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Dario Cardoso de Lima.

Este trabalho teve como objetivo a investigação em laboratório das características e propriedades geotécnicas (físicas e mecânicas) de rejeitos de minério de ferro (oriundos dos processos de flotação e concentração magnéticas) e escória de aciaria LD, com o propósito de inseri-los como material de construção em pavimentos rodoviários. Para tanto, nesta dissertação buscou-se encontrar técnicas de aproveitamento de materiais considerados como rejeitos dos processos do beneficiamento de minério de ferro, fazendo uso de misturas entre os rejeitos de flotação, de concentração magnética, escória de aciaria e cascalho, de forma a reduzir os impactos ambientais oriundos do seu armazenamento dentro da circunscrição da mina. Os resultados encontrados através do programa experimental realizado para a formulação desta dissertação basearam-se em um programa experimental com as seguintes ensaios geotécnicos: caracterização; compactação e CBR (*California Bearing Ratio*), nas energias de Proctor normal, intermediário e modificado; ensaios triaxiais drenados e triaxiais de cargas repetidas (módulo de resiliência); e, por último, equivalente de areia. Os resultados da composição granulométrica assim como os resultados de CBR bem como suas expansões, indicaram que os rejeitos estudados são compatíveis para utilização como materiais de sub-base de pavimentos flexíveis, segundo o "Método de Projetos de Pavimentos Flexíveis" do DNIT. O melhor ajuste dos resultados de módulo de resiliência em termos de R^2 foi o modelo que utiliza a primeira invariante de tensões, $M_R = K_1 \theta^K$. Logo as misturas desses materiais apresentam potencial para serem utilizados em camadas de pavimento.

ABSTRACT

SOUZA PINTO, Samuel Santos de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2013. **Characterization of physical and mechanical properties of different types of rejects for application as paving materials.** Advisor: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Co-advisors: Carlos Alexandre Braz de Carvalho and Dario Cardoso de Lima.

This research work was aimed towards the geotechnical characterization of samples from iron ore rejects coming from flotation and magnetic separation processes, together with the addition of LD steel slag, in order to use these materials as components for base of paved roads. In order to reach such goal, this research work was also concentrated in studying techniques for the utilization of such materials considered as rejects of the iron ore industry, considering the use of mixtures from flotation and magnetic separation rejects combined with LD steel slag and local granular soils, in order to reduce environmental effects caused by conventional methods of storage of these rejects in tailing dams and pile rejects, generally disposed at the mine environment. The findings of the experimental program carried out through this research were based on the following geotechnical testes: characterization; compaction and CBR performed at normal, intermediary and modified compaction efforts; triaxial drained tests; resilient modulus tests; and sand equivalent test. Test results from granulometric stabilization techniques as well as those obtained from CBR and expansion tests, showed that the studied iron ore rejects are suitable for being used as subbase layers of flexible pavements, according to the "Design method of flexible pavements" from DNIT. Also, the laboratory testing program consisted of performing repeated load triaxial resilient modulus tests for these rejects and their mixtures. The best constitutive relationship was the one relating the resilient modulus and the bulk stress, $M_R = K_1 \theta^{K_2}$. Finally, laboratory test results showed that these rejects and their mixtures are potentially suitable for application in pavement structures.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Conforme apontado por números da Conferência das Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento (Unctad), no ano de 2009, o Brasil se tornou o segundo maior produtor de minério de ferro. Segundo dados da Siferbase, sua produção em 2010 foi de 372 milhões de toneladas, o que equivale a 15% do total mundial (2,4 bilhões de toneladas) ficando atrás apenas da Austrália. Para efeito de comparação, a China, considerando o teor do minério extraído de seu território, se colocou como a quarta maior produtora mundial, com 300 milhões de toneladas produzidas.¹ Esses dados, bem como a evolução da produção brasileira e mundial durante a década passada pode ser visualizada na Figura 1.

No Brasil, dentre as maiores empresas exploradoras do minério, destacam-se a produção da Companhia Vale do Rio Doce (81,7%), Samarco (6,6%) CSN (2,9%), MMX (1,03%) e NAMISA (0,9%). Abaixo, a Figura 1 mostra a produção do ano de 2010 nos principais estados produtores do minério de ferro no ano de 2010.

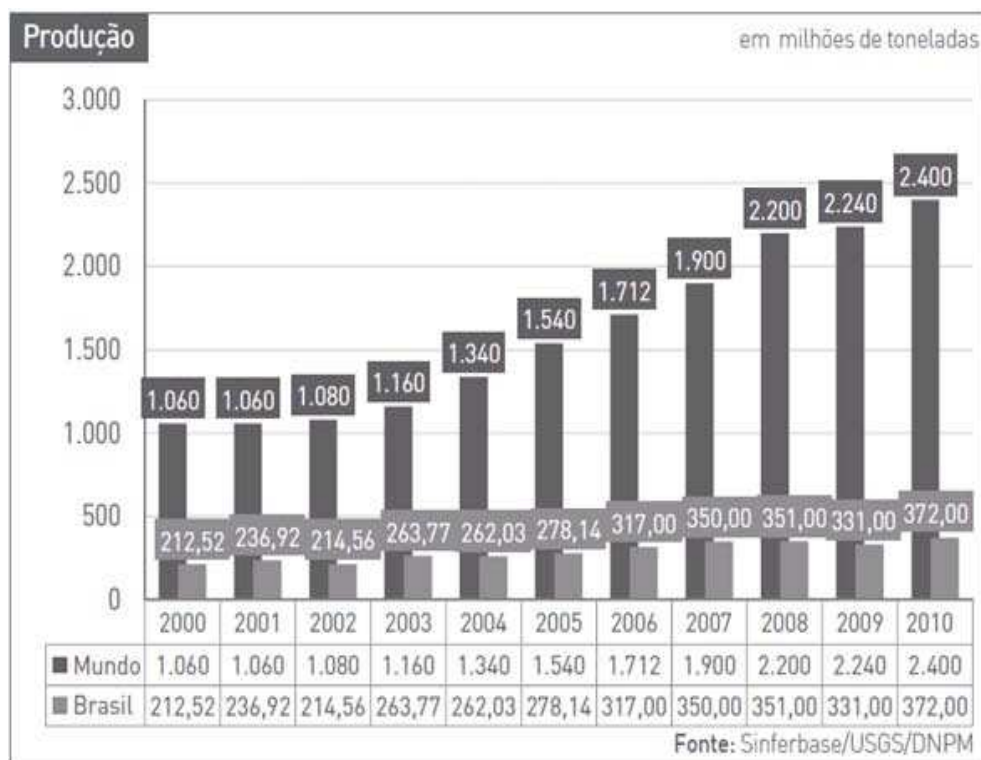


Figura 1- Produção de minério de ferro no Brasil e no mundo na última década

¹<http://g1.globo.com/economia-e-negocios/noticia/2010/07/unctad-brasil-foi-2o-maior-produtor-de-minerio-em-2009.html>

As reservas estimadas de minério de ferro no Brasil alcançam 29 bilhões de toneladas, situando o país em quarto lugar em relação às reservas mundiais, de 160 bilhões de toneladas. Entretanto, considerando-se as reservas em termos de ferro contido no minério, o Brasil possui minas de destaque.

Esse fato ocorre devido ao alto teor encontrado nos minérios Hematita (60 % de Ferro), predominante no Pará e Itabirito (50 % de Ferro), predominante em Minas Gerais.

As exportações brasileiras de bens primários de ferro em 2010 atingiram 311 milhões de toneladas, com um valor FOB (Free on Board) de US\$ 29 bilhões. Isso representa um aumento de 17 % em quantidade e de 119 % no valor das exportações, em comparação com o ano de 2009. No período de 1960 - 2000 houve mudanças no cenário da geografia mundial do comércio de minério de ferro. Até 1970, os países europeus eram os grandes produtores e se transformaram em importadores. Os centros de produção passaram a ser Brasil, Austrália e Índia. A França, por exemplo, era o principal exportador em 1960; em 2000 passou à condição de importador de quase vinte milhões de toneladas/ano.

Com bases nos números mostrados, verifica-se que a extração de minério de ferro é uma atividade em franca expansão e ainda mantém a relevância e a importância estratégica que lhe sempre foi peculiar. Não obstante, a preocupação com o impacto ambiental provocado pelos campos de extração impulsionou as discussões sobre a descoberta de formas de aliviar a degradação ambiental da atividade.

Na direção desses acontecimentos, passou a ser imperativo que pesquisas buscassem soluções quanto aos diversos problemas causados pela extração do minério de ferro, a ponto de racionalizar recursos humanos e econômicos, além de preservar o ecossistema em que está inserida a atividade de mineração.

Um dos principais obstáculos para esse correto gerenciamento do processo de extração de minério de ferro é o direcionamento da escória de alto-forno e de aciaria pela significativa quantidade produzida desses resíduos decorrente de processo de beneficiamento. A escória de aciaria é um dos subprodutos da produção do minério de ferro, resultante da transformação do ferro gusa líquido em aço. Trata-se de um resíduo silicoso que deve ser extraído após um processo de agregação de diversos elementos que não devem estar presentes na composição do aço beneficiado.

Além das escórias, outros subprodutos são gerados nesse processo de beneficiamento do minério de ferro, a exemplo disso temos o rejeito de flotação e o rejeito de concentração magnética, que também são objetos de estudos neste trabalho.

1.2. Justificativa

Tendo em vista a necessidade de se buscar alternativas para o aproveitamento desta alta produção de escória de aciaria LD e rejeito proveniente dos processos de beneficiamento de minério de ferro, a presente pesquisa busca contribuir para a descoberta de alternativas viáveis de seu aproveitamento, em obras de pavimentação rodoviária.

Especificadamente, na presente pesquisa estuda-se a possibilidade de utilização de rejeitos de minério de ferro (flotação e concentração magnética) e de escória de aciaria LD, para construção de camadas de pavimento de estradas ou vias não pavimentadas dentro de campos de extração, lavra e beneficiamento do minério de ferro.

É bastante avançado o conhecimento sobre o aproveitamento da escória de alto-forno, ao passo que esse material já é aproveitado de diversas formas. Contudo, ainda é embrionária a pesquisa sobre formas de aproveitamento de escória de aciaria, dado que seu alto potencial expansivo é um fator limitante para sua utilização.

Não obstante, é imperioso que alternativas tecnologicamente viáveis e ambientalmente corretas para o manejo e aproveitamento desse material sejam desenvolvidas, posto que o crescimento da produção mineral concomitantemente ao incremento da produção de escória gera um aumento dos impactos negativos ao meio ambiente.

Neste trabalho serão realizados estudos visando a proposição de usos alternativos e adequados para a escória de aciaria LD como material componente de misturas estabilizadas para uso em base e sub-base de pavimentos rodoviários.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Para estudos de aproveitamento e uso alternativo de disposição dos rejeitos granulares da indústria minero-siderúrgica (rejeito de flotação, e rejeito de concentração magnética, escória de aciaria LD) de forma a mitigar os impactos ambientais negativos oriundos dos processos convencionais de disposição em barragens de rejeito e/ou pilhas de estéril.

Para tanto, pretende-se antes estudar as características físicas e mecânicas de misturas em diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro e de escórias de aciaria LD proveniente do processo de produção de aço em conversor a oxigênio.

1.3.2. Objetivos específicos

i) Caracterizar geotecnicamente os rejeitos de minério de ferro através dos ensaios de:

- Granulometria conjunta;
- Limites de Consistência: Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade;
- Massa específica dos grãos do solo.
- Compactação: definição dos parâmetros ótimos de compactação (unidade ótima e γ_d ótimo).
- Equivalente de areia (EA)

ii) Avaliar o comportamento mecânico dos rejeitos de minério de ferro e misturá-los com outros materiais alternativos, a fim de analisar a capacidade de suporte das misturas finais através dos seguintes ensaios:

- Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR);
- Ensaio Triaxial de cargas repetidas (Módulo de Resiliência);
- Método de resiliência;
- Equivalente de Areia (EA): relação volumétrica que corresponde a razão entre a altura do nível superior da suspensão argilosa de determinada quantidade de solo de agregado miúdo, numa proveta.

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100$$

1.3.3. Organização da dissertação

A presente dissertação consiste em um estudo subdividido em cinco capítulos: introdução, revisão de literatura, materiais e métodos, resultados e análises, conclusão e sugestões para futuros trabalhos.

No capítulo 1 será apresentada a introdução da dissertação, onde será abordado as motivações do trabalho e sua pertinência para a ciência e para a sociedade.

No capítulo 2, será mostrada a revisão de literatura, em que será apresentado o devido suporte teórico de diversos conceitos essenciais para o correto desenvolvimento da pesquisa, dando atenção específica para temas como noções gerais sobre rejeitos de mineração e escória de aciaria, em especial considerações sobre seu aproveitamento econômico, armazenamento e composição química.

No Capítulo 3 será abordado Materiais e Métodos, onde se procederá a análise de amostras de escória de aciaria, dos locais e forma de coleta utilizada. Além disso, se descreverá a metodologia utilizada nos experimentos realizados em laboratório e objeto da presente pesquisa.

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados e análises, baseados ou fundamentados nos dados obtidos a partir dos experimentos propostos no capítulo anterior, não deixando de fazer a devida contextualização e correlação com o restante da doutrina técnica-científica sobre o tema.

Por fim, o capítulo 5 será destinado à conclusão e às sugestões para futuros trabalhos, de forma que haja uma continuação nas pesquisas sobre o uso das escórias de aciaria como material alternativo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. *Rejeitos de mineração*

A atividade de exploração mineral consiste no conjunto de ações de lavra, concentração e transformação do minério encontrado na natureza. Esse minério, encontrado na natureza sob a forma bruta, precisa passar por um processo de beneficiamento, que consiste na aplicação de métodos físicos e/ou químicos no sentido de purificar, enriquecer e preparar granulometricamente os minerais para a indústria. O resultado desse processo é a produção de rejeitos em quantidades variáveis que é geralmente armazenado por meio de diques e barragens.

Juntamente com o material objeto da exploração mineral, são gerados também consideráveis volumes desses materiais com pouco ou nenhum valor econômico, os denominados rejeitos de mineração. A questão sobre a destinação final dos rejeitos provenientes da extração mineral trata-se de uma situação que não pode ser ignorada.

O adequado manejo desses rejeitos é de vital importância para o empreendimento de extração mineral, de modo que uma disposição inadequada desses rejeitos pode inviabilizar o projeto como um todo.

A correta disposição dos rejeitos minerais, portanto, influencia diretamente a viabilidade do aproveitamento industrial do mineral.

Conceitualmente, rejeito é definido como material descartado de plantas de beneficiamento de minério. No entanto, sua procedência varia conforme a natureza do empreendimento de extração. Segue uma lista de procedências mais comuns:

- pilhas de rejeitos sólidos (minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos de cursos d'água e solos); rejeitos dos finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento de rochas asfálticas, minério de ferro, rochas ornamentais, carvão, vermiculita e scheelita;
- mercúrio proveniente do processo de amalgamação do ouro, principalmente em região de garimpos;
- resíduos/rejeitos da mineração artesanal de ágata, ametista, esmeraldas, opala, ouro; lamas das serrarias de mármore e granito; lamas de decantação de efluentes; lodo resultante do processo de tratamento do efluente da galvanoplastia no tratamento de jóias e folheados; resíduos/rejeitos da mineração de agregados

para construção civil, de rochas ornamentais, carvão, pegmatitos, argilas, calcário; a geração de drenagem ácida de mina de carvão e minérios sulfetados.

Conforme a natureza do minério e a forma como o beneficiamento é realizado, o rejeito pode assumir o aspecto de material arenoso não plástico (rejeitos granulares) ou de material de granulometria fina e alta plasticidade (lamas).

Os rejeitos gerados pela exploração mineral são geralmente rejeitos pobres, com teor de minério irrelevante, dado os custos da exploração e beneficiamento. A atual inexistência de processos mais desenvolvidos de manejo desses rejeitos tem inviabilizado, em grande parte, o seu aproveitamento na atividade de mineração.

2.1.1. A problemática do armazenamento dos rejeitos de mineração

Não há apenas motivações econômicas para o aproveitamento dos rejeitos de mineração, há também sérias preocupações ecológicas envolvidas na problemática do depósito dos rejeitos provenientes da extração mineral. O manejo desses materiais é capaz de causar situações complexas de risco ambiental, como instabilidade geotécnica e rompimento de barragem de efluentes. Desse modo, vislumbram-se, além do impacto visual na paisagem, decorrentes do depósito dos resíduos gerados pela mineração, o impacto ecológico, que normalmente vem em forma de poluição das águas e dos lençóis freáticos (ARAÚJO, 2008).

Por isso, a importância do desenvolvimento de uma estratégia de manejo de resíduos da exploração mineral, no sentido de conciliar dois objetivos aparentemente inconciliáveis: a redução dos riscos de degradação ambiental e a redução dos custos financeiros do empreendimento. É diante esse cenário que surge a necessidade de descobrir utilidades para os rejeitos de mineração.

Atualmente, os impactos paisagísticos ocorridos pela disposição dos rejeitos da extração de minerais consistem principalmente em razão das peculiaridades das escavações a céu aberto e da disposição dos resíduos em superfície, nas barragens de disposição de rejeitos, que podem ser gerados na forma de lama ou pasta.

Antes de se aprofundar no estudo dos rejeitos de mineração, é apropriado fixar algumas noções importantes para a precisa compreensão do estudo proposto. Primeiramente, é essencial discriminar o conceito de mineral, que se trata de todo sólido inorgânico, homogêneo e de ocorrência natural, com composição química definida e arranjo atômico ordenado.

De acordo com AMORIM (2007), atividade de mineração é caracterizada fundamentalmente pela pesquisa e exploração de recursos minerais úteis, que se encontrem no solo e subsolo.

A exploração de minerais segue um minucioso processo técnico, cuja primeira etapa consiste na atividade de lavra, momento em que é efetuada a retirada do solo de recobrimento, com o posterior desmonte da rocha. É nesse momento que é produzido o rejeito estéril, provisoriamente agrupado em pilhas.

Num segundo momento, o mineral objeto de lavra é levado ao processo de beneficiamento, onde sofrerá tratamento para apuração das suas propriedades físico-químicas que é objeto final do empreendimento desenvolvido. Nesta etapa também é separado em barragens os resíduos desse beneficiamento, cujo valor econômico se mostra, num primeiro momento, irrelevante.

As barragens de rejeito consistem, portanto, em estruturas construídas para o armazenamento de rejeitos provenientes da atividade de lavra de minérios. Quanto mais variadas são as propriedades dos materiais minerais objeto de extração, mais variadas também serão os rejeitos obtidos com a lavra do mesmo, pois assim como os minerais, podem-se encontrar rejeitos das mais variadas características e propriedades geológicas e geotécnicas. O comportamento do rejeito está diretamente ligado às propriedades do material, da natureza do depósito e da forma como ela foi depositada.

Três métodos destacam-se para o alteamento de uma barragem de rejeitos. São eles: método de montante, método de jusante e método de linha de centro. A bibliografia é rica em apontar as vantagens e desvantagens desses métodos, como em SOARES (2001) que sintetiza esses métodos, na Figura 2:

	Método de montante	Método de jusante	Método linha de centro
Características gerais	<ul style="list-style-type: none"> •Método mais antigo, sendo o mais empregado na atualidade. •Lançamento a partir da crista por "spigots" (as frações grossas se depositam junto ao corpo da barragem). •Também podem ser usados hidroclones. 	<ul style="list-style-type: none"> •Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. •Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidroclones. •Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante. 	<ul style="list-style-type: none"> •Variação do método de jusante.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> •Menor custo. •Maior velocidade de alteamento. 	<ul style="list-style-type: none"> •Maior segurança. • Compactação de todo o corpo da barragem. 	<ul style="list-style-type: none"> •Variação do volume de "underflow" em relação ao método de jusante.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> •Maior probabilidade de instabilidade devido à presença de finos não adensados junto ao corpo da barragem. •Baixa compacidade do material; possibilidade de liquefação. 	<ul style="list-style-type: none"> •Necessidade de grandes quantidades de "underflow" (problemas nas 1^{as} etapas). •Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção). 	<ul style="list-style-type: none"> •Pode ser necessária a extensão dos trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.

(fonte: Soares, 2001)

Figura 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos construção de barragens (SOARES, 2001)

De acordo com BATES (2003) no Brasil as pilhas são geralmente formadas por basculamento direto do material nas encostas ou terrenos que margeiam a área de lavra de maneira desordenada. O ideal, do ponto de vista de localização, é que os rejeitos sejam depositados o mais próximo possível da área de lavra, de forma que os custos de transporte dos materiais sejam menores. Quando o processo de obtenção do minério gera rejeitos na forma sólida (pasta) o transporte é comumente feito por meio de caminhões ou correias de transportadora, conforme apresentado na Figura 3:



Figura 3 – Rejeitos de mineração transportada por caminhões

No entanto, o processo de depósito dos rejeitos pode ser realizado, além do meio de transporte por caminhões, como também por meio de tubulações, abrindo a possibilidade dos rejeitos serem lançados hidraulicamente (ARAÚJO, 2006).

A técnica mais adotada no Brasil é o descarte de rejeitos sob a forma líquida ou sob a forma de polpa. Segundo CHAMAS (1989), a polpa pode passar por três tipos de comportamento:

- comportamento de líquido sobrenadante, ocorrendo a floculação das partículas de menor tamanho;
- rejeito em processo de sedimentação, apresentando comportamento semi-líquido e semi-viscoso;
- rejeito em processo de adensamento, comportando-se como um solo.

Independente do comportamento que a polpa de rejeitos assumirem, é perfeitamente possível que haja aproveitamento desse material.

2.1.2. O aproveitamento econômico dos rejeitos de mineração

É em meio ao contexto apontado que surge a proposta de utilizar os rejeitos na produção de asfalto. A mistura asfáltica destinada à pavimentação é constituído, de forma geral, de 95% de agregados minerais e 5% de cimentos asfálticos de petróleo (CAP), se tratando de material termosensível, de propriedades aglutinantes, impermeabilizantes e resistentes à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis (ELPHINGSTONE, 1997 e FRANQUET, 1999).

Quanto aos agregados minerais, os mais utilizados para fins de pavimentação asfáltica são a areia, o pedregulho, a pedra britada e o filer, ou seja, todos extraídos da natureza e beneficiados. Como esses materiais correspondem a cerca de 95% da composição das misturas asfálticas, são eles também os responsáveis pela maior parcelas de custos das misturas produzidas (LEITE, 2002).

Rejeitos do beneficiamento do minério de ferro são obtidos através dos processos de flotação e separação magnética. A flotação se vale do comportamento físico-químico das superfícies das partículas minerais presentes numa suspensão aquosa. Somado a isso, o processo vale-se da ação de reagentes específicos denominados coletores, depressores e modificadores, que permitem a segregação dos minerais de interesse por absorção em bolhas de ar.

Por outro lado, a separação magnética se vale da suscetibilidade magnética para destacar o rejeito. Os minerais são comumente divididos em três grupos de acordo com o seu comportamento quando submetidos a um campo magnético, são eles: ferromagnéticos (forte atração), paramagnéticos (média e fraca atração) e diamagnéticos (nenhuma atração).

Demonstrando grande versatilidade e seletividade, a flotação trata-se do processo mais utilizado na recuperação de minerais, pois resulta em expressivas recuperações e elevados teores. Além do mais, constata-se que o rejeito de flotação se comporta melhor sob o ponto de vista mecânico, no que tange a destinação à pavimentação asfáltica (CAMPANHA, 2011).

É substituindo os agregados minerais que se tem utilizado os rejeitos provenientes da extração e beneficiamento de minerais. Essa iniciativa, além de ser ecologicamente recomendável, pois implicaria na mitigação dos danos que o armazenamento de rejeito causa

ao ambiente, também contribui para a redução dos custos da produção de asfalto para pavimentação (RIBEIRO, CORREIA e SEIDL, 2005).

A iniciativa é vantajosa ainda para o empreendimento de extração mineral que geraram os rejeitos, pois transforma esse material sem praticamente nenhuma destinação viável em algo aproveitável e de valor econômico. Nos tempos atuais de intensa preocupação com o meio-ambiente, iniciativas como essa tendem a ser estimuladas e visadas pela indústria.

A literatura especializada ainda relata a utilidade dos rejeitos resultantes da extração de minério de ferro para a produção de cerâmica vermelha, usado na confecção de blocos e tijolos necessários à construção civil, principalmente na vedação.

A adição dos rejeitos não implica em nenhuma alteração considerável no que tange a absorção, a porosidade e a densidade da cerâmica produzida. Sabe-se que o rejeito oriundo da mineradora de ferro, tanto o arenoso quanto o de lama, são, basicamente, constituídos de sílica e óxido de ferro. No entanto, o rejeito de lama, além de ter que passar por um processo de secagem, tem de passar por uma posterior moagem, tornando o rejeito arenoso mais viável economicamente a ser explorado para esse fim. (NOCITI, 2011).

2.2. Escória de aciaria.

Com o aumento considerável da indústria nacional e mundial, junto com a busca incessante pelo desenvolvimento sustentável, se faz necessário o reaproveitamento dos diversos materiais oriundo dos processos industriais. Neste cenário, cita-se a indústria siderúrgica como sendo um segmento que merece destaque no que se diz respeito a geração de resíduos para a produção do aço. Logo, o desenvolvimento de novas tecnologias para uma aplicação viável destes resíduos siderúrgicos se faz necessária tanto no aspecto econômico quanto nos ambientais.

2.2.1. Aspectos de produção

A escória de aciaria é obtida da transformação do ferro gusa líquido em aço. Existem dois processos principais de fabricação do aço, em usinas integradas, processo de aciaria LD, e em usinas semi-integradas, processo de aciaria elétrica, EAF, conforme mostrado esquematicamente na Figura 4.

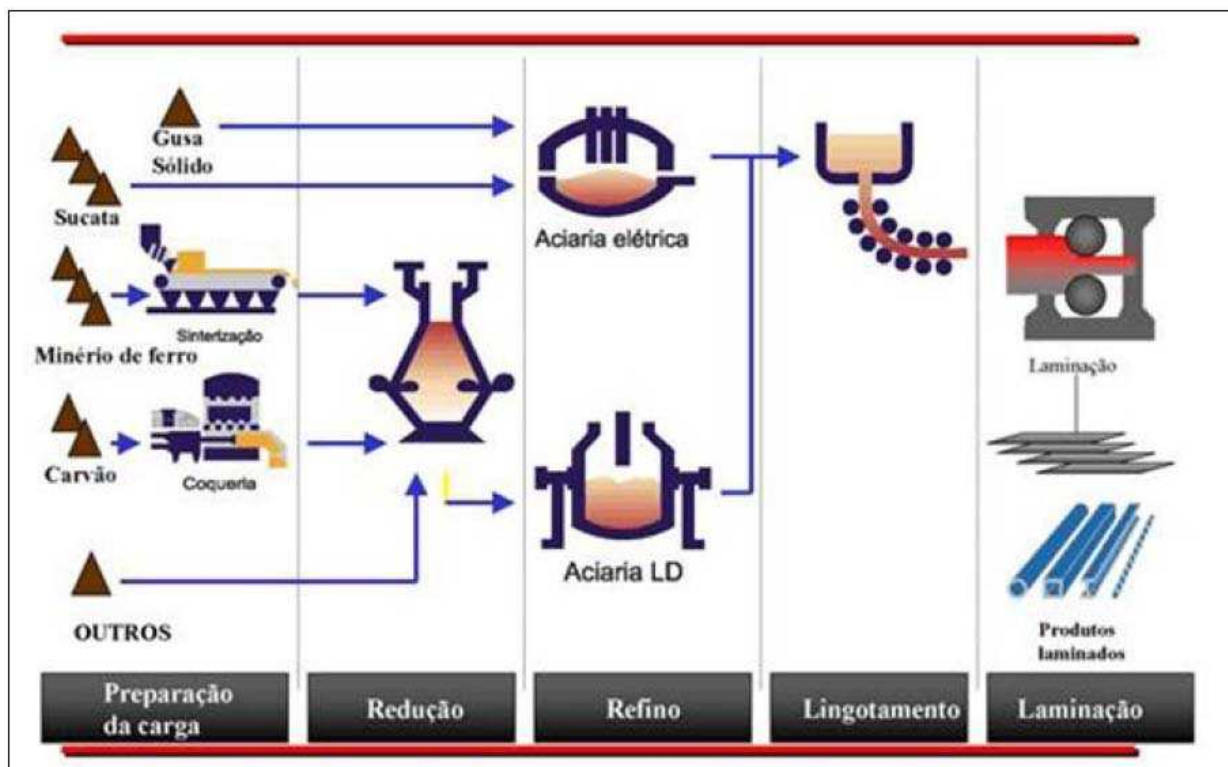


Figura 4 - Processo de fabricação do aço (IBS, 2006)

O processo LD (Linz-Donawitz) ou BOF (BlastOxygenFurnace) utiliza o conversor a oxigênio, onde o ferro gusa é transformado em aço. Neste processo, é adicionado no conversor, além do ferro gusa, sucata, óxido de cálcio, óxido de magnésio e oxigênio a alta pressão (Figura 5). O oxigênio e o óxido de cálcio são usados para eliminar elementos indesejáveis do aço, como carbono, silício e fósforo. O óxido de magnésio é utilizado para proteger o refratário do forno (IBS, 2006)

Já o método EAF (Electric Arc Furnace) usa um arco elétrico que permite a passagem de corrente elétrica entre o ferro gusa, a sucata e os eletrodos de grafite ou carvão amorfo. Após a fusão da sucata, injeta-se oxigênio, por meio de uma lança, a fim de promover as reações de oxidação do carbono, silício e fósforo. A adição de CaO e MgO promove as reações de refino que conduzem à formação de escória de aciaria constituída de silicatos e óxidos (IBS, 2006).

A escória de aciaria é obtida na etapa de redução do ferro, seja na forma de gusa líquido ou na forma de ferro esponja, e fica separada do aço por diferença de densidade. Depois de gerada e separada, a escória é conduzida por meio de vagões ou potes Carrier para pátios de resfriamento. Após o resfriamento, é realizada a fragmentação da escória e retirada grandes placas metálicas com a utilização de um eletroímã. Depois, a escória de aciaria é conduzida para uma planta de beneficiamento, em que é realizada a britagem, a separação granulométrica e metálica (IBS, 2006).

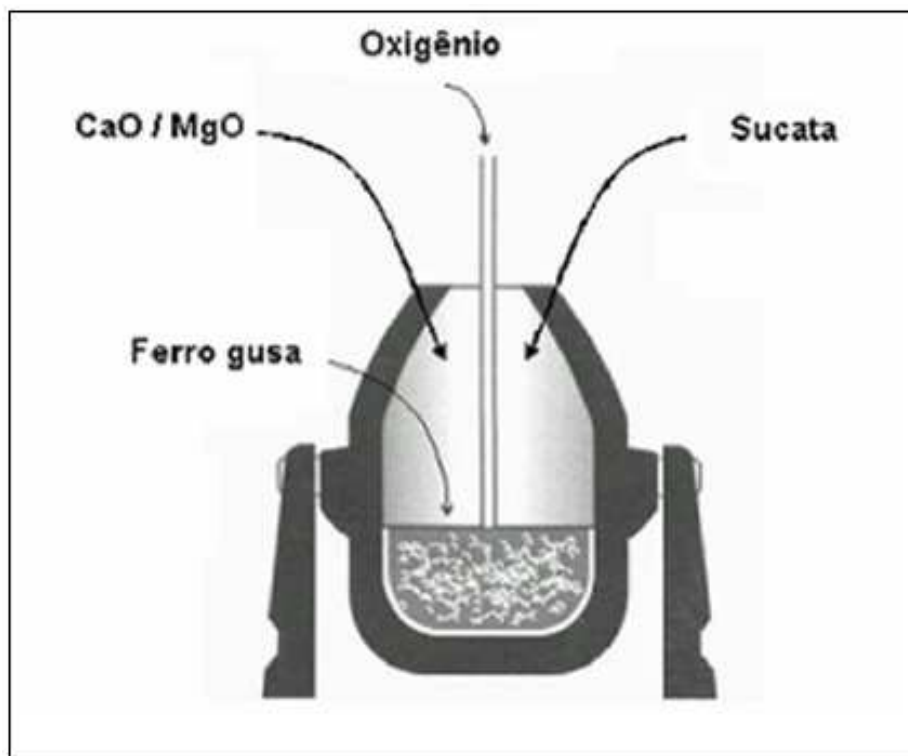


Figura 5 - Conversor LD (CST, 2005)

2.2.2. *A problemática do armazenamento de escória*

Ultimamente, um dos maiores problemas de preocupação mundial, de forma crescente, tem sido a geração de resíduos, sejam industriais ou urbanos, que por muitas vezes acabam por poluir o meio ambiente, causando problemas de armazenamento.

A escória de aciaria, juntamente com a escória de alto-forno, é um dos resíduos que são gerados em maior volume pelas indústrias siderúrgicas. Entretanto, sua aplicação, ao contrário da escória de alto-forno, é restrita, devido a sua heterogeneidade e seu alto potencial expansivo na condição inicial de geração. A partir de tratamentos adequados aplicados à escória de aciaria há diminuição dos mecanismos expansivos que viabilizam sua efetiva aplicação. Entretanto, o uso da escória, sem qualquer tipo de tratamento, tem causado problemas de desempenho do material, aumentando a desconfiança por parte da sociedade e do meio técnico.

O principal problema da escória está relacionada com a expansibilidade de seus óxidos, o que limita seu uso. É por essa razão que muitas pesquisas são feitas para controlar seu potencial de expansibilidade.

As reações expansivas envolvem determinados compostos presentes na escória gerando tensões internas que resultam em trincas e pode até chegar à pulverização do material. Os principais compostos instáveis presentes na escória de aciaria são o óxido de cálcio e de magnésio livres, enquanto o ferro metálico e o silicato dicálcico também causam expansão na escória, porém em menor escala.

Ao reagir com água, o óxido de cálcio livre da escória forma compostos volumetricamente maiores e, suas partículas hidratadas crescem em uma orientação preferencial produzindo pressão ao seu redor, causando, assim, o fenômeno de expansão (LIMA, 1999).

De acordo com o estudo desenvolvido por Geyer (2001), “o volume mundial gerado de escoria de aciaria é da ordem de 84 milhões de toneladas por ano, sendo que o Brasil retém aproximadamente 5 % desta geração. Por isso a importância de se estudar a sua reciclagem como forma de resolver o problema de armazenagem ou “bota-fora” desta escória. Entretanto, há alguns inconvenientes no uso deste produto, por exemplo, a cal que participa no processo de produção do aço, parte pode permanecer como matéria prima não reagida presente na escória. Como a cal, em presença de umidade, reage, formando compostos expansivos, limita-se o uso.”

A crescente preocupação com o desenvolvimento sustentável, com o meio ambiente e com os planos de expansão de algumas empresas motivam as siderúrgicas a investir cada vez mais em tratamentos das escórias de aciaria, visando a minimizar o efeito das reações expansivas de seus componentes.

Existem diferentes técnicas de tratamento da escória de aciaria, como a inserção de novos agentes escorificantes (para a redução de compostos expansivos na escória resultante), as adições na escória líquida (para estabilizar quimicamente os compostos expansivos), a granulação (para alterar a estrutura cristalina da escória de aciaria), a cura a vapor ou tratamento em autoclave (para a hidratação forçada dos compostos expansivos por esta reação) e, simplesmente, o tratamento ao tempo.

Entre estes compostos volumetricamente instáveis, o CaO e o MgO são os mais importantes e os maiores responsáveis pela desintegração e enfraquecimento, por diferença de volume molar nas suas reações (ALEXANDRE et al., s.d; GEISELER; SCHLOSSER, 1988; GEISELER; MOTZ, 1998; GUMIERI et al., 2000; MACHADO, 2000; SAHAY et al., 2000; ÂNGULO et al., 2001).² A Tabela 1 mostra os principais componentes da escória de aciaria.

² **Siderurgia Brasil:** 2012. Disponível Em: <<http://www.siderurgiabrasil.com.br/novosb/component/content/article/50-materias47/204-escoria-de-aciaria>>. Acesso Em: 29 Agosto 2012, 16:50:22.

Tabela 1 - Composição química da escória de aciaria da Arcelor Mittal Tubarão³

<i>COMPONENTE</i>	<i>ESCÓRIA DE ACIARIA LD (%)</i>
Óxido de Cálcio	23-46
Óxido de Magnésio	5-13
Dióxido de Silício	11-15
Óxido de Alumínio	0,8-4
Ferro total	14-22

Observa-se que é fundamental o conhecimento sobre o processo de produção da escória, visto que as variações na composição química resultam em variações nas propriedades do material. O grande problema da escória de aciaria está na sua expansibilidade causada pela presença de óxidos na composição química, por isto existe uma grande quantidade de tratamentos para reduzir a expansibilidade do material.

2.2.3. O aproveitamento econômico da escória

De acordo com VON KRÜGER (1995), as escórias de aciaria têm como destinação mais comum a de agregado na construção civil, na pavimentação de estradas de rodagem e como lastro de ferrovias, sendo que ela deve passar, antes, por um período de cura. Como agregado, na construção civil, ela substitui parcialmente a areia e/ou a brita. No concreto, a escória entraria como adição ou como agregado.

Entretanto, a utilização da escória de aciaria está condicionada à sua competitividade na região com os agregados naturais. As escórias de aciaria têm, também, propriedades cimentantes latentes, se bem que menos que as escórias de alto-forno. Para o seu emprego efetivo nesta direção, devem ser corrigidas com alumina e submetidas a resfriamento brusco, ou seja, uma granulação, como nos altos-fornos (VON KRÜGER, 1995).

Desse modo, as indústrias siderúrgicas, em sua maioria, têm aumentado imensamente o interesse pela reciclagem desses resíduos, uma vez que as normas ambientais se tornam mais exigentes e devido à necessidade de consciência ambiental, e em busca por maiores lucros.

³ **Arcelormittal Tubarão:** 2012. Disponível Em: < http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_aciaria_ld/index.asp >. Acesso Em: 29 Agosto 2012, 16:20:22.

A redução do consumo de energia é um dos fortes argumentos para o incentivo da reciclagem de resíduos, particularmente da indústria cimenteira, na construção de revestimento asfálticos. Desse modo, há possibilidades de mercados significativos para os cimentos de Portland, que reduz consideravelmente o consumo energético, e para as obras rodoviárias, por exemplo, na construção de aterros rodoviários, revestimento primário nas vias urbanas e rurais, pátios de estocagem, base e sub-base de vias, capa asfáltica de vias, e Gabiões/Rip Rap. As possibilidades atuais de mercado dos cimentos de escória são significativas, o mercado apresenta fortes mudanças, que incluem mecanismos que facilitam a aceitação de novas tecnologias.

Cita-se em seguida algumas das mais importantes aplicações da escória de aciaria na construção civil voltada para a área geotécnica.

2.2.4. Exemplo de aplicação de escória de aciaria

a) Aterros rodoviários⁴

Para aterros de grande volume e com altura superior a 3 metros, pode-se utilizar a escória de aciaria LD nas primeiras camadas, desde que haja um recobrimento mínimo de 2 metros, com material argiloso ou arenoso sobre a escória lançada, antes de lançar qualquer estrutura de pavimento, isso devido à expansibilidade da escória.

Na execução de bases, do tipo Telford, normalmente sobre solo mole e com nível de lençol freático elevado, é recomendado o uso de escória com granulometria até 4", que em contato com a água, provoca uma reação de natureza exotérmica. Tal propriedade é conhecida como hidraulicidade.

b) Revestimento primário nas vias urbanas e rurais⁵

Devido à hidraulicidade, as escórias apresentam propriedades cimentantes, que as tornam interessantes para essa aplicação pela qualidade final do revestimento, sendo uma opção tecnicamente superior e economicamente mais vantajosa, quando se trata de revestimento primário. A alta resistência mecânica, associada a um desgaste reduzido, quando

⁴**Arcelormittal Tubarão:** 2012. Disponível Em: <http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/aplicacoes/aplicacoes_rodoviarias/aplicacoes_rodoviarias.asp#div01>. Acesso Em: 29 Agosto 2012, 18:20:22.

⁵**Arcelormittal Tubarão:** 2012. Disponível Em:<http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/aplicacoes/aplicacoes_rodoviarias/aplicacoes_rodoviarias.asp#div01>. Acesso Em: 29 Agosto 2012, 18:20:22.

comparado com outros materiais, oferecem um revestimento eficiente e de baixo custo de manutenção ao longo do tempo.

Para essa utilização, fica condicionada uma separação granulométrica para retirada do material com granulometria acima de 257 mm, para posteriormente aplicar sobre o leito do terreno, devidamente escarificado. Deverá ser espalhada com moto-niveladora, compactada com rolo liso e executada uma imprimação com CM-30 e pintura de ligação com emulsão asfáltica tipo RR-1C numa taxa de 1,2 l/m², e sobre a pintura lançar cerca de 5 litros por metro quadrado, de areia média e novamente o rolo de chapa promoverá o fechamento dos vazios (película de proteção anti-pó). Pode futuramente, ser transformada em sub-base para a pavimentação da mesma rua, incorporando a escória ali depositada, agora com expansão bastante reduzida, proporcionando uma sub-base excelente. Para essa aplicação, são recomendadas as escória de aciaria LD e a escória de aciaria *in natura*. A Figura 6 mostra exemplos do uso de escória no revestimento primário de vias urbanas e rurais.



Figura 6 - Utilização de escória de aciaria em vias urbanas e rurais (CST, 2012)

c) Pátios de estocagem/manobra e acessos para cargas pesadas⁶

A escória, por ser um material resistente e por outras características já citadas como sua propriedade cimentante, é recomendada para pistas que requerem uma grande resistência como áreas de tráfego pesado, com caminhões para transporte de cargas pesadas. Por isso, a utilização de escória para essa aplicação é muito recomendada, desde que ela não esteja confinada e não tenha qualquer revestimento sobre ela. A escória deverá ser espalhada, cerca de 20 cm de espessura, molhada e compactada, e sobre ela ser lançada uma escória de granulometria mais fina (0 a 10 mm) com 10 cm de espessura para preenchimento de vazios, e nova rolagem para acabamento (CST, 2012).

⁶Arcelormittal Tubarão: 2012. Disponível Em: <http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/aplicacoes/aplicacoes_rodoviaras/aplicacoes_rodoviaras.asp#div01>. Acesso Em: 29 Agosto 2012, 18:20:22.

Se houver necessidade de eliminar o pó, pode-se imprimir com CM-30 e posteriormente dar um banho com emulsão tipo RR-1C numa taxa de 1,2 l/m², lançando sobre esta emulsão areia média e compactado com rolo liso. Para essa aplicação, é recomendada a Escória de Aciaria in natura, com granulometria até 32 mm.

A Figura 7 mostra exemplos de utilização de escória em pátios de estocagem e manobra.



Figura 7 – (A) Obra no pátio da BRASIL QUARIES (B) Obras em pátio na Rodovia do Contorno (CST, 2012).

d) Base e Sub-base de vias

As escórias de aciaria apresentam valores de CBR (California Beatung Ratica – Índice de Suporte Califórnia) acima dos apresentados pelos agregados pétreos, sendo, portanto, um material com excelente capacidade de suporte, fator que favorece sua aplicação em bases e sub-bases, podendo ser misturada com outros materiais (por exemplo, argila), oferecendo uma economia de material sem comprometer a estrutura do pavimento (CST, 2012).

Nesse caso, recomenda-se a ACERITA® que pelas suas características possibilita a redução de camadas ao utilizar, por exemplo, o método de dimensionamento ELSYM 5.

e) Como material constituinte de muros de gabiões

A alta densidade da Escória LD torna-a muito eficaz em obras de contenção. O peso próprio da Escória LD chega a ser 70% maior que os agregados pétreos, resultando em uma contenção de alta qualidade. Outras vantagens: baixo custo de implantação e manutenção, alto poder drenante, excelente aparência visual, e preservação dos recursos naturais. A Figura 8 mostra exemplos de aplicação de escória em muros de gabião.

O estudo da escória, a implementação da automação e instrumentação inteligente neste processo resulta em economia de energia e maior aproveitamento dos materiais que eram tratados como resíduos.

A Tabela 2 apresenta um resumo das principais propriedades da escória de aciaria que são de interesse para as obras de engenharia.



Figura 8 - Obras no Contorno de BR 393 em Volta Redonda - R.J. (CST, 2012)

Tabela 2 - Propriedades principais da escória de aciaria - Fonte IBS 1998.⁷

PROPRIEDADES	APLICAÇÕES CORRESPONDENTES
Resistência à carga / compressão	- Concreto - Asfalto - Lastro - Bases de estrada
Durabilidade da resistência	- Concreto - Asfalto - Lastro - Bases de estrada
Drenagem livre	- Lastro - Bases de estradas - Preparo de Terrenos
Partículas angulares interligadas	- Concreto - Asfalto - Lastro
Resistência à derrapagem	- Concreto - Asfalto
Inércia	- Bases de estradas - Prep. Terrenos
Basicidade / CaO contido	- Cimento - Uso agrônômico
Teor de P ₂ O ₅ solúvel	- Uso agrônômico - Fertilizantes

⁷Arcelormittal Tubarão: 2012. Disponível Em: < http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_aciaria_ld/index.asp>. Acesso Em: 29 Agosto 2012, 16:36:32.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, é apresentado os materiais selecionados para a realização desta pesquisa e o método investigativo adotado para que sejam atingidos os objetivos propostos. A parte experimental foi realizada no laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UFV. A pesquisa abrangeu a realização de ensaios de caracterização geotécnica, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR), triaxial CID, Módulo de resiliência e Equivalente de areia, tendo em vista a produção de estradas de pavimento dentro dos campos de extração, lavra e beneficiamento do minério de ferro.

Torna-se relevante às considerações sobre o material utilizado na pesquisa experimental e a metodologia de trabalho empregada para caracterizar e investigar os diferentes tipos de rejeito de minério de ferro e a escória de aciaria, no âmbito de sua estabilidade volumétrica, uma vez que seu comportamento está diretamente ligado ao seu processo de produção do aço e beneficiamento (resfriamento e cura).

A escória estudada neste trabalho foi disponibilizada pela CENIBRA- Belo Oriente-MG e é de procedência da empresa Usiminas, situada no município de Ipatinga – MG. Já os rejeitos são de procedência da companhia Vale, Mina de Alegria, Mariana-MG E ainda, o cascalho utilizado foi coletado nas dependências do Campus da Universidade Federal de Viçosa, situada no município de Viçosa –MG. Este material é de procedência de uma cascalheira localizada no município de Coimbra – MG.

3.1. Os Materiais

Os materiais de solo empregados nesta pesquisa foram:

- Rejeito de minério de ferro, oriundo do processo de beneficiamento por flotação;
- Rejeito de minério de ferro, oriundo do processo de beneficiamento por concentração magnética;
- Escoria de Aciaria LD;
- Cascalho;

3.1.1. Rejeitos de minério de ferro

Entre as amostras de materiais empregados nesta pesquisa, os dois tipos de rejeitos de minério de ferro são provenientes da usina de beneficiamento da mina de Alegria, localizada no Município de Mariana – MG, Figura 9.



Figura 9 - Complexo Mariana – Mina da Alegria

Os materiais colhidos foram obtidos no processo de beneficiamento ou tratamento do minério que visa preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais.

A coleta ocorreu no período de manutenção da usina supracitada, interceptando-se os dutos de destinação final dos rejeitos à barragem. Este procedimento foi necessário em razão das altas pressões exercidas na tubulação durante o pleno funcionamento do sistema. Conforme descritas a seguir:

Amostra do Rejeito 1: doravante denominado de “rejeito de flotação”, corresponde a separação dos minerais por flotação, representa o *underflow* gerados pelos hidrociclones, conforme mostrado nas Figuras 10 e 11.



Figura 10 - Ponto de coleta da amostra (rejeito de flotação)



Figura 11 - Coluna de flotação

Amostra do Rejeito 2: doravante denominado de “rejeito de concentração magnética” é o *underflow* do cone desaguador dos rejeitos de concentração magnética. As Figuras 12, 13 e 14 mostram as unidades de geração e coleta destes rejeitos.



Figura 12 - Vista superior do cone desaguador do rejeito da separação magnética.



Figura 13 - Ponto de coleta do rejeito de concentração magnética



Figura 14 - Vista inferior do cone desaguador e ponto de amostragem do rejeito denominado "concentração magnética".

3.1.2. Escória de aciaria

Nesta pesquisa foi utilizada a escória de aciaria do processo LD, britada e de granulometria fina, Figura 15, com a constituição granulométrica mostrada na Tabela 3, e curva granulométrica mostradas na Figura 15. A escória de aciaria foi adicionada às diferentes misturas com a finalidade de melhorar a capacidade de suporte. Dessa escória utilizada foi proveniente da Usiminas, localizada no Município de Ipatinga-MG, e cedida pela empresa CENIBRA, localizada no Município de Belo Horizonte – MG.

A escória de aciaria utilizada nesta pesquisa já havia passado pelo processo de cura estando atenuada quanto aos aspectos expansivos. Logo, neste trabalho, não se preocupou com o fator expansão. Entretanto, isso se tornará evidente nos resultados de expansão obtidos no ensaio CBR.

Tabela 3 – Granulometria da escória de aciaria fina utilizada

Peneira	% retida
Resistência à carga / compressão	- Concreto - Asfalto - Lastro - Bases de estrada
Durabilidade da resistência	- Concreto - Asfalto - Lastro - Bases de estrada
Drenagem livre	- Lastro - Bases de estradas - Preparo de Terrenos
Partículas angulares interligadas	- Concreto - Asfalto - Lastro
Resistência à derrapagem	- Concreto - Asfalto

As escórias podem ser classificadas de diferentes tipos de agregados segundo sua granulometria e capacidade de moagem dos britadores. De maneira geral, as escórias podem ser classificadas em função da capacidade de moagem dos britadores como:

- Escória fina/moída, de 0 " a 3/4" (0 a 19 mm);
- Escória média, de 3/4 "a 1 1/4" (19 mm a 32 mm);
- Escória Grossa, 1 1/4"a 3" (32 mm a 75 mm)

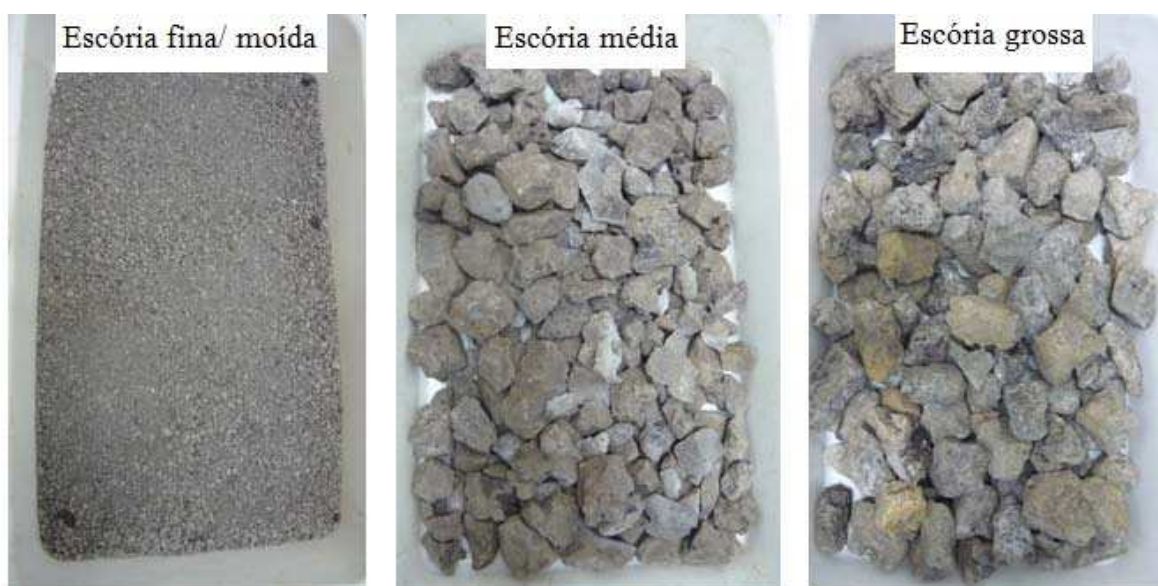


Figura15 – Diferentes tipos de escória em função da granulometria

A seguir Figura 16 indica da disposição da escória de aciaria fina e a correspondente curva granulométrica e a Figura 17 a curva granulométrica de escória de aciaria fina.



Figura 16 – Escória de aciaria fina

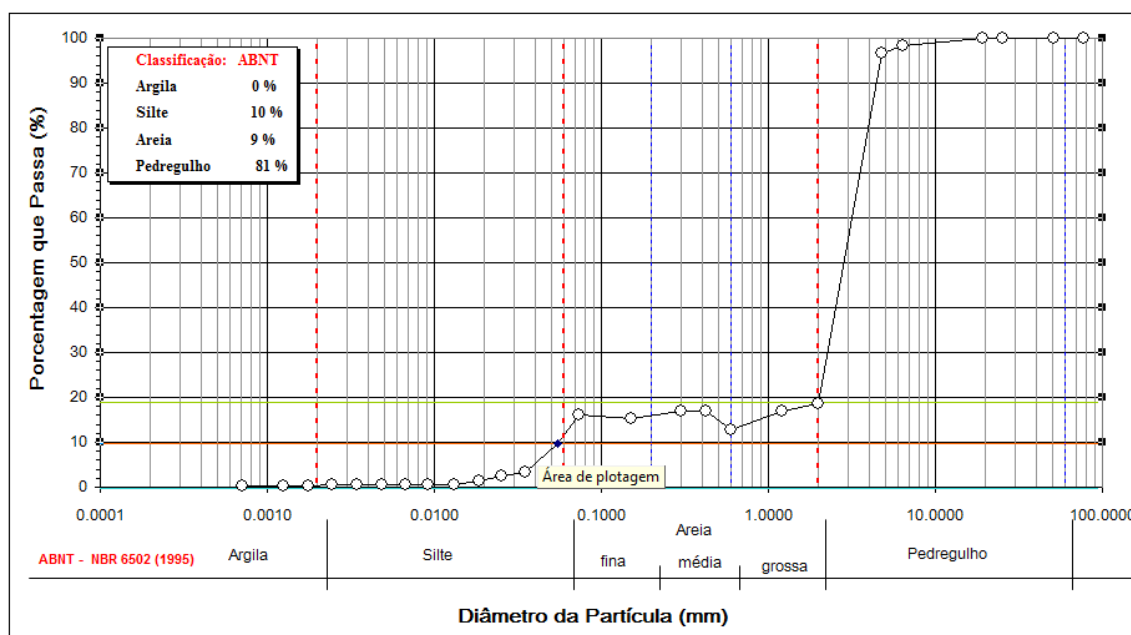


Figura 17 – Curva granulométrica da escória de aciaria fina

3.2. Metodologia dos ensaios de laboratório

Para a realização dos ensaios de caracterização geotécnica dos materiais (rejeitos de minério de ferro, cascalho) e aditivos (escória de aciaria) foram realizadas várias fases desde a coleta, preparo e realização dos ensaios propriamente ditos. A ordem de cada uma das fases foi determinada pela disponibilidade dos materiais, equipamentos e facilidades no Laboratório de Mecânica dos Solos do DEC-UFV. De maneira geral, procurou-se realizar primeiramente os ensaios mais simples e à medida que se determinaram as melhores misturas e/ou teores ótimos projetou-se a etapa seguinte de forma a otimizar tanto a utilização dos materiais que existiam em quantidade limitada e também os equipamentos e instalações disponíveis nos laboratórios. Nos subitens seguintes serão descritas as diversas fases e os ensaios envolvidos em cada uma delas.

3.2.1. *Fase I: coleta e preparo das amostras*

A escória de aciaria, originária da USIMINAS, selecionada nesta pesquisa foi retirada dos estoques de materiais Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Solos da UFV. Já os rejeitos de minério de ferro dos processos de flotação e concentração magnética foram coletados na usina de beneficiamento de minério de ferro, Mina de Alegria, Companhia Vale S.A., localizada no Município de Mariana-MG.

A preparação das amostras envolveu a secagem ao ar, destorroamento, peneiramento, quarteadas e armazenamento em sacos plásticos hermeticamente fechados. Todas as amostras foram identificadas para a posterior utilização.

3.2.2. *Fase II: mistura dos rejeitos de flotação e concentração magnética em diferentes proporções*

Inicialmente foram preparadas diversas misturas em diferentes proporções entre os rejeitos de flotação e concentração magnética, afim de que se pudesse identificar através do ensaio de compactação qual a umidade ótima e o peso específico máximo de cada uma delas, e posteriormente qual dessas misturas apresentaria melhor capacidade de suporte através do ensaio CBR. A Figura 18 mostra detalhes dos corpos de prova compactados e imersos em água.

Sendo esta fase preliminar destinada apenas para a determinação da melhor composição granulométrica entre os dois rejeitos de minério de ferro disponíveis, todos os ensaios de compactação foram realizados na energia normal.

As amostras das misturas dos rejeitos de minério de ferro foram secas ao ar, homogeneizadas, quarteadas e misturadas conforme as proporções descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Misturas realizadas em diversas proporções de agregados

MISTURA	Rejeito de Flotação	Rejeito de concentração magnética
MISTURA 1	10%	90%
MISTURA 2	20%	80%
MISTURA 3	30%	70%
MISTURA 4	40%	60%
MISTURA 5	50%	50%
MISTURA 6	60%	40%
MISTURA 7	70%	30%
MISTURA 8	80%	20%
MISTURA 9	90%	10%



Figura 18 – Corpos-de-prova compactados e imersos em água durante 4 dias, em atendimento ao ensaio de CBR

A fase seguinte envolveu o emprego da mistura que apresentou o melhor resultado em termos de Índice Suporte Califórnia (ISC ou CBR). Esta mistura foi denominada genericamente de "Mistura 1" e foi posteriormente composta com outras adições de escória de aciaria e cascalho, em diferentes proporções visando a obtenção de um material de características de resistência suficientes para o emprego como material de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

3.2.3. Fase III: ensaio de caracterização geotécnica

Uma vez obtida a mistura dos rejeitos de flotação e concentração magnética com melhor valor de CBR, denominada de 'Mistura 1', foram realizados, em seguida, diversos ensaios de caracterização geotécnica: análise granulométrica conjunta, massa específica dos grãos de solos, limites de liquidez e de plasticidade. As propriedades físicas obtidas foram utilizadas para efetuar a classificação deste material segundo os sistemas de classificação geotécnica de solos TRB e USCS.

Em seguida, foram realizados os ensaios de compactação (NBR 7182/86) e ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) nas energias dos Proctors intermediário e modificado (NBR 9895/86). As moldagens dos corpos-de-prova foram realizadas por processo dinâmico e utilizaram-se moldes e padrões para a realização dos ensaios de compactação e CBR.

As curvas de compactação serviram para a obtenção dos parâmetros teor de umidade ótima (w_{ot}) e peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}), para preparação dos ensaios de CBR (California bearing ratio, triaxial e módulo de resiliência).

3.2.4. Fase IV: adição de escória de aciaria e cascalho à "Mistura 1"

Nesta etapa foi adicionado escória de aciaria, em diferentes teores, à "Mistura 1", gerando uma nova mistura que será doravante denominada genericamente de "Mistura 2".

O terceiro tipo de composição granulométrica foi obtido pela adição simultânea de escória e cascalho à "Mistura 1". Esta nova mistura será doravante denominada genericamente de "Mistura 3".

Finalmente, o quarto tipo de composição granulométrica foi obtido pela adição de cascalho à "Mistura 1". Esta mistura será doravante denominada genericamente de "Mistura 4".

O objetivo básico destas misturas de materiais alternativas em diferentes composições granulométricas é estudar o seu desempenho no que diz respeito à utilização para fins rodoviários.

As proporções dos materiais utilizados em cada uma das misturas supracitadas estão resumidamente descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Proporções das misturas estudadas

	Rej. Flotação	Rej. Conc. Magnética	Escória	Cascalho
Mistura 1	60%	40%		
Mistura 2	36%	24%	40%	
Mistura 3	24%	16%	30%	30%
Mistura 4	36%	24%	-	40%

Para cada uma das misturas citadas na tabela 5 foram realizados todos os ensaios de caracterização geotécnica previamente descritos.

Os ensaios de compactação e ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) foram realizados na energia de compactação do Proctor intermediário e modificado.

3.2.5. Fase V: determinação da resistência ao cisalhamento em ensaios triaxiais

Para a determinação da resistência ao cisalhamento foram realizados ensaios triaxiais do tipo lento (ensaio consolidado hidrosticamente e drenado, doravante denominado CID). Os corpos-de-prova foram moldados cada nas proximidades da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, obtidos nos respectivos ensaios de compactação, segundo as energias do Proctor Intermediário e Modificado, visando à determinação dos parâmetros de resistência drenados, c' (coesão efetiva) e ϕ' (ângulo de atrito efetivo).

A Figura 19 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio triaxial CID. Este equipamento foi adquirido com recursos do Projeto de Pesquisa FAPEMIG TEC-RDP 0084-10 : "*Utilização de rejeitos granulares em pavimentação*", destacando-se a prensa

de compressão, sistema de aquisição de dados, sistema de controle de variação de volume, painel de controle e transdutores de deslocamento, pressão e força.



Figura 19 - Prensa triaxial

A seguir, são apresentadas as etapas empregadas para a realização dos ensaios triaxiais CID.

- a) Moldagem dos corpos-de-prova: compactação dos corpos-de-prova em três camadas com dimensões finais de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura obedecendo a seus respectivos teores de umidade e grau de compactação.
- b) Preparo do equipamento para realização do ensaio (saturação dos canais e retirada de ar).
- c) Colocação de pedra porosa na base da câmara triaxial e sobre ela o corpo de prova moldado e sobre este outra pedra porosa juntamente com o top cap. Todo este conjunto foi revestido com uma membrana impermeável fixada ao mesmo com anéis de borracha (o-rings), dois destes em cada extremidade. Após isto a câmara triaxial foi fechada e procedeu-se o seu enchimento com água.
- d) Após o enchimento da câmara triaxial, os corpos de prova foram submetidos a percolação com água destilada e deareada, que tem como objetivo a retirada de bolhas de ar do corpo de prova.
- e) Na etapa seguinte o corpo-de-prova foi levado para fase de saturação, onde se aplicou uma contrapressão inicial de 25 kPa, e a cada intervalo de tempo de

aproximadamente 60 minutos esta contrapressão era aumentada de 25 kPa até o corpo-de-prova ficar totalmente saturado ($B > 0,95$).

- f) Na próxima etapa, o corpo-de-prova foi submetido à fase de adensamento com tensões de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.
- g) E por último, realizou-se a etapa de ruptura; com o objetivo de se obter os valores de coesão e ângulo de atrito das misturas compactadas na energia do Proctor intermediário e modificado.

3.2.6. Fase VI: módulo de resiliência

Para a execução dos ensaios de módulo de resiliência os corpos de prova foram moldados cada qual nas proximidades do teor ótimo de umidade e peso específico aparente seco máximo, obtidos em função da energia de compactação empregada.

O equipamento utilizado para obtenção dos resultados é um sistema totalmente automatizado adquirido da empresa Geocomp Corporation Boxborough-MA, USA, onde se insere o corpo-de-prova na câmara triaxial onde a mesma é acoplada na prensa que após a realização dos ensaios gera relatórios técnicos contendo todas as informações referentes aos ensaios.

As etapas para realização destes ensaios obedeceram as seguintes procedimentos:

- Os corpos-de-prova foram moldados em suas respectivas umidades ótimas e peso específico aparente seco máximo. Foram compactados num molde de alumínio bi-partido. A compactação foi realizada por impacto em 5 camadas iguais e com grau de compactação de 100%, obtendo uma dimensão final de 73 mm de diâmetro e 152 mm de altura.
- A fase seguinte envolveu a montagem dos corpos-de-prova na célula triaxial, com pedras porosas e papel filtro colocados no topo e na base. No topo do corpo-de-prova colocou-se o cabeçote de carga (top-cap) e todo o conjunto foi revestido por uma membrana de látex impermeável.
- Após a verificação do alinhamento do corpo-de-prova com o pistão de carga a câmara triaxial foi fechada e a célula foi levada para a prensa de ensaio.
- Após a colocação da câmara triaxial na base da prensa triaxial, procedeu-se à instalação do transdutor de deslocamento (LVDT). Em seguida, fixou-se o duto de injeção de ar comprimido na câmara.

- Na sequência, procedeu-se a realização do ensaio de módulo de resiliência propriamente dito. Este ensaio consiste de uma fase inicial de condicionamento do corpo de prova, que visa eliminar as deformações permanentes mais significativas que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio assim como reduzir o efeito do histórico de tensões no valor do módulo; e de uma fase de aplicação de cargas repetidas (cíclicas) com o respectivo registro das informações de deslocamento, e força aplicados em cada ciclo de carga.
- A fase final consistiu na análise dos resultados e elaboração de gráficos que auxiliam a interpretação dos resultados.

Os ensaios de módulo de Resiliência foram realizados segundo o método de ensaio ME-134 (DNIT, 2010). Estas duas tabelas com as tensões de confinamento (σ_3), tensões desviadoras (σ_d) e número de ciclos de cada estágio devem ser fornecidas como dado de entrada no programa computacional RM5 da Geocomp Corp. Cuidado especial teve que ser tomado na entrada de dados uma vez que segundo a metodologia de interpretação dos resultados deste programa computacional desconsidera o primeiro estágio de carregamento que é considerado como a fase de condicionamento da amostra.

Assim, os ensaios foram realizados utilizando-se um artifício simples em que a fase de condicionamento foi realizada em uma etapa com três sequências de carregamento, sendo que na última foram utilizados 190 ciclos (Tabela 6a). E, na fase de determinação do módulo de resiliência (Tabela 6b), foi acrescentado uma fase extra ($\sigma_3=102,9$ kPa, $\sigma_d=309,0$ kPa) com apenas 10 ciclos). Tal procedimento apenas facilita a análise e interpretação dos resultados utilizando-se o programa computacional RM5.

Tabela 6a – Sequência de tensões para a fase de condicionamento (DNIT, 2010)

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3/σ_d (kPa)	Número de ciclos
20,7	20,7	2	200
68,9	68,9	2	200
102,9	309,0	4	200

Tabela 6b – Sequência de tensões para determinação do Módulo de Resiliência (DNIT, 2010)

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3/σ_d (kPa)	Número de ciclos
20,7	20,7	2	10
	41,4	3	10
	62,1	4	10
34,5	34,5	2	10
	68,9	3	10
	102,9	4	10
50,4	50,4	2	10
	102,9	3	10
	155,2	4	10
68,9	68,9	2	10
	137,9	3	10
	206,8	4	10
102,9	102,9	2	10
	206,8	3	10
	309,0	4	10
137,9	137,9	2	10
	274,7	3	10
	412,0	4	10

3.2.7. Fase VII - ensaio de equivalente de areia

Segundo o método de ensaio ME – 054 (DNIT, 1997), equivalente de areia é por definição a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, em uma proveta, em condições estabelecidas.

O ensaio consiste basicamente em agitar vigorosamente o material que passa na peneira de 4,8mm, misturado com uma solução desfloculante, em um movimento alternado, de forma a executar aproximadamente 90 ciclos em um intervalo de tempo de 30 segundos. Após o repouso de 20 minutos mede-se a altura da coluna de areia e a altura da coluna de argila. O equivalente de areia é a razão entre a coluna de areia e a coluna de argila, conforme a equação 1.

$$E.A = \frac{\text{Leitura do topo da coluna de areia}}{\text{Leitura do topo da coluna de argila}} \times 100$$

A seguir são apresentados na Figura 20 os detalhes das etapas do ensaio de equivalente de areia, realizada no laboratório de mecânica dos solos do DEC-UFV.



Figura 20 – Detalhe do ensaio de Equivalente de areia

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Ensaios de caracterização geotécnica

➤ Análise Granulométrica

A composição granulométrica das diferentes misturas ensaiadas são apresentadas na Tabela 7. Notou-se que em todas as amostras ensaiadas o percentual de areia foi superior a 60 % tendo também frações significativas de silte em torno de 20 %.

Tabela 7 - Composição granulométrica das misturas ensaiadas

Descrição das misturas	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
60 % Concentração + 40 % Flotação (mistura 1)	4	27	69	0
60 % Mistura 1 + 40 % Escória de aciaria	2	18	69	12
40 % Mistura 1 + 30 % Escória + 30 % Cascalho	2	21	64	13

As curvas granulométricas de cada amostra analisada são apresentadas nas figuras 21, 22 e 23.

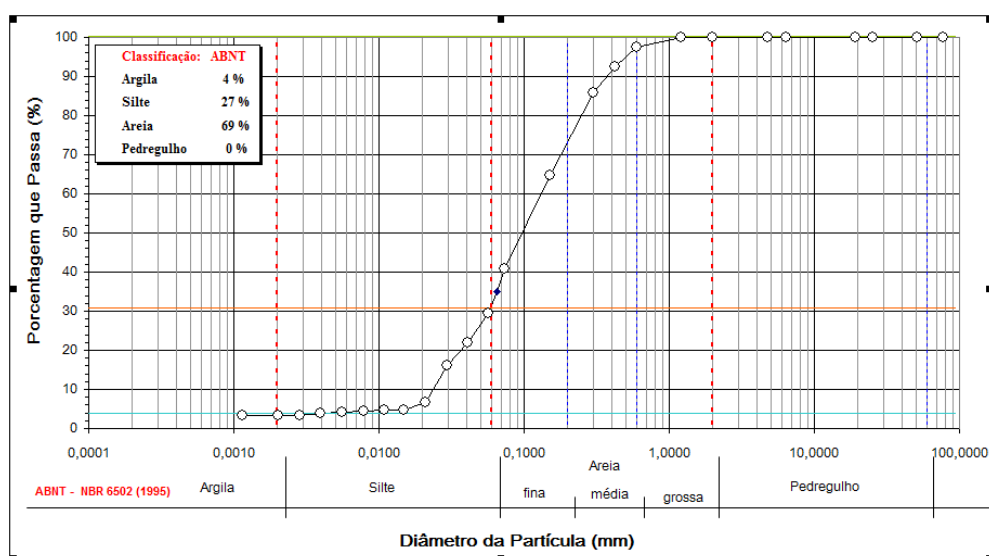


Figura 21 - Curva Granulométrica da Mistura 1
(60% Flotação + 40 % Concentração magnética)

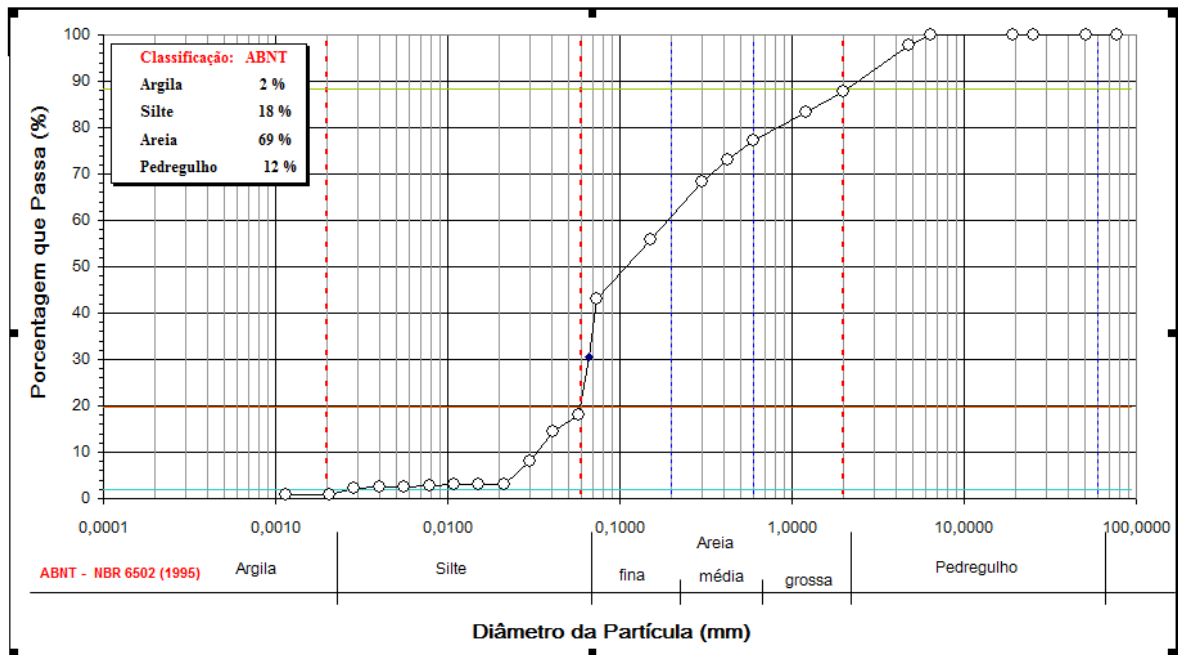


Figura 22 - Curva granulométrica da mistura 2
(60 % Rejeitos de minério de ferro + 40 % Escória)

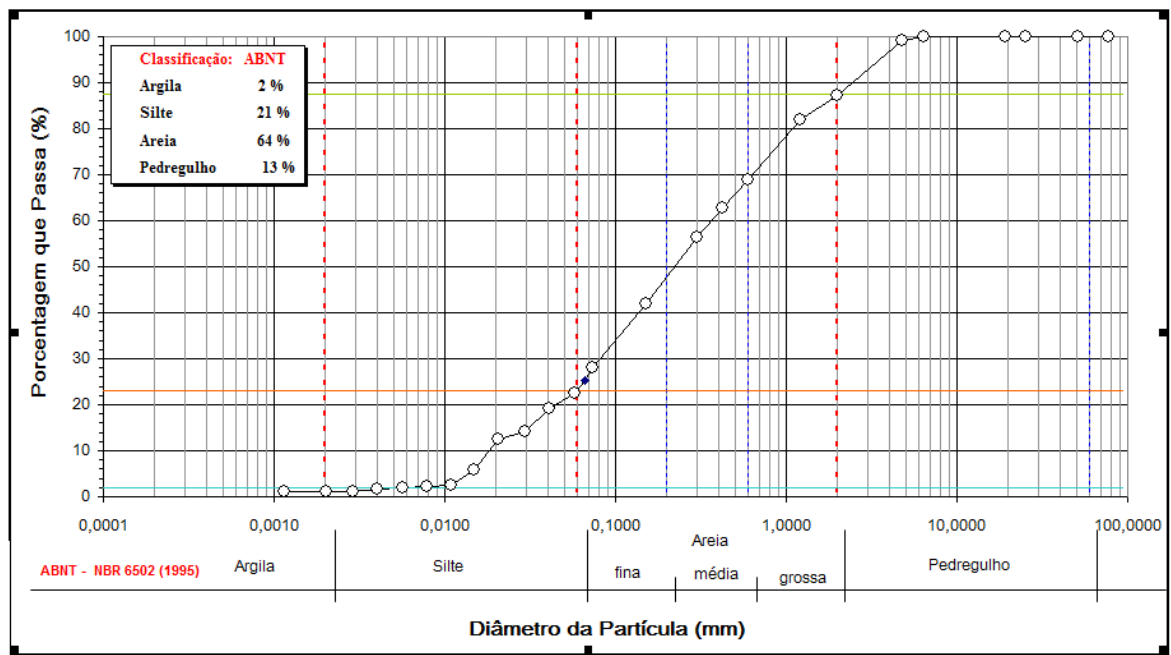


Figura 23 - Curva granulométrica da mistura 3

(40 % Rejeitos de minério de ferro + 30 % Escória + 30 % Cascalho)

As análises dos resultados das granulometrias efetuadas na faixa de tamanho de partícula entre 0,002 a 6,00 mm revelaram que as amostras são compostas majoritariamente por areia (areia fina e média) e com um percentual de silte variando de 18 % a 27 %.

Todas as amostras foram classificadas como solos granulares, constituídas, na maior parte por areia fina e média, em função da porcentagem que passa na peneira 0,075 mm ser menor que 35 %, segundo a classificação TRB, conforme apresentado na Tabela 9.

Nos ensaios de sedimentação obteve-se um resultado que indicou um percentual maior de silte em relação ao de argila. De fato, a pequena quantidade de argila presente em todas as misturas se constata pelo comportamento não plástico (NP) obtido nos ensaios de Limites de Liquidez e de Plasticidade, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites de consistência e massa específica dos sólidos

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Massa específica dos sólidos (kN/m ³)
Mistura 01	NP	NP	-	49,32
Mistura 02	NP	NP	-	42,42
Mistura 03	NP	NP	-	37,29

Tabela 9 - Classificação geotécnica das misturas segundo os sistemas TRB e USCS

Descrição	Classificação dos Solos	
	TRB	USCS
Mistura 01	A-4(8)	SC-SM
Mistura 02	A-4 (8)	SC-SM
Mistura 03	A-2-4 (0)	SC-SM

4.2. Ensaios de compactação e CBR na energia do Proctor normal

Os ensaios de compactação realizados na energia do Proctor normal foram realizados com a finalidade de se determinar as proporções entre os rejeitos de flotação e de concentração magnética que apresentasse o melhor desempenho em termos de via ensaio CBR.

Cabe mencionar que no processo de beneficiamento de minério de ferro que gera estes dois tipos de rejeito arenoso, ocorre a geração tanto do rejeito de flotação como do

rejeito de concentração magnética em processos separados. Tradicionalmente, para a disposição destes rejeitos em pilhas de estéril ou em barragens de rejeito é feita a mistura aleatória dos dois rejeitos. No entanto, para fins de composição granulométrica de misturas apropriadas para utilização em bases e sub-bases de pavimentos, os dois materiais foram tratados em separado e misturados em proporções de forma a obter-se a mistura de melhor desempenho quanto ao aspecto de comportamento mecânico. As proporções estudadas estão mostradas na Tabela 11.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de compactação e CBR – Energia do Proctor normal

Material / Mistura	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	w ótima (%)	CBR 5,0 mm	Expansão CBR (%)
20 % Concentração. + 80 % Flotação.	21,35	9,0	5,6	0,03
30 % Concentração + 70 % Flotação	20,75	11,4	13,83	0,22
40 % Concentração + 60 % Flotação	20,24	11,63	20,34	0,05
50 % Concentração + 50 % Flotação	19,85	10,7	16,49	0,16
60 % Concentração + 40 % Flotação	19,39	13,33	16,15	0,18
70 % Concentração + 30 % Flotação	19,91	9,54	15,9	0,23
80 % Concentração + 20 % Flotação	18,59	9,71	11,61	0,16
90 % Concentração + 10 % Flotação	17,9	7,75	14,83	0,25

Observa-se que a mistura que apresentou melhor capacidade de suporte foi a mistura na proporção de 60 % de rejeito de flotação com 40 % de rejeito de concentração magnética, podendo este ser utilizado como reforço de subleito segundo o Métodos de Projetos de Pavimentos Flexíveis (DNIT, 2010)

Os resultados dos ensaios CBR para as diversas proporções de mistura apresentaram expansão inferior a 0,3 %, que pode ser considerado material não expansivo para fins de projeto de pavimentos.

Tais resultados corroboram os resultados obtidos por Campanha (2011) nos quais os rejeitos de flotação (de granulometria mais fina) apresentaram melhores resultados do que os rejeitos de concentração magnética (de granulometria mais grossa).

A seguir, na Figura 24 é apresentado a curva de compactação da mistura 1 na energia do Proctor normal.

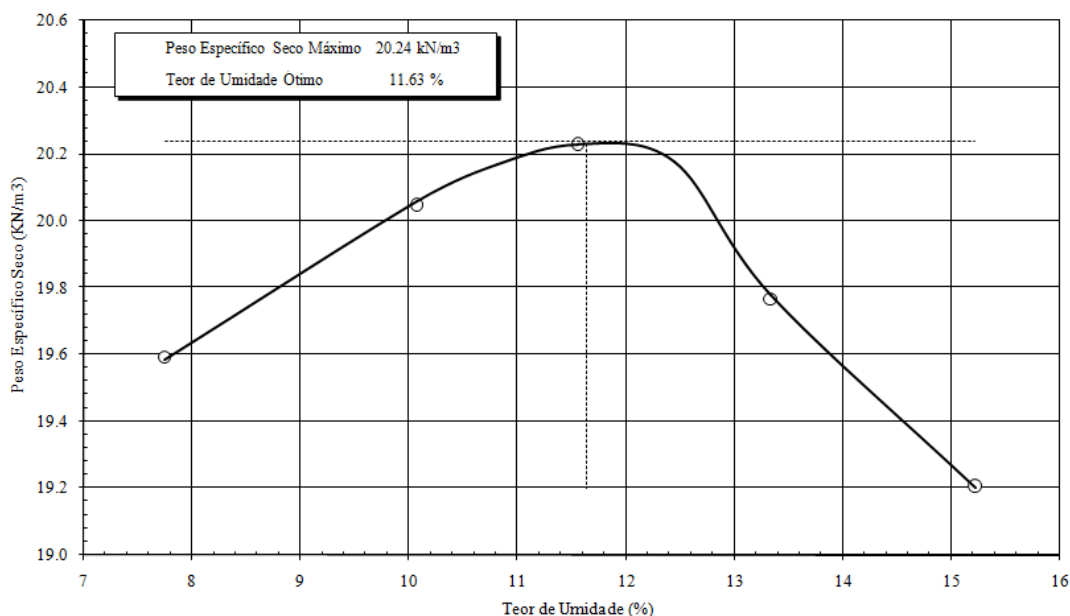


Figura 24 - Curva de compactação para a Mistura 1 na energia do Proctor normal:
(60 % Flotação + 40 % Concentração magnética)

4.3. Ensaios de compactação e CBR na energia do Proctor intermediário

Sendo o objetivo básico a determinação da resistência mecânica e a verificação do desempenho das misturas para fins de pavimentação, foram realizados ensaios de compactação e CBR na energia do Proctor intermediário para as misturas 1, 2 e 3. Os respectivos resultados destes ensaios são mostrados nas Figuras 25 a 27.

A Tabela 12 apresenta resultados dos ensaios de compactação e CBR na energia do Proctor intermediário para as misturas 1, 2 e 3.

Tabela 11 - Resultado do ensaio de compactação e CBR na energia do Proctor intermediário

Traço da mistura	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	w ótima (%)	CBR _{5,0}	Expansão (%)
40 % Concentração + 60 % Flotação	21,06	9,85	49,71	0,20
60 % Mistura 1 + 40 % Escória	19,44	8,14	32,73	0,03
40 % Mistura 1 + 30 % Escória + 30% cascalho	19,92	10,9	55,17	0,07

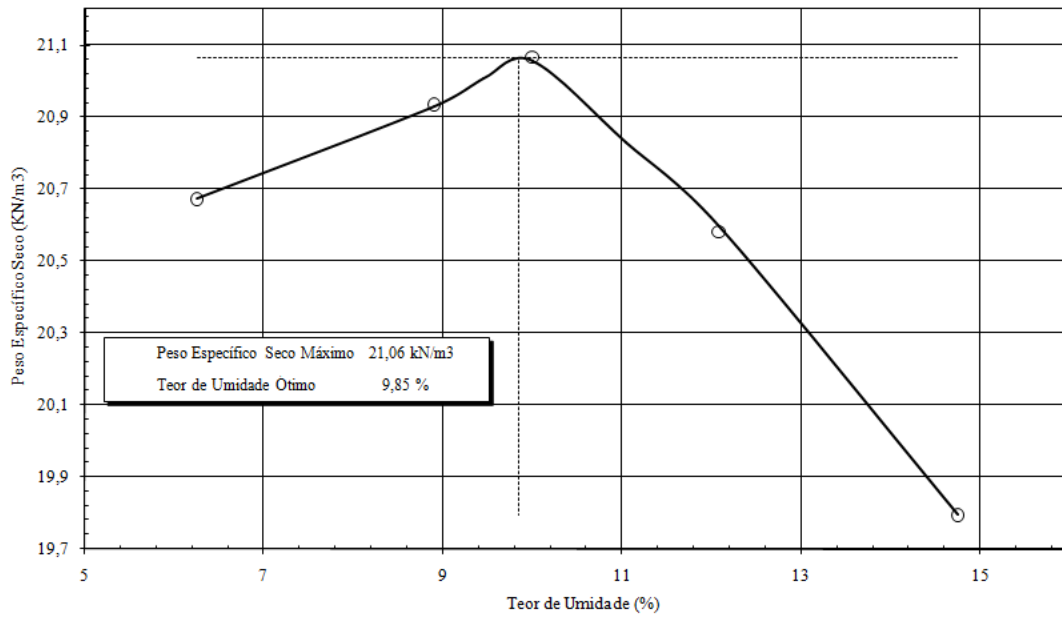


Figura 25 - Curva de compactação para a Mistura 1 na energia do Proctor intermediário:
(60 % Flotação + 40 % Concentração magnética)

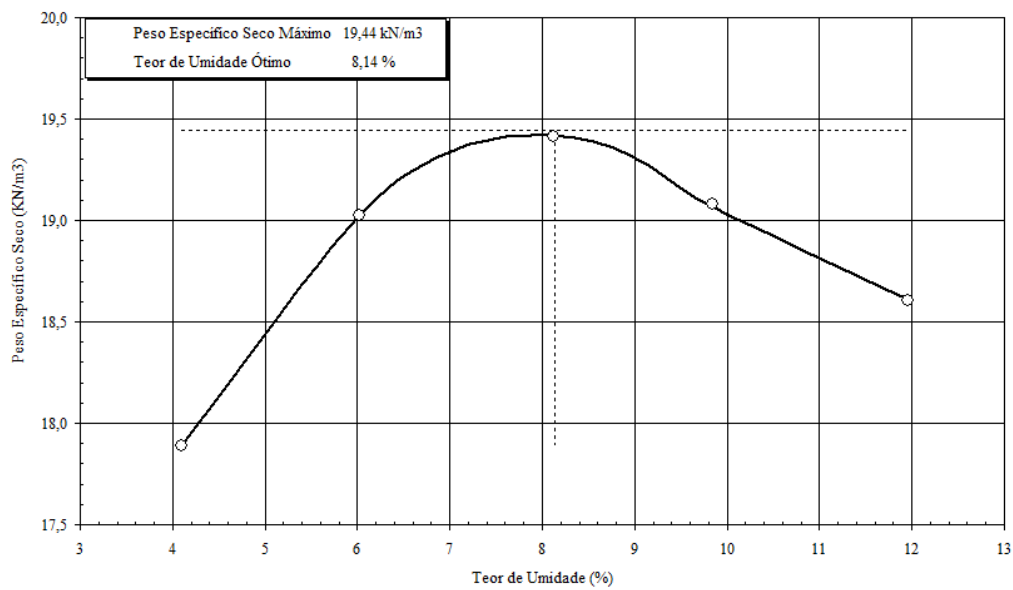


Figura 26 - Curva de compactação para a Mistura 2 na energia do Proctor intermediário:
(60 % Rejeito + 40 % Escória).

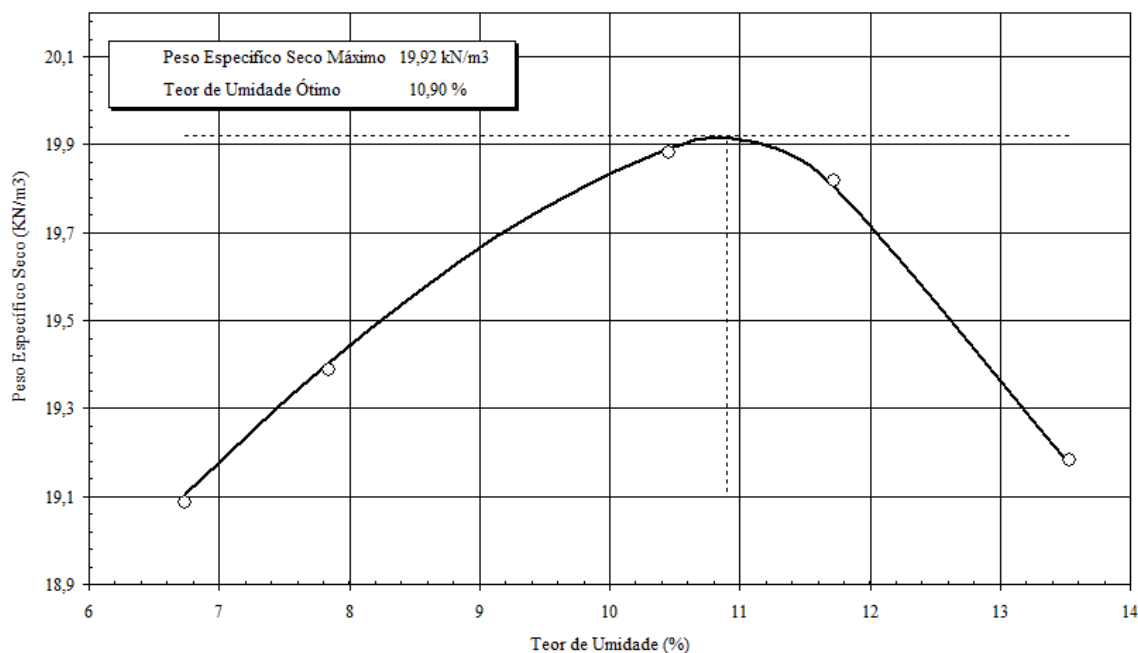


Figura 27 - Curva de compactação para a Mistura 3 na energia do Proctor intermediário:
(40 % Rejeito + 30 % Escória + 30 % Cascalho)

Observa-se que a mistura que apresentou melhor capacidade de suporte foi a mistura contendo 24% de rejeito de Flotação; 16% de rejeito de concentração magnética; 30% de escória de aciaria e 30% de Cascalho; podendo esta ser utilizada como sub-bases, segundo o Métodos de Projetos de Pavimentos Flexíveis, do DNER/DNIT.

Os valores de expansão observados no ensaio CBR foram inferiores a 0,3 %, demonstrando que o material é praticamente inerte em contato com a água. Estes baixos valores de expansão permitem concluir que a escória utilizada já se encontrava atenuada.

Embora a mistura com maior capacidade de suporte tenha sido a citada anteriormente, as outras duas misturas também possuem capacidade de suporte semelhantes e podem ser considerados dentro dos limites estabelecidos pelo DNER/DNIT como materiais passíveis de serem empregados em sub-bases.

4.4. Ensaios de compactação e CBR na energia do Proctor modificada

De maneira semelhante ao descrito no item 4.3, foram realizados ensaios de compactação e CBR na energia do Proctor modificada para as Misturas 1, 2 e 3. Os respectivos resultados destes ensaios são mostrados nas Figuras 28 a 30. A Tabela 12

apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de compactação e CBR na energia do Proctor modificado.

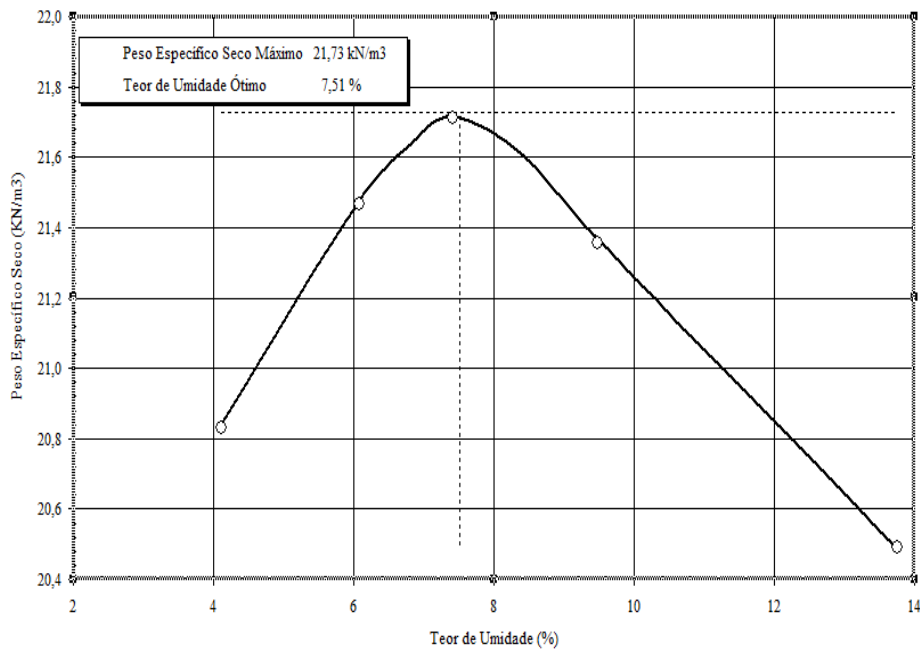


Figura 28 - Curva de compactação para a Mistura 1 na energia do Proctor modificado:
(60 % Flotação + 40 % Concentração magnética)

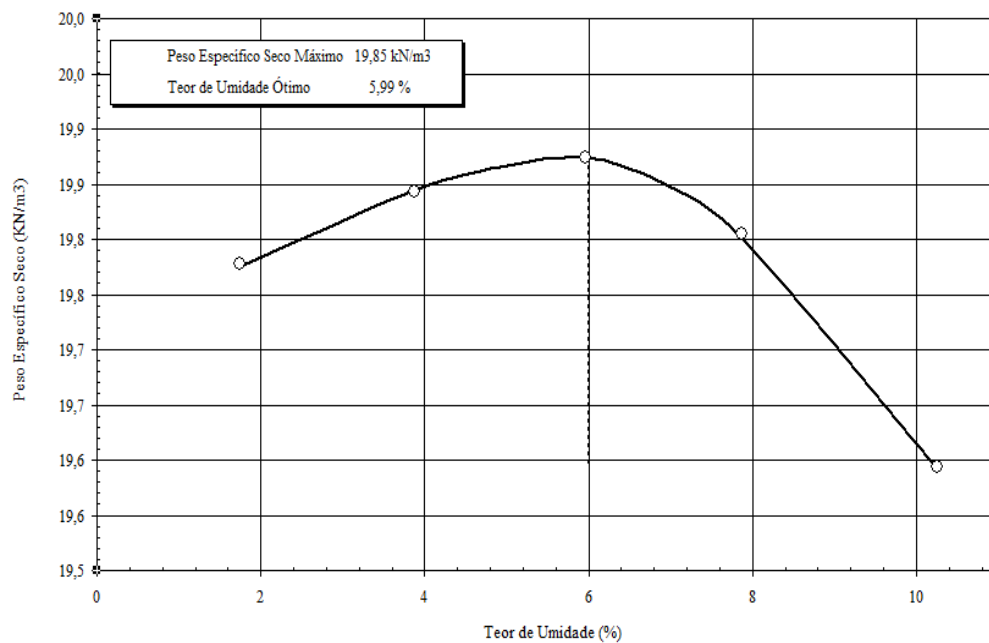


Figura 29 - Curva de compactação para a Mistura 2 na energia do Proctor modificado:
(60 % Rejeito + 40 % Escória)

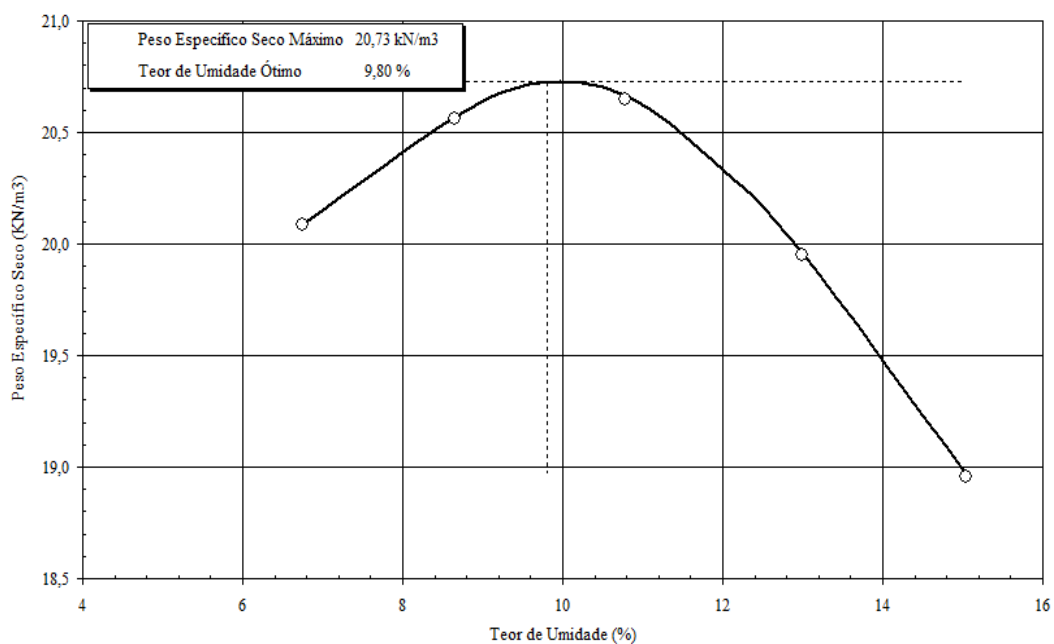


Figura 30 - Curva de compactação para a Mistura 3 na energia do Proctor modificado:
(40 % Rejeito + 30 % Escória + 30 % Cascalho)

Tabela 12 - Resultado do ensaio de compactação e CBR – energia do Proctor modificado

Traço da mistura	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	w ótima (%)	CBR _{5,0}	Expansão (%)
40 % Concentração + 60 % Flotação	21,73	7,15	48,63	0,23
60 % Mistura 1 + 40 % Escória	19,85	5,99	55,17	0,32
40 % Mistura 1 + 30 % Escória + 30 % Cascalho	20,73	9,8	77,51	0,23

Observa-se que a mistura que apresentou melhor capacidade de suporte foi a mistura contendo 24 % de rejeito de Flotação + 16 % de rejeito de Concentração magnética + 30 % de escória de aciaria e 30 % de Cascalho, podendo este ser utilizado como sub-base, segundo o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis, do DNER/DNIT.

Porém deve-se citar que o valor do CBR dessa mistura, está muito próximo do limite do valor mínimo de CBR aceitável para utilização em camada de bases de pavimento que deve ser igual ou superior a 80%.

Embora a mistura com maior capacidade de suporte tenha sido a mistura citada anteriormente os outros dois traços também possuem capacidade de suporte dentro dos limites estabelecidos pelo DNER/DNIT para utilização em camada de sub-bases de pavimentos.

Dentre todos os ensaios CBR realizados nota-se que as amostras, em sua totalidade, apresentaram pesos específicos elevados, variando entre 19.44 kN/m³ a 21.73 kN/m³, isso se deve ao fato de os rejeitos utilizados apresentarem, relativamente, altos teores de minério de ferro, teores estes inferiores ao ponto de se tornar interessante seu beneficiamento.

4.5. Ensaios triaxiais CID

Os ensaios triaxiais CID (Adensado hidrostáticamente e drenado) foram realizados em corpos-de-prova compactados nas energias do Proctor intermediário e modificado, segundo os parâmetros ótimos de compactação mostrados nas Tabelas 10 e 11. Para cada energia de compactação foi determinada uma envoltória com as tensões confinantes de 100, 200 e 400 kPa, respectivamente. O equipamento utilizado na realização destes ensaios foi mostrado na Figura 19.

As imagens da Figura 31; a, b e c, apresentam os corpos-de-prova já rompidos nos ensaios triaxiais CID da Mistura 1, na energia do Proctor intermediário. E as Figuras 32 a 34 apresentam as trajetórias de tensões, curvas tensão x deformação e deformação axial x deformação respectivamente.

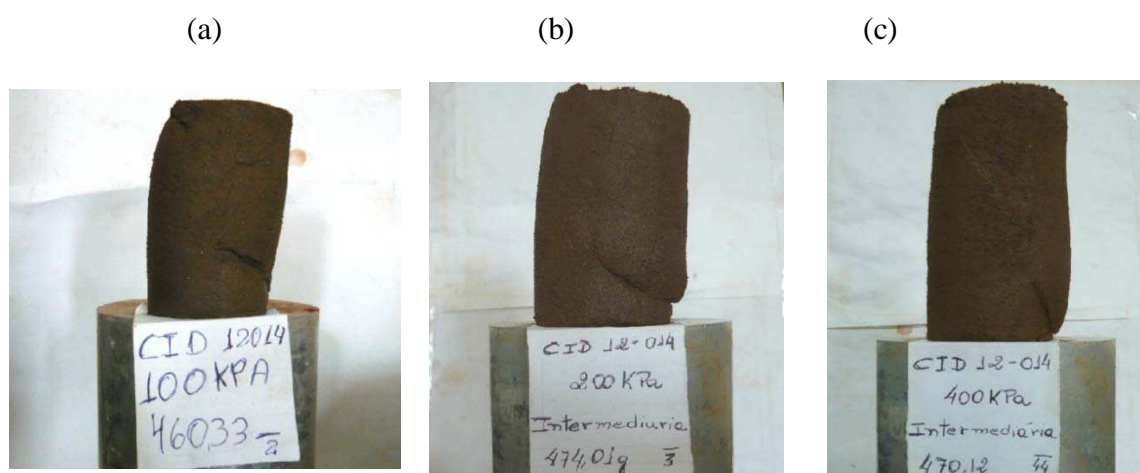


Figura 31- Detalhes dos corpos-de-prova após ruptura – Mistura 1 (Energia do Proctor Intermediário)

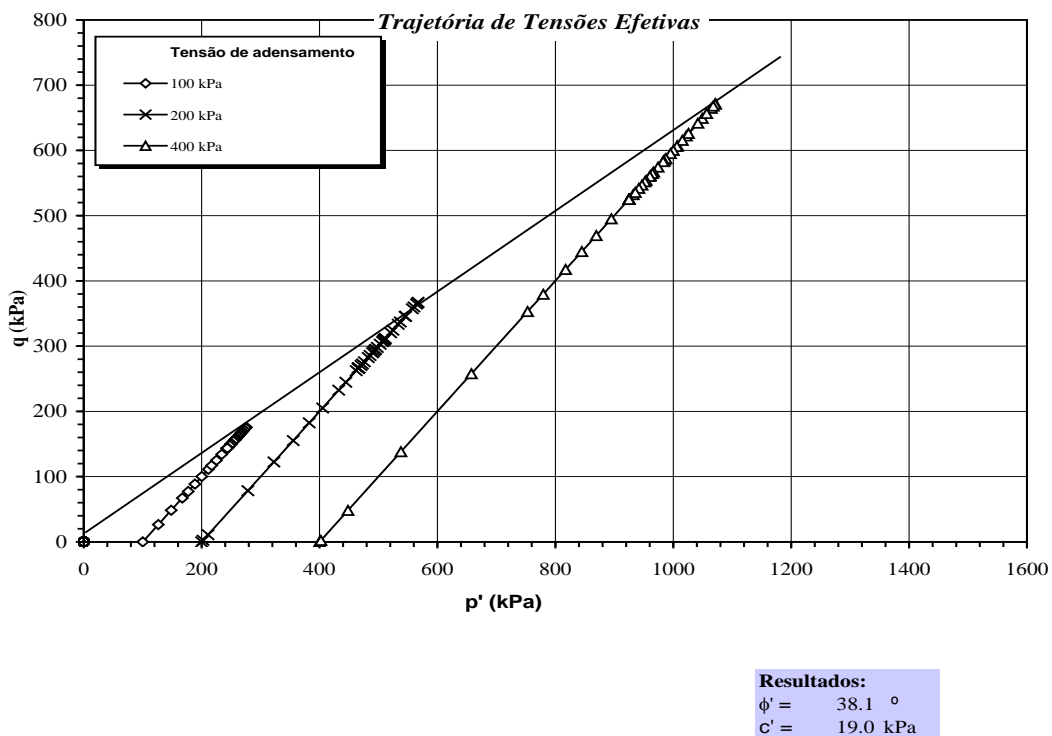


Figura 32- TTE para a Mistura 1 - Energia do Proctor intermediário

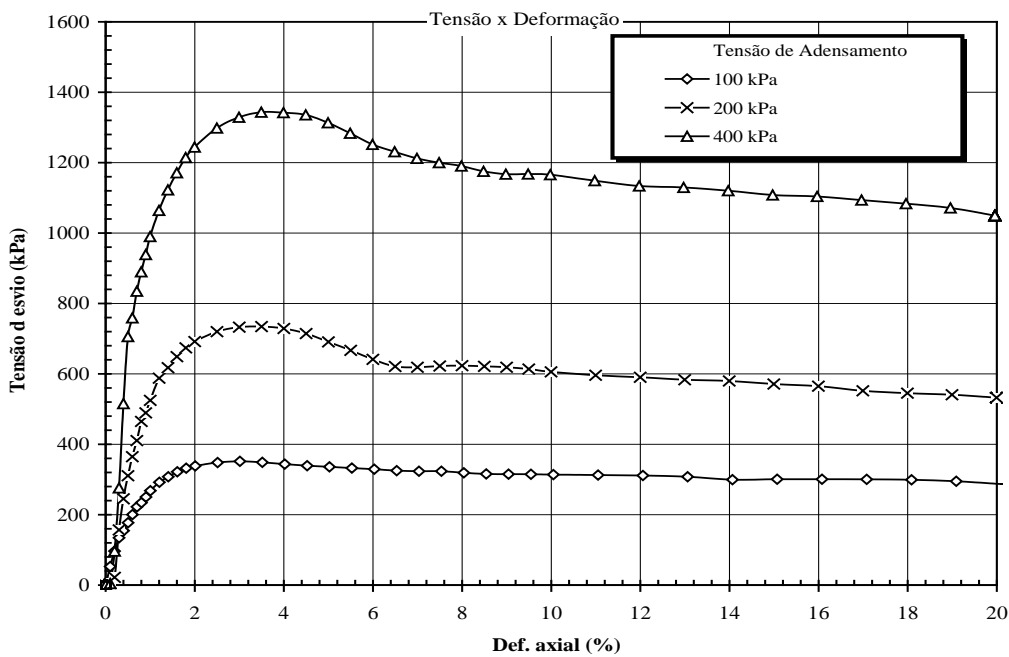


Figura 33- Gráfico de Tensão x Deformação para a Mistura 1 - Energia do Proctor intermediário

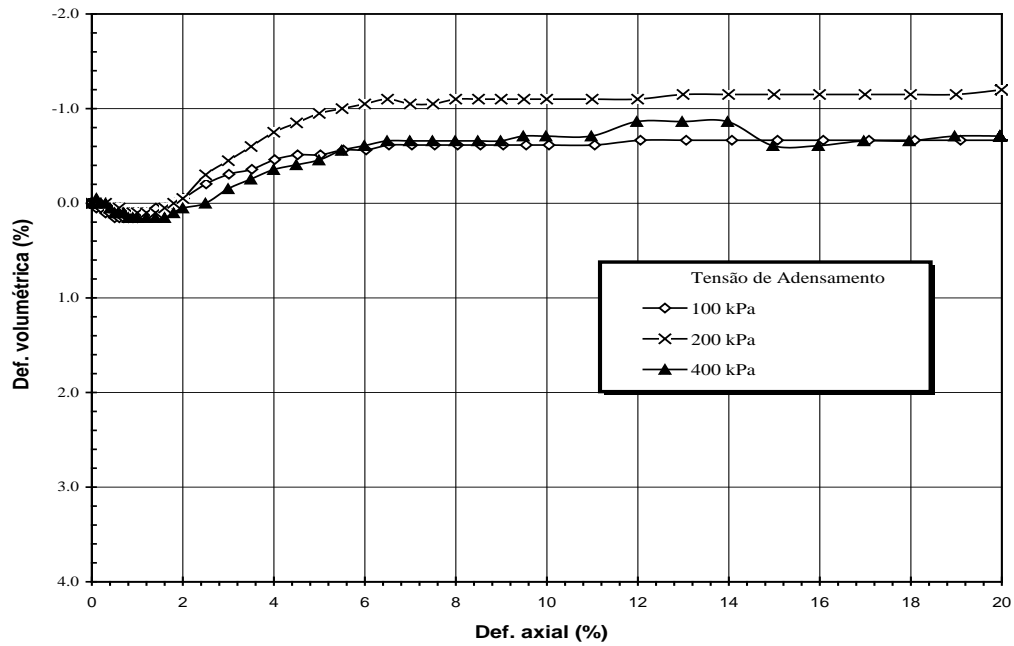


Figura 34- Gráfico de Deformação Axial x Deformação Volumétrica para a Mistura 1 – Energia do Proctor intermediária

As imagens da Figura 35; a, b e c, apresentam os corpos-de-prova já rompidos nos ensaios triaxiais CID da Mistura 2, na energia do Proctor intermediário. E as Figuras 36 a 38 apresentam as trajetórias de tensões, curvas tensão x deformação e deformação axial x deformação respectivamente.



Figura 35- Detalhes dos corpos-de-prova após ruptura para a Mistura 2 – Energia do Proctor Intermediário

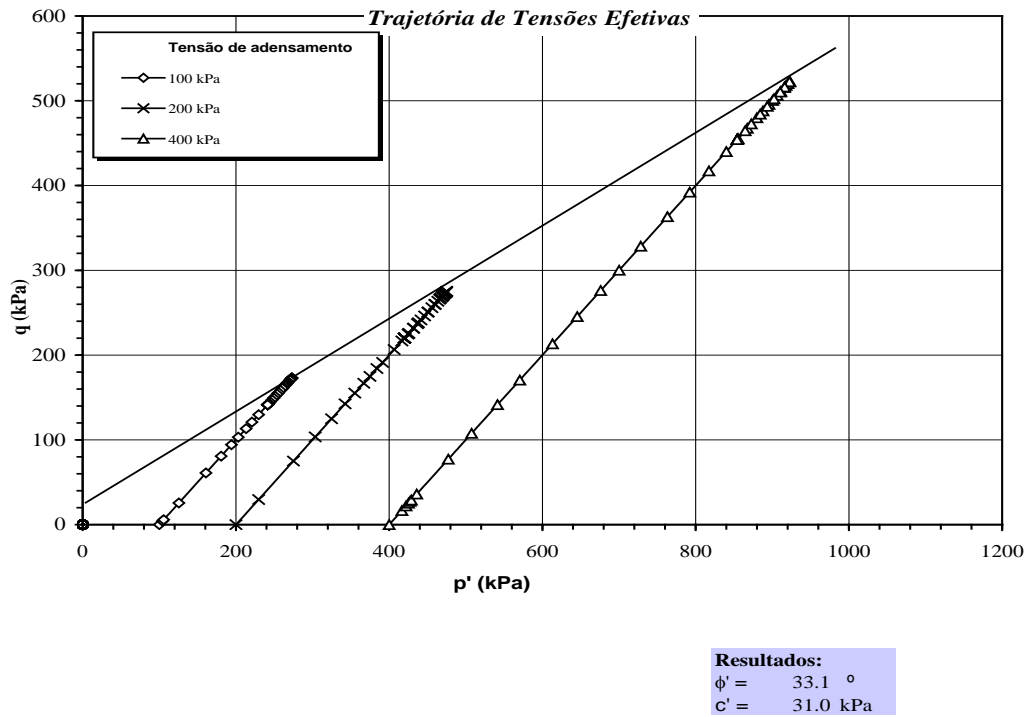


Figura 36 – TTE para a Mistura 2 - Energia do Proctor intermediário

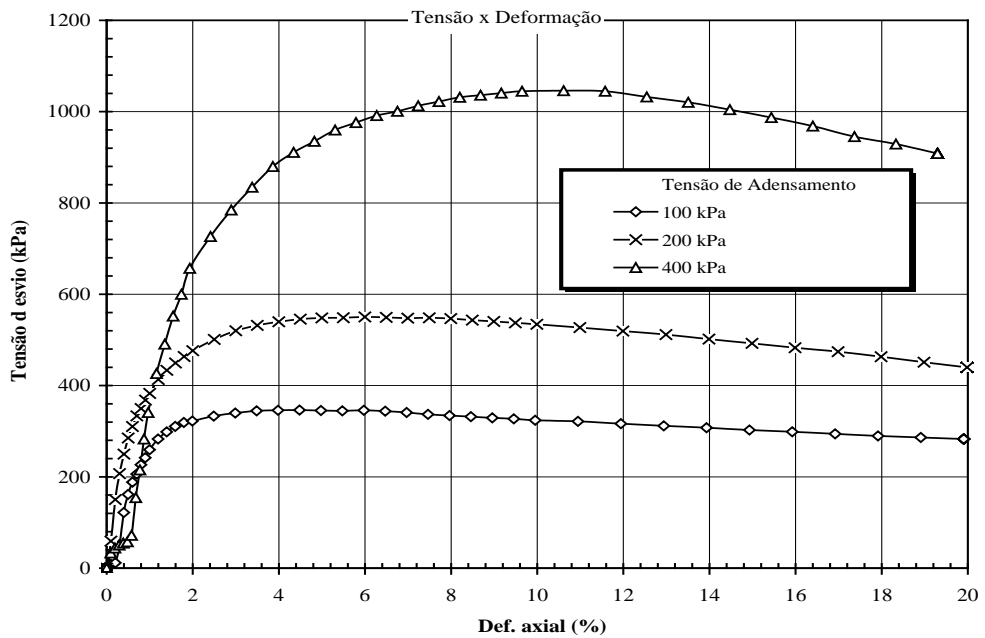


Figura 37 - Gráfico de Tensão x Deformação para a Mistura 2 - Energia do Proctor intermediário

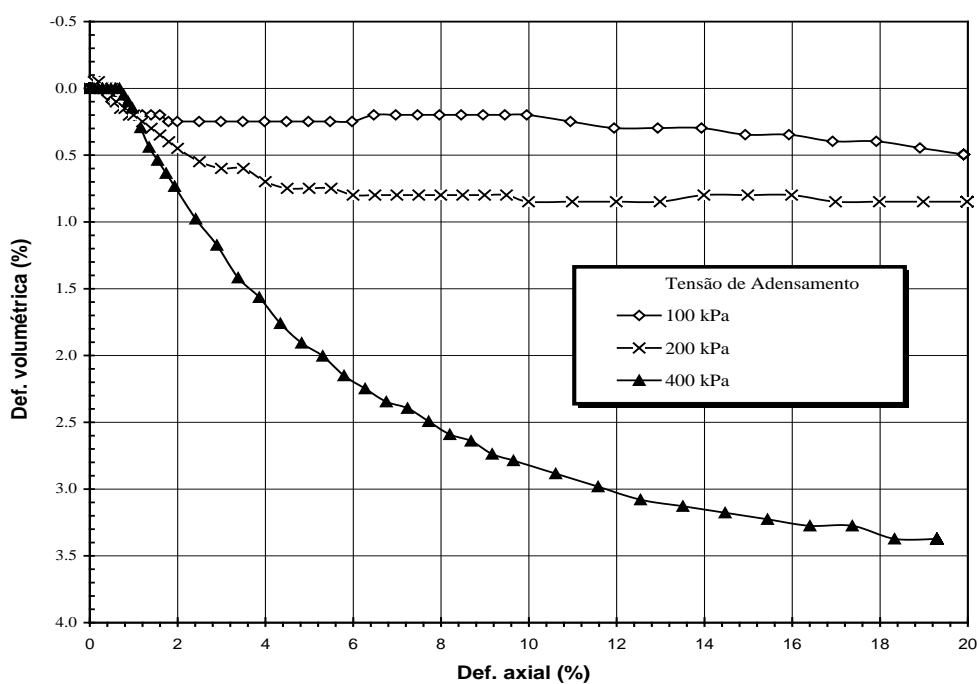


Figura 38 - Gráfico de Def. Axial x Def. Volumétrica para a Mistura 2 – Energia do Proctor intermediário.

As imagens da Figura 39; a, b e c, apresentam os corpos-de-prova já rompidos nos ensaios triaxiais CID da Mistura 3, na energia do Proctor intermediário. E as Figuras 40 a 42 apresentam as trajetórias de tensões, curvas tensão x deformação e deformação axial x deformação respectivamente.



Figura 39 – Corpos-de-prova após ruptura para a Mistura 3 – Energia do Proctor intermediário (40 % Rejeito + 30 % Escória + 30 % Cascalho)

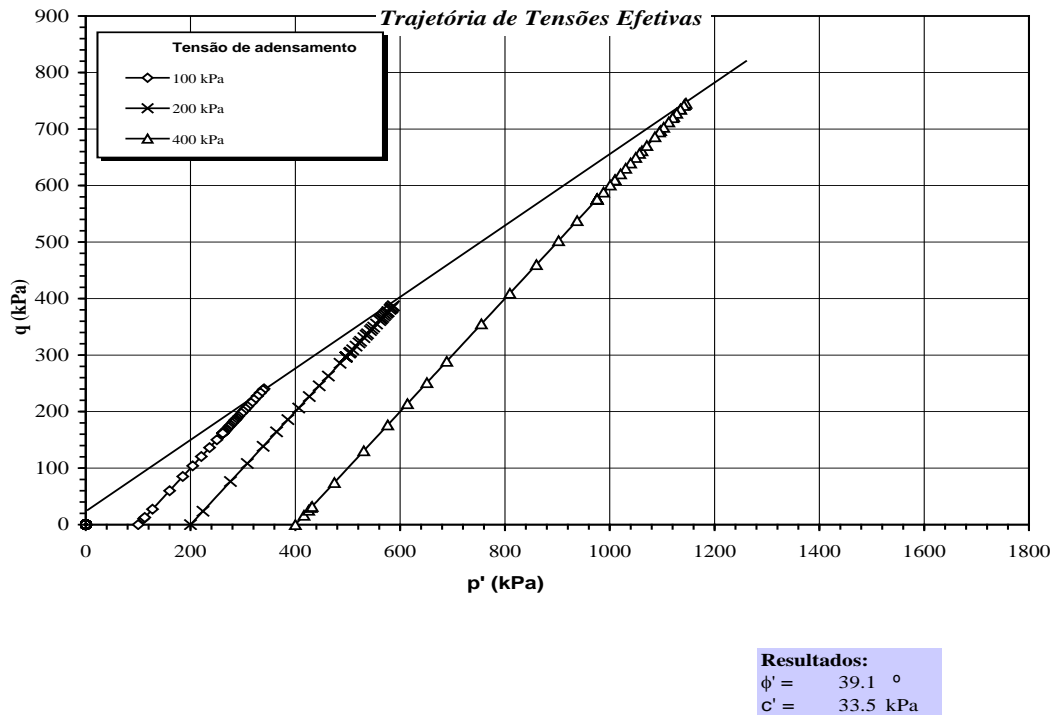


Figura 40 – TTE para a Mistura 3 - Energia do Proctor intermediário

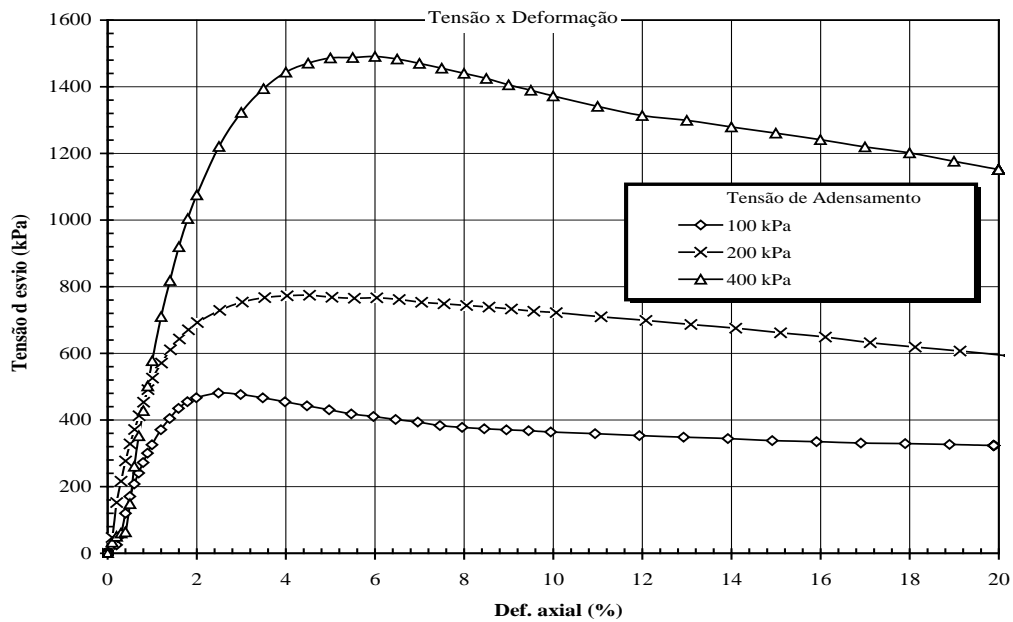


Figura 41 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 3 – Energia do Proctor Intermediário

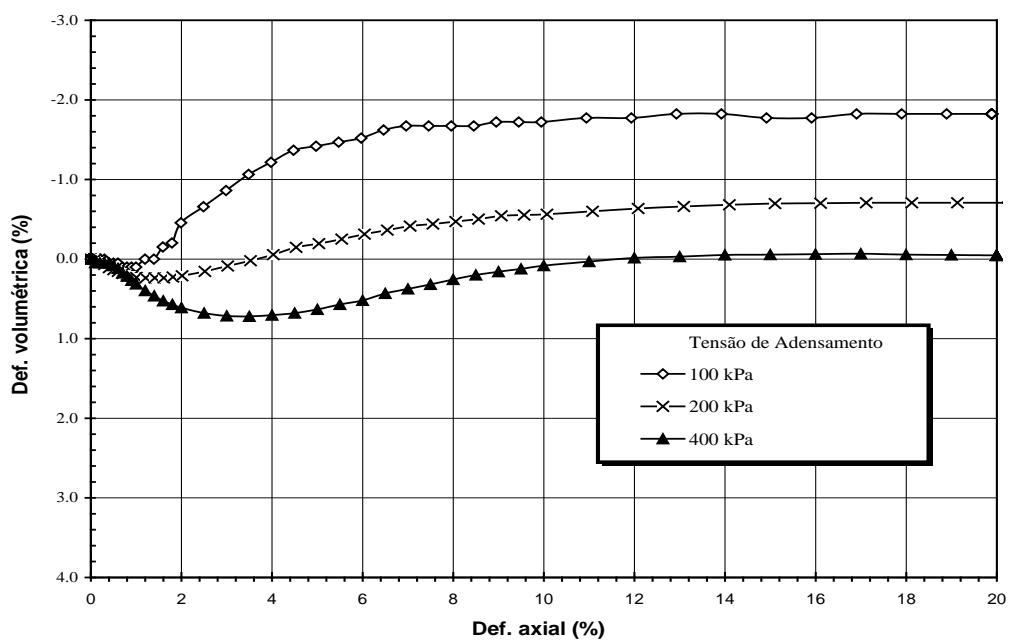


Figura 42 - Gráfico de Def. Axial x Def. Volumétrica para a Mistura 3 - Energia do Proctor intermediário

As imagens da Figura 43; a, b e c, apresentam os corpos-de-prova já rompidos nos ensaios triaxiais CID da Mistura 1, na energia do Proctor modificado. E as Figuras 44 a 46 apresentam as trajetórias de tensões, curvas tensão x deformação e deformação axial x deformação respectivamente.



Figura 43 – Corpos-de-prova após ruptura para a Mistura 1 – Energia do Proctor modificado

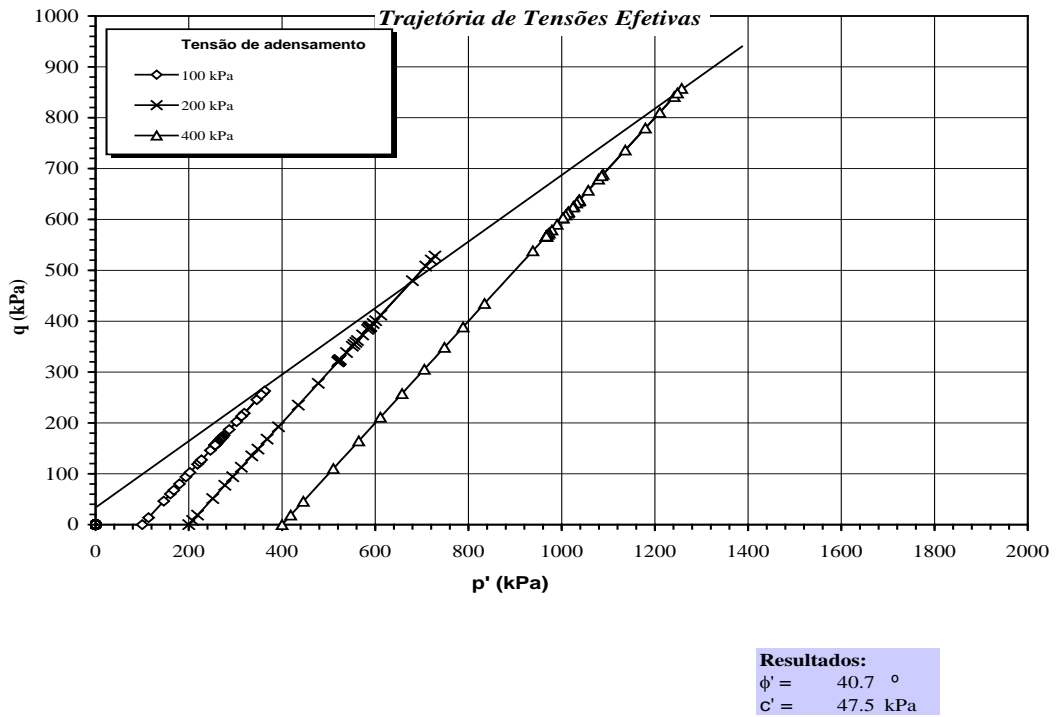


Figura 44 – TTE para a Mistura 1 – Energia do Proctor Modificado

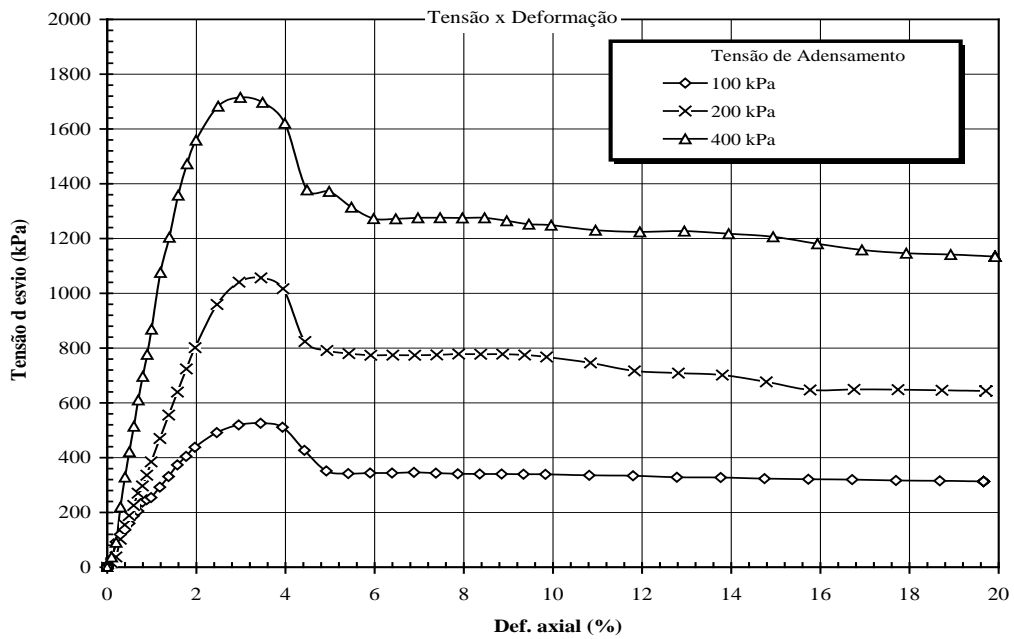


Figura 45 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 1 – Energia do Proctor modificado.

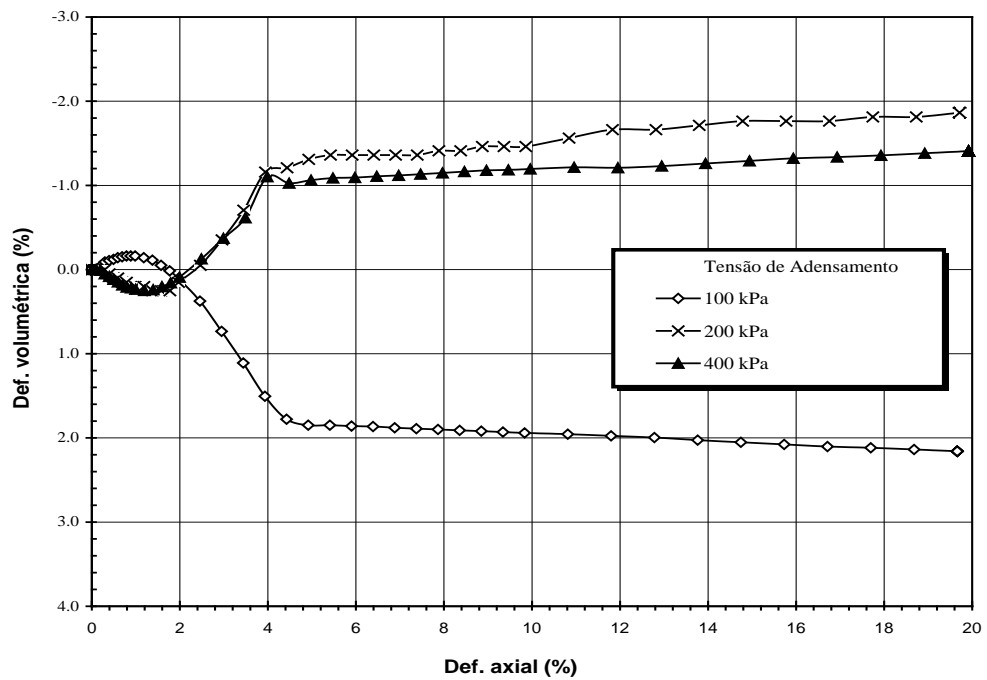


Figura 46 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 1 – Energia do Proctor Modificado

As imagens da Figura 47; a, b e c, apresentam os corpos-de-prova já rompidos nos ensaios triaxiais CID da Mistura 2, na energia do Proctor modificado. E as Figuras 48 a 50 apresentam as trajetórias de tensões, curvas tensão x deformação e deformação axial x deformação respectivamente.



Figura 47 – Corpos-de-prova após ruptura para a Mistura 2 - Energia do Proctor Modificado

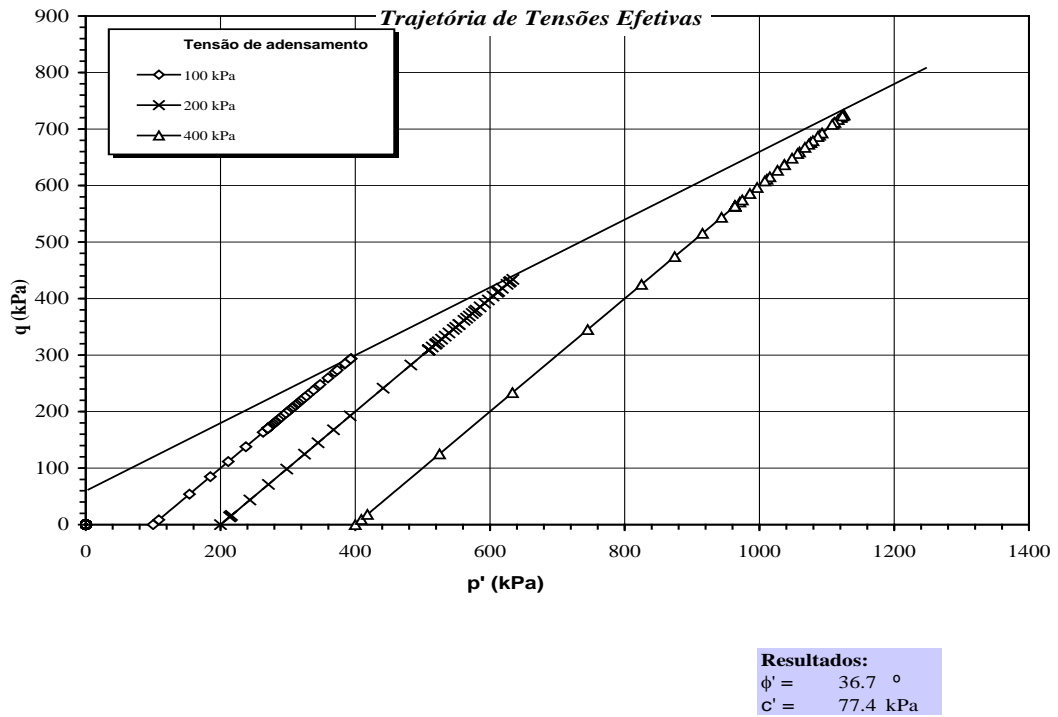


Figura 48 – TTE para a Mistura 2 - Energia do Proctor modificado

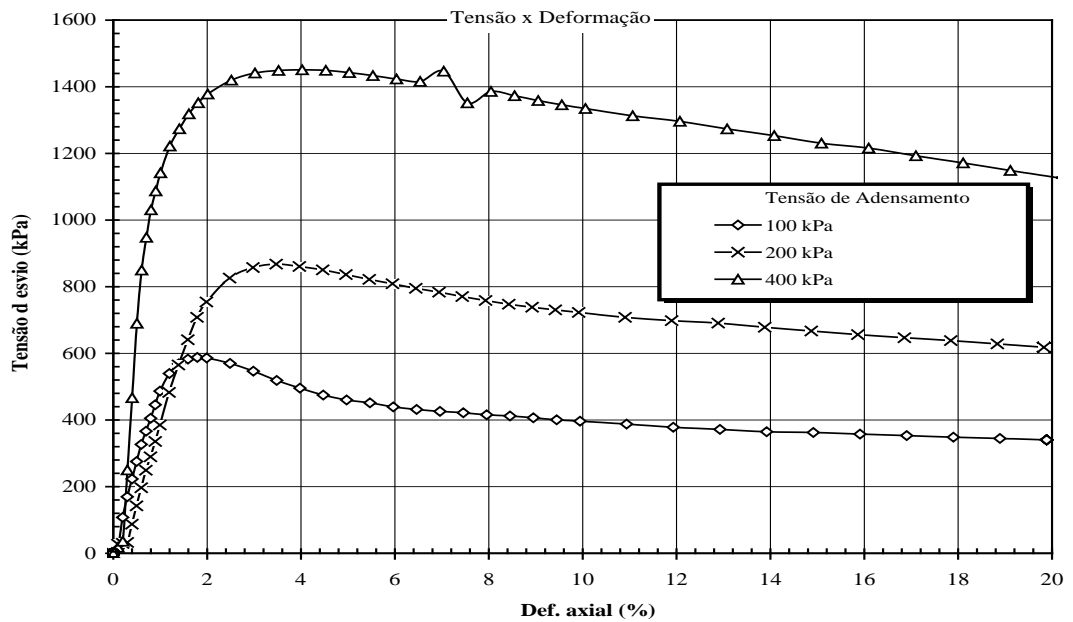


Figura 49 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 2 – Energia do Proctor modificado

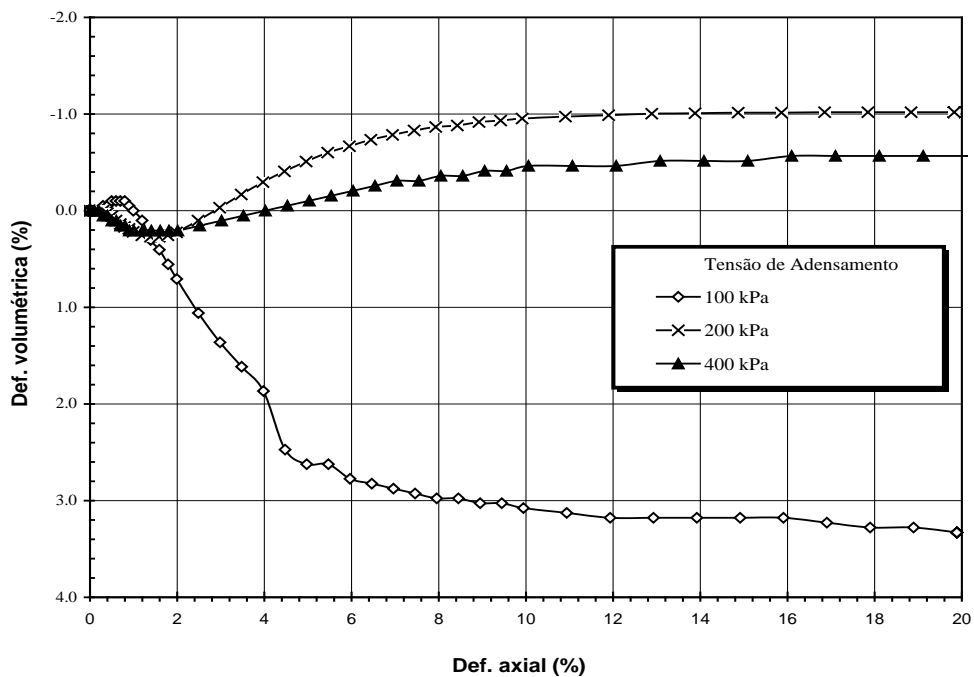


Figura 50 - Gráfico de Tensão x Def. Volumétrica para a Mistura 2 - Energia do Proctor modificado

As imagens da Figura 51; a, b e c, apresentam os corpos-de-prova já rompidos nos ensaios triaxiais CID da Mistura 3, na energia do Proctor modificado. E as Figuras 52 a 54 apresentam as trajetórias de tensões, curvas tensão x deformação e deformação axial x deformação respectivamente.



Figura 51 – Corpos-de-prova após ruptura para a Mistura 3 – Energia do Proctor modificado

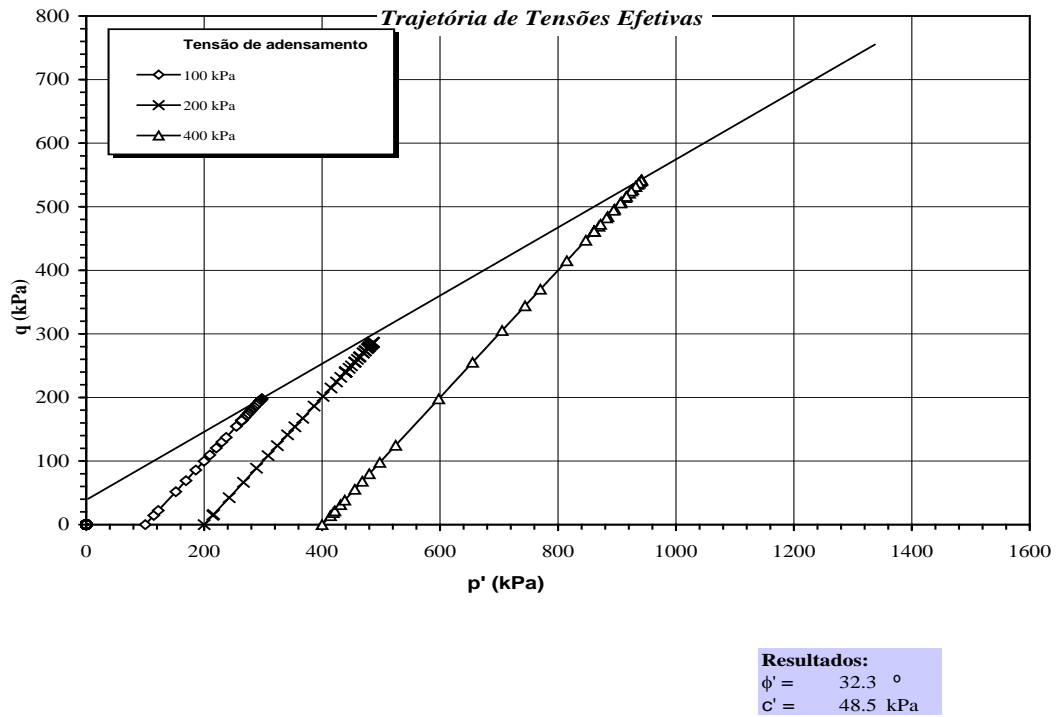


Figura 52 – TTE para a Mistura 3 – Energia do Proctor Modificado

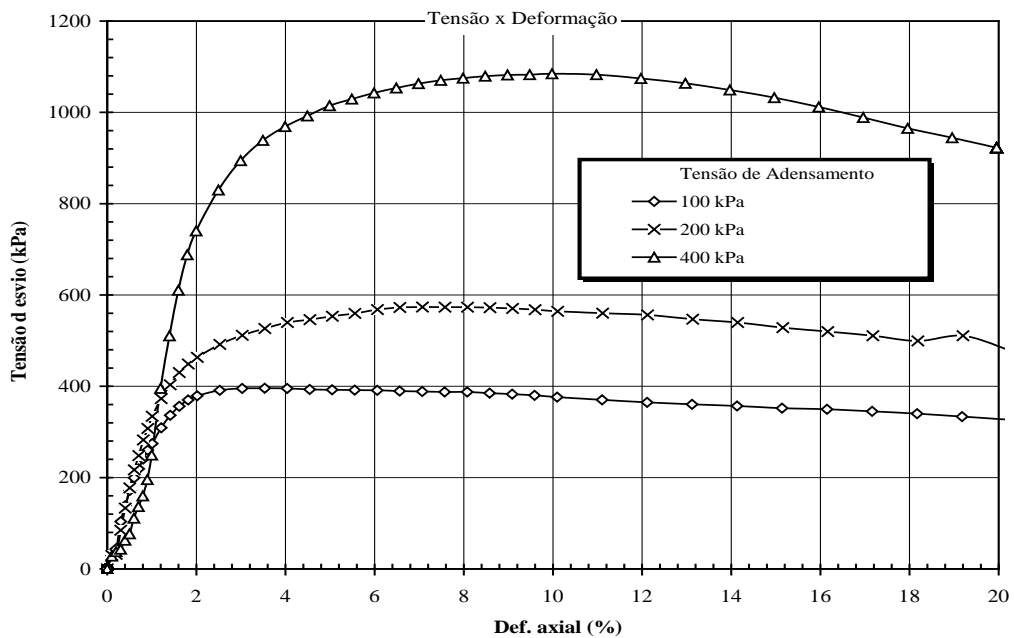


Figura 53 - Gráfico de Tensão x Def. Axial para a Mistura 3 – Energia do Proctor Modificado

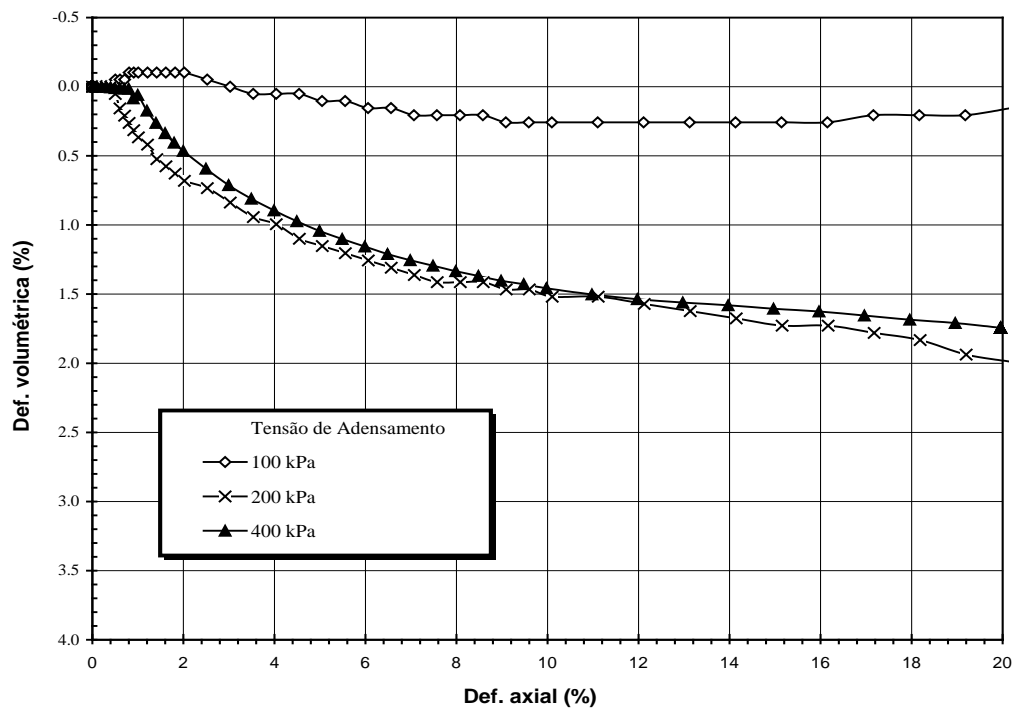


Figura 54 - Gráfico de Def. Axial x Def. Volumétrica para a Mistura 3 - Energia do Proctor modificada

O resumo dos principais resultados dos ensaios triaxiais com seus parâmetros de resistência c' e ϕ' estão descritos na Tabela 13.

Tabela 13 – Resumo dos resultados dos ensaios triaxiais CID

Parâmetros físicos	Mistura 1 (60 % flot 40 % conc)	Mistura 2 (60 % Mistura 1 +40 % Escória)	Mistura 3 (40 % Rejeito + 30 % Escória + 30 % Cascalho)
γ_d (kN/m ³)	21,06	19,44	19,92
Energia Intermediária			
w (%)	9,81	8,05	10,75
ϕ' (°)	38,1	33,1	39,1
c' (kPa)	19,0	31,0	33,5

Energia Modificada			
γ_d (kN/m ³)	21,73	19,85	20,73
w(%)	7,38	5,89	9,89
ϕ' (°)	40,7	36,7	32,3
c' (kPa)	47,5	77,4	48,5

Todas as misturas ensaiadas apresentaram ângulo de atrito típico de material arenoso compacto, com ϕ' variando de 33,1° a 40,6°. Os valores de coesão por sua vez, variaram de 16,7 kN/m² a 47,4 kN/m², indicando que a pequena porcentagem de materiais finos presentes nas misturas ainda fornece características coesivas a estes materiais, e este efeito torna-se importante principalmente para os materiais compactados nas energias do Proctor intermediário e modificado. Este fato pode ser corroborado pela forma dos corpos-de-prova após a ruptura, como mostram as Figuras 31, 35, 39, 43, 47 e 51. Pode-se notar que mesmo após terem sido saturados e rompidos por cisalhamento, as amostras não se destorroaram, outrossim, mantiveram a forma cilíndrica inicial.

Os parâmetros de resistência na energia do Proctor modificado foram maiores que os respectivos parâmetros na energia do Proctor intermediário para as misturas 1 e 2. No entanto, para a Mistura 3, verificou-se que na energia do Proctor intermediário os parâmetros de resistência foram maiores que aqueles obtidos para a energia do Proctor modificado.

Embora não tenha sido analisado com detalhes, os resultados das curvas tensão x def. axial podem fornecer valores dos módulos de compressibilidade tangente e secante, necessários para as análises tensão x deformação utilizadas nos projetos de pavimentos.

4.6. Ensaios de módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência realizados neste trabalho foram executados nas energias do Proctor intermediário e modificado, segundo o método de ensaio ME-134 (DNIT, 2010).

O sistema triaxial dinâmico utilizado neste trabalho foi adquirido com financiamento da FAPEMIG, através do projeto TEC 2431/97 – FAPEMIG 2011/2012, junto a Geocomp Corporation, Boxborough – MA, USA. O sistema é totalmente automatizado e, após a instalação do corpo-de-prova no interior da câmara triaxial e a seleção das condições do ensaio, o sistema emite um relatório técnico contendo todas as informações do teste.

A seguir, são apresentadas várias tabelas contendo os modelos para previsão do módulo de resiliência das misturas 1, 2 e 3, nas energias de compactação do Proctor intermediário e modificado, que apresentam os melhores valores dos coeficientes de determinação linear (R^2).

O modelo do primeiro invariante de tensões foram os que apresentaram os melhores resultados dos valores dos coeficientes de determinação linear (R^2). Os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência estão apresentados nas Figuras 55 a 60 e nas Tabelas 14 a 19.



Interessado	Samuel Santos		
Procedência	60% Flotação, 40% concentração magnética	Operador	Samuel
Amostra	rejeitos	Energia de compactação	Intermediária
Ensaio	Modulo Resiliente	CP nº	01
		Data da compactação	10/09/2012

Dados Iniciais

Diâmetro	7.231	cm
Altura	15.177	cm
Massa úmida	1444.00	g
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	19.44	kN/m ³
$W_{\acute{o}timo}$	11.63	%
A_o	41.07	cm ²
V_o	623.26	cm ³
Peso específico	22.72	kN/m ³
Peso específico seco	20.36	kN/m ³
Grau de compactação	104.74	%

Teor de Umidade

Cápsula n ^o .	14	F78	F187
Solo+Tara+Água	g 76.38	76.42	102.54
Solo+Tara	g 70.67	71.86	95.11
Tara	g 22.35	32.34	30.01
Teor de umidade	% 11.82	11.54	11.41
Teor de umidade médio	%	11.59	

Dados após ruptura

Massa úmida	1444.00	g
-------------	---------	---

$$M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

$M_R = 1.024E+03 \quad \theta^{0.841}$

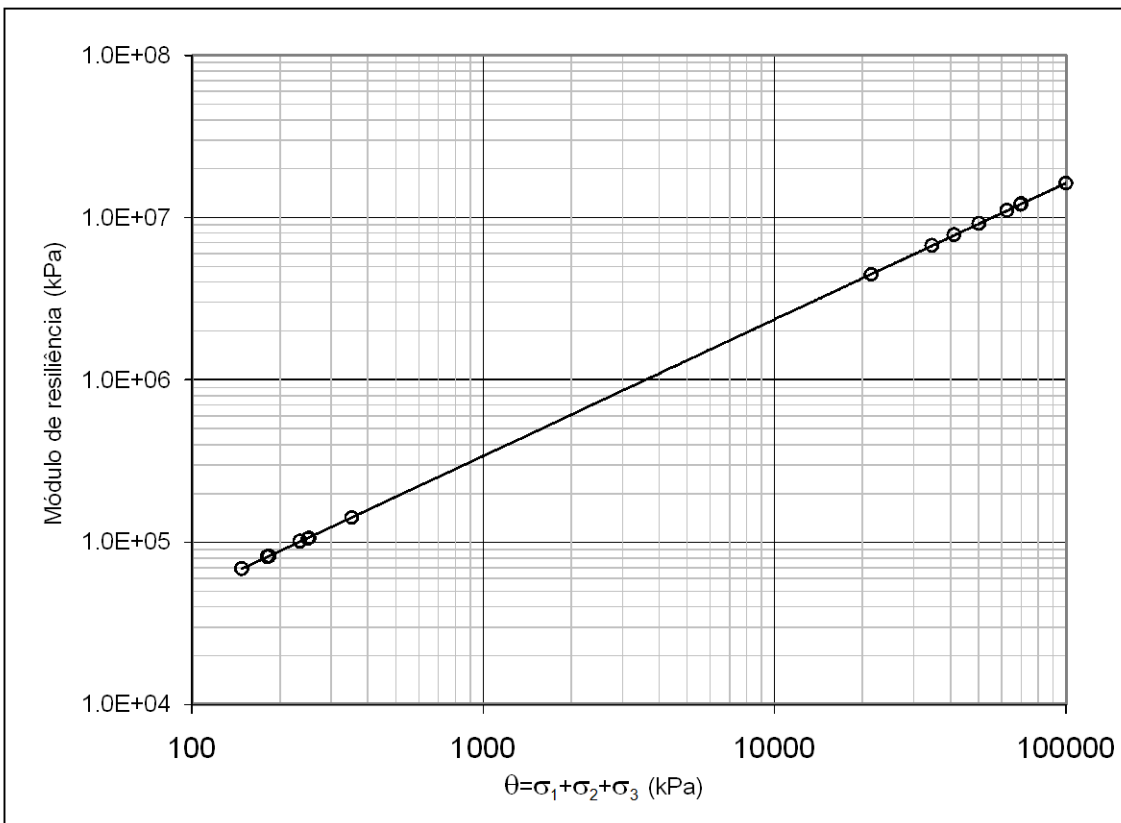


Figura 55 – Gráfico referente ao módulo de resiliência da Mistura 1 (60 % Flotação e 40 % concentração magnética)



Interessado	Samuel Santos		
Procedência	60% rejeito, 40% escória	Operador	Samuel
Amostra	rejeitos + escória	Energia de compactação	Intermediária
Ensaio	Modulo Resiliente	CP nº	01
		Data da compactação	10/09/2012

Dados Iniciais

Diâmetro	7.265	cm
Altura	15.234	cm
Massa úmida	1414.00	g
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	19.44	kN/m ³
$W_{\acute{o}t\acute{i}m\acute{o}}$	8.14	%
A_o	41.45	cm ²
V_o	631.50	cm ³
Peso específico	21.96	kN/m ³
Peso específico seco	20.31	kN/m ³
Grau de compactação	104.49	%

Teor de Umidade

Cápsula n ^o .	14	F78	F187
Solo+Tara+Água	g	66.38	76.42
Solo+Tara	g	63.09	73.10
Tara	g	22.35	32.34
Teor de umidade	%	8.08	8.15
Teor de umidade médio	%	8.10	

Dados após ruptura

Massa úmida	1414.00	g
-------------	---------	---

$$M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

$M_R = 6.671E+02 \quad \theta = 0.957$

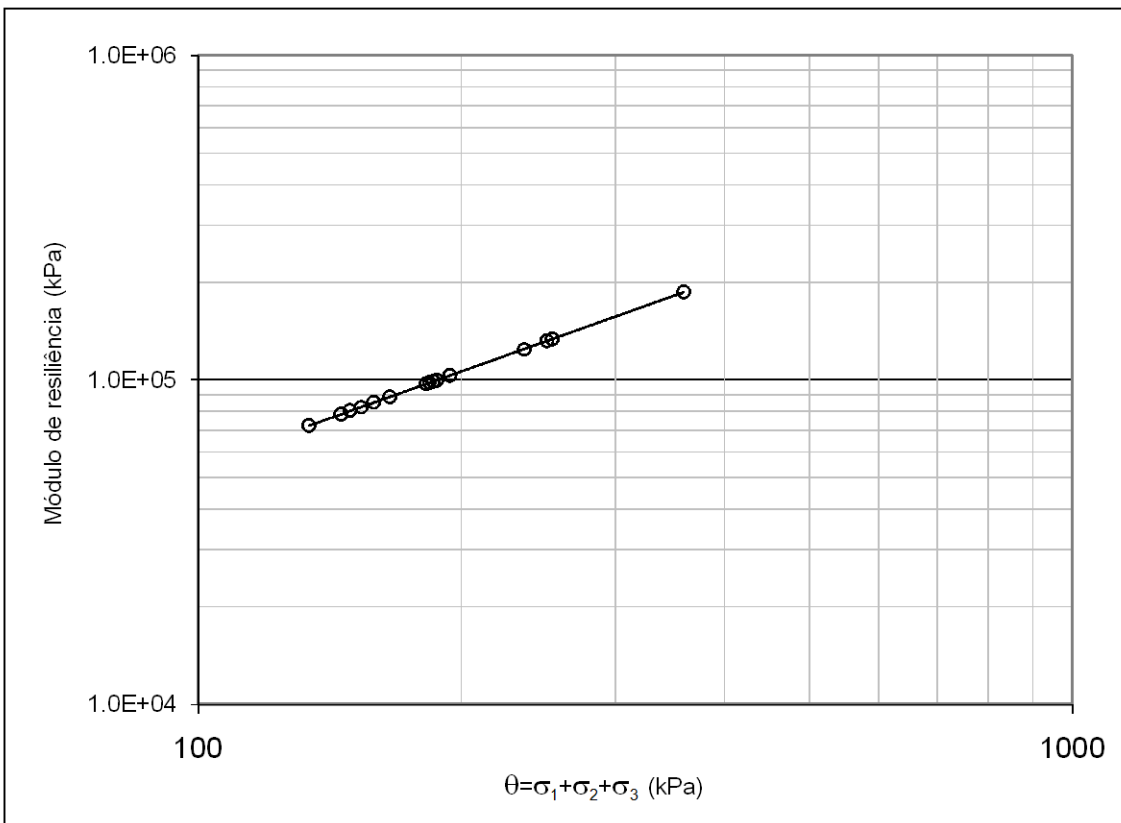


Figura 56 – Gráfico referente ao módulo de resiliência da Mistura 2
 (60 % rejeito e 40 % escória)

Tabela 16 - Valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a Mistura 3
(40 % rejeito, 30% escória e 30 % cascalho)





$$M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

Figura 57 – Gráfico referente ao módulo de resiliência da Mistura 3
(40 % rejeito, 30% escória e 30 % cascalho)



Interessado	Samuel Santos		
Procedência	60% Flotação, 40% concentração magnética	Operador	Samuel
Amostra	rejeitos	Energia de compactação	Modificada
Ensaio	Modulo Resiliente	CP nº	01
		Data da compactação	10/09/2012

Dados Iniciais

Diâmetro	7.259	cm
Altura	15.277	cm
Massa úmida	1489.00	g
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	21.73	kN/m ³
$W_{\acute{o}timo}$	7.51	%
A_o	41.39	cm ²
V_o	632.24	cm ³
Peso específico	23.10	kN/m ³
Peso específico seco	21.53	kN/m ³
Grau de compactação	99.06	%

Teor de Umidade

Cápsula n.º	14	F78	F187
Solo+Tara+Água	g 102.47	95.36	92.29
Solo+Tara	g 97.51	91.15	87.93
Tara	g 29.29	32.28	29.48
Teor de umidade	% 7.27	7.15	7.46
Teor de umidade médio	%	7.29	

Dados após ruptura

Massa úmida	1489.00	g
-------------	---------	---

$$M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

$M_R = 5.984E+02 \quad \theta = 1.070$

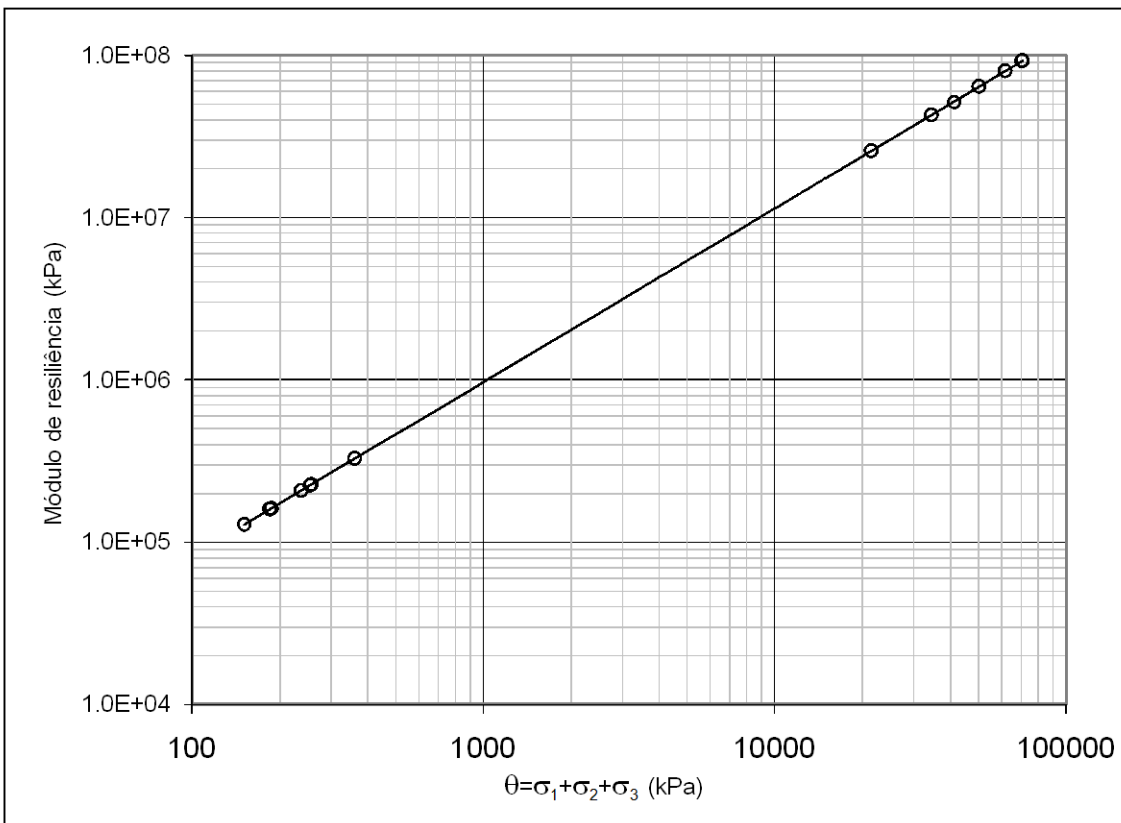


Figura 58 – Gráfico referente ao módulo de resiliência da Mistura 1 (60 % Flotação e 40 % Concentração magnética)



Interessado	Samuel Santos		
Procedência	60% Rejeito, 40% Escória	Operador	Samuel
Amostra	rejeitos	Energia de compactação	Modificada
Ensaio	Modulo Resiliente	CP nº	01
		Data da compactação	10/09/2012

Dados Iniciais

Diâmetro	7.221	cm
Altura	15.197	cm
Massa úmida	1349.00	g
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	19.85	kN/m ³
$W_{\acute{o}timo}$	5.77	%
A_o	40.95	cm ²
V_o	622.36	cm ³
Peso específico	21.26	kN/m ³
Peso específico seco	20.10	kN/m ³
Grau de compactação	101.24	%

Teor de Umidade

Cápsula n ^o .	14	F78	F187
Solo+Tara+Água	g	125.98	128.48
Solo+Tara	g	120.69	123.05
Tara	g	28.95	28.86
Teor de umidade	%	5.77	5.76
Teor de umidade médio	%	5.77	

Dados após ruptura

Massa úmida	1349.00	g
-------------	---------	---

$$M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

$M_R = 5.245E+03 \quad \theta^{0.546}$

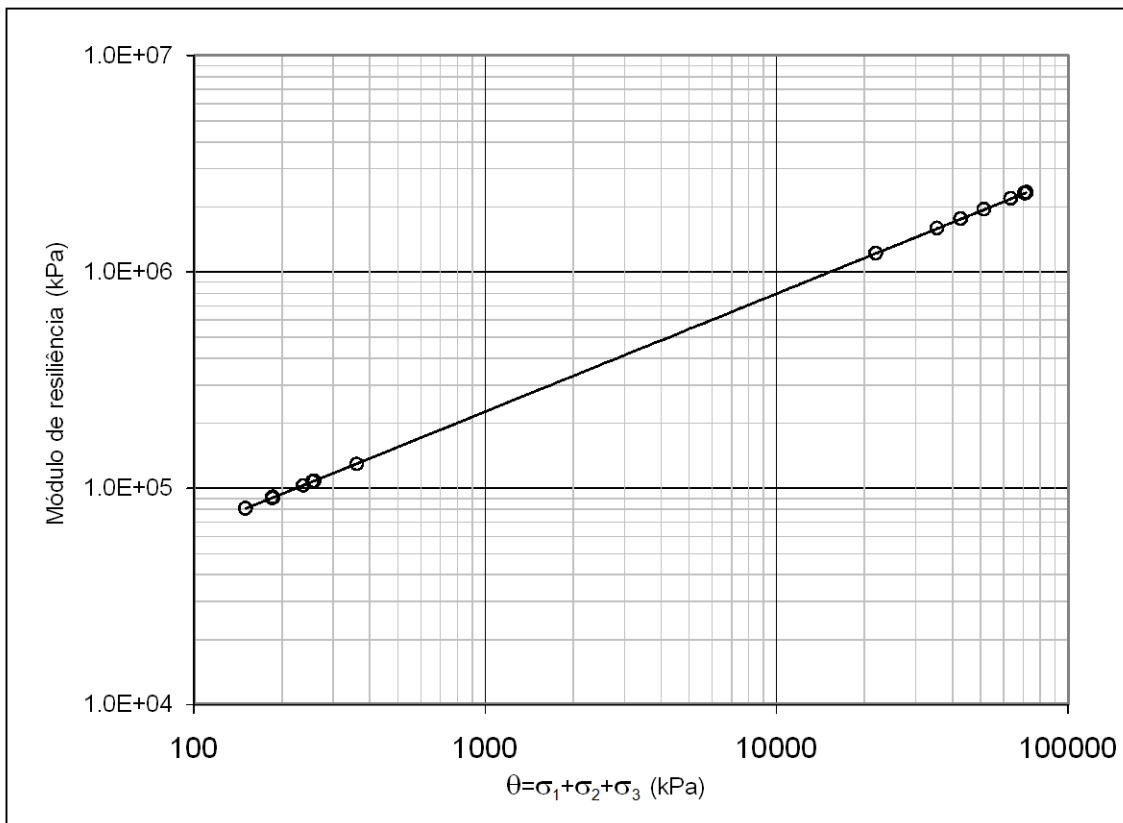


Figura 59 – Gráfico referente ao módulo de resiliência da Mistura 2 (60 % rejeito e 40 % escória)



Interessado	Samuel Santos		
Procedência	40% rejeito, 30% escoria, 30% cascalho	Operador	Samuel
Amostra	rejeitos + escória + cascalho	Energia de compactação	Modificada
Ensaio	Modulo Resiliente	CP nº	01
		Data da compactação	10/09/2012

Dados Iniciais

Diâmetro	7.255	cm
Altura	15.198	cm
Massa úmida	1460.00	g
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	20.73	kN/m ³
$W_{\acute{o}timo}$	9.80	%
A_o	41.34	cm ²
V_o	628.28	cm ³
Peso específico	22.79	kN/m ³
Peso específico seco	20.84	kN/m ³
Grau de compactação	100.55	%

Teor de Umidade

Cápsula n.º		14	F78	F187
Solo+Tara+Água	g	128.51	133.49	131.35
Solo+Tara	g	119.98	124.85	122.62
Tara	g	29.20	32.13	28.47
Teor de umidade	%	9.40	9.32	9.27
Teor de umidade médio	%		9.33	

Dados após ruptura

Massa úmida	1460.00	g
-------------	---------	---

$$M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

$M_R = 7.614E+02 \quad \theta = 1.040$

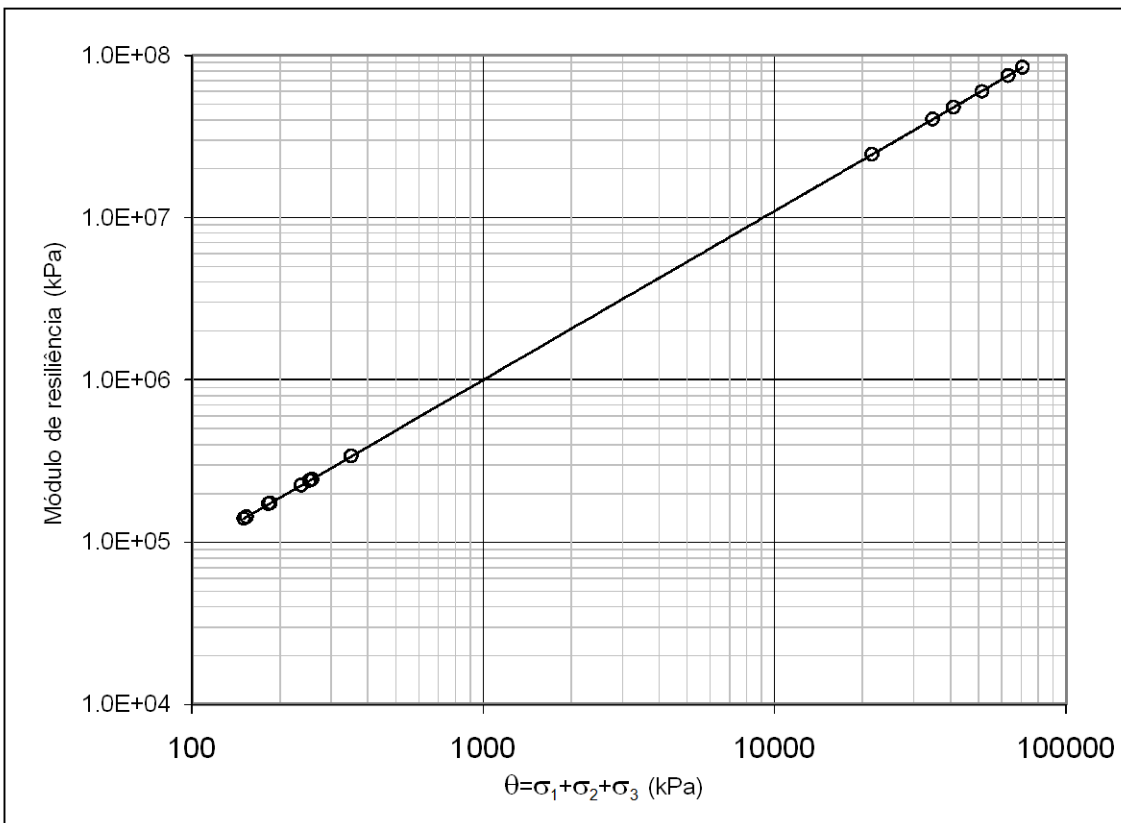


Figura 60 – Gráfico referente ao módulo de resiliência da Mistura 3 (60 % Flotação e 40 % concentração magnética)

Os quatro modelos de ajuste de módulo de resiliência analisados para cada um dos corpos de prova ensaiados são apresentados a seguir:

Modelo 1

$$Eq. 2 - M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

Modelo 2

$$Eq. 3 - M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$$

Modelo 3

$$Eq. 4 - M_R = K_1 \sigma_d^{K_2} \sigma_3^{K_3}$$

Modelo 4

$$Eq. 5 - M_R = K_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{K_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)^{K_3}$$

Os gráficos das Figuras 55 a 60 mostram os ajustes segundo a equação do Modelo 1 em que o Módulo de Resiliência (MR) é função do primeiro invariante de tensões.

Cabe observar que estes quatro modelos estão incorporados ao programa computacional RM5 da Geocomp Corporation, e podem ser selecionados pelo usuário durante a fase de análise de dados e geração de relatórios dos ensaios.

Os demais dados obtidos no ensaio MR estão mostrados nas Tabelas 14 a 19 podendo ser utilizados para análises de outros modelos de ajuste.

Tabela 20 – Melhores resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência segundo o método de ensaio ME-134 (DNIT, 2010)

Mistura 1 - Energia Intermediária					Mistura 1 - Energia Modificada				
DNIT	MR=K ₁ .θ ^{K₂}				DNIT	MR=K ₁ .θ ^{K₂}			
	w	k1	k2	R ²		w	k1	k2	R ²
	11,59	1024,4	0,841	0,94813		7,29	592,6	1,070	0,87062
Mistura 2 - Energia Intermediária					Mistura 2 - Energia Modificada				
DNIT	MR=K ₁ .θ ^{K₂}				DNIT	MR=K ₁ .θ ^{K₂}			
	w	k1	k2	R ²		w	k1	k2	R ²
	8,1	668,6	0,957	0,83880		5,77	5244,8	0,545	0,93140
Mistura 3 - Energia Intermediária					Mistura 3 - Energia Modificada				
DNIT	MR=K ₁ .θ ^{K₂}				DNIT	MR=K ₁ .θ ^{K₂}			
	w	k1	k2	R ²		w	k1	k2	R ²
	10,76	715,79	1,020	0,91050		7,29	761,4	1,040	0,90808

$\theta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$

Os resultados apontam que os valores do M_R de todas as misturas analisadas são típicos de materiais utilizados para camadas estruturas de sub-bases de pavimentação.

Comparando os modelos de estimativa de M_R com base nas normas técnicas que foram utilizadas, observa-se um melhor ajuste dos resultados em termos de R^2 para o modelo que utiliza a primeira invariante de tensões, $M_R = K_1 \theta^{K_2}$.

Os modelos, que utilizam a primeira invariante de tensões, foram os que apresentaram os melhores os resultados dos valores dos coeficientes de determinação linear (R^2).

4.7. *Ensaio de equivalente de areia*

Foram também realizados os ensaios de equivalente de areia (citar a Norma do ensaio) para efeitos de comparação entre as diferentes misturas ensaiadas. Os resultados do EA estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 21 – Resultados do ensaio de EA (equivalente de areia)

Misturas	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
EA – Equivalente de Areia	40 %	53 %	43 %

Sob o ponto de vista do equivalente de areia, todas as amostras apresentaram resultados superiores a 30 %. Logo, as 3 misturas apresentaram resultados satisfatórios, quanto à utilização dos mesmos em camadas de base de pavimentos flexíveis.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Através das análises dos resultados laboratoriais obtidos neste trabalho, permitem inferir as seguintes conclusões e sugestões:

5.1. Conclusões

Notou-se que em todas as amostras ensaiadas o percentual de areia foi superior a 60 % tendo também frações significativas de silte em torno de 20 %.

Os resultados das análises granulométricas efetuadas na faixa de tamanho de partícula entre 0,002 a 6,00 mm revelaram que as amostras são compostas majoritariamente por areia (areia fina e média) e com um percentual de silte variando de 18 % a 27 %.

Todas as amostras foram classificadas como solos granulares, constituídas, na maior parte por areia fina e média, em função da porcentagem que passa na peneira 0,075 mm ser menor que 35 %, segundo a classificação TRB, conforme apresentado na Tabela 7.

Nos ensaios de sedimentação obteve-se um resultado que indicou um percentual maior de silte em relação ao de argila. De fato, a pequena quantidade de argila presente em todas as misturas se constata pelo comportamento não plástico (NP) obtido nos ensaios de Limites de Liquidez e de Plasticidade, Tabela 8.

Observa-se que a mistura que apresentou melhor capacidade de suporte foi a mistura 3 contendo 24% de rejeito de Flotação; 16% de rejeito de Concentração; 30% de escória de aciaria e 30% de Cascalho, em ambas as energias de compactação do Proctor intermediário e modificado, podendo ser utilizados em camadas de sub-bases, segundo o Métodos de Projetos de Pavimentos Flexíveis do DNIT.

Porém deve-se citar que CBR dessa mistura, está muito próximo do limite do valor mínimo de CBR aceitável para utilização de bases de pavimento que deve ser igual ou superior a 80 % ou 60% dependendo do tráfego e da granulometria da base.

Todas as misturas embaladas apresentaram ângulo de atrito típico de material arenoso compacto, com ϕ' variando de 33,1° a 40,6°. Os valores de coesão por sua vez, variaram de 16,7 kN/m² a 47,4 kN/m³, indicando que a pequena porcentagem de materiais finos presentes nas misturas ainda fornece características coesivas a estes materiais, e este efeito torna-se importante principalmente para os materiais compactados nas energias do Proctor intermediário e modificado. Este fato pode ser corroborado pela forma dos corpos-de-prova após a ruptura, como mostram as Figuras 31, 35, 39, 43, 47 e 51. Pode-se notar que mesmo

após terem sido saturados e rompidos por cisalhamento, os corpos-de-prova não se destorroaram, outrossim, mantiveram a forma cilíndrica inicial.

Os resultados apontam que os valores do M_R de todas as misturas analisadas podem ser são típicos de materiais utilizados para camadas estruturas de sub-bases ou reforço de pavimentação.

Todas as amostras apresentaram resultados superiores a 30 % no ensaio de equivalente de areia. Logo os 3 traços apresentaram resultados satisfatório.

Comparando as três misturas estudadas e com base nos ensaios que foram empregados a mistura 3 foi a que apresentou melhor desempenho sob o ponto de vista mecânico, tanto na energia intermediária como na energia modificada. No entanto, todas as misturas podem ser utilizadas como sub-bases para pavimento flexível.

Com base nos resultados de CBR podemos inferir que todas as amostras ensaiadas apresentaram comportamento mecânico satisfatório para o emprego em camadas de sub-base segundo a norma DNER- Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis.

A Mistura 3 apresentou valores de CBR próximos ao que sugerem a norma DNER- Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis para utilização de base de pavimento flexíveis.

Os parâmetros de resistência na energia modificada foram maiores que os respectivos parâmetros na energia intermediária para as misturas 1 e 2. No entanto, para a Mistura 3, verificou-se que na energia intermediária os parâmetros de resistência foram maiores que aqueles obtidos para a energia modificada.

5.2. Sugestões para estudos futuros

Complementar os estudos executando outras proporções das misturas utilizadas neste trabalho.

Utilizar outros tipos de aditivos para verificar melhoras no comportamento mecânico do solo. Realizar ensaios de mini-CBR segundo a metodologia sugerida por Nogami e Villibor (1995), para estabelecimento de correlações.

Realização de ensaios triaxiais de módulo de resiliência para determinação das deformações permanentes para maiores números de ciclos de aplicação de cargas, a fim de comparar com os valores obtidos nesta pesquisa e concluir sobre o número mínimo de solicitações de carga necessário para a uma avaliação satisfatória das deformações permanentes.

Realizar estudos comparativos entre acúmulo de deformações permanentes obtidas através de procedimentos experimentais de laboratório com observações de campo em pavimentos flexíveis.

Utilizar os rejeitos em trechos experimentais como camadas de sub-base de pavimento asfáltico na energia intermediária e modificada e efetuar acompanhamento. Estabelecer parcerias entre Universidade, Poder Público e Mineradoras através de convênios como instrumento para viabilização dos projetos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). **NBR 7182/86 Solos - Ensaio de Compactação – Método de Ensaio**. ABNT, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 10 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987). **NBR 9895/86, Solos – Índice de Suporte California – Método de Ensaio**. ABNT, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 14 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). **NBR 7181/84, Solo – Análise Granulométrica – Procedimento**. ABNT, Rio de Janeiro, 13p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). **NBR 6459/84, Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Procedimento**. ABNT, Rio de Janeiro, 6p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). **NBR 7180/84, Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Procedimento**. ABNT, Rio de Janeiro, 3p.
- ABNT (1990). **EB 2096/90: Materiais para sub-base ou base em solo cimento**. Rio de Janeiro, 2p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) - **NBR 6508/84, Determinação de Massa específica – Método de Ensaio**, ABNT, Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001) – **NBR 5019/2001, Produtos e ligas de cobre – Terminologia**, ABNT, Rio de Janeiro.
- ARCELORMITTAL, 2012. Disponível em: <http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/aplicacoes/aplicacoes_rodoviaras/aplicacoes_rodoviaras.asp#div01>. Acessado em: 29 Agosto 2012, 18:20:22.
- BALTAZAR, Rodrigo Pinheiro. - **Caracterização do Fator Expansão de uma Escória de Aciaria em Diferentes Processos de Cura para uso em Pavimentação**. 2001, 93p. . Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.
- CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

- CARVALHO, C.A.B. (2010). **Notas de aula CIV 615, Programa de Pós-Graduação.** Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.
- DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- DNER – 131/94. Solos – **Determinação do Módulo de Resiliência.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, 8p.
- DNER-ME 054/97 – MT. **Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Equivalente de Areia – Método de Ensaio.** DNER, Rio de Janeiro, 10p.
- DNIT 114/2009 – ES. **Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA® - Especificação de serviço.** Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2009, 9p.
- DNIT 134/2010 – M.E. **Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio.** Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010, 10p.
- DNIT (2010) - **Manual de Pavimentação, Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Publicação IPR – 179, 3º Edição,** Rio de Janeiro, 278p.
- DNIT (2005) – **Manual de Pavimentos Rígidos. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Publicação IPR – 714, 2º Edição,** Rio de Janeiro, 234p.
- ELPHINSTONE, G. M., Adhesion and cohesion in asphalt – aggregate systems – Dissertation submitted to Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 1997.
- FRANQUET, P. F., **Adhesividad y activación, Carreteras 103,** Septiembre, 1999.
- GEYER, R. M. T. (2001). **Tese Para Obtenção Do Título de Doutor Em Engenharia.** Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2001.

- IBRAM, (2012). **Sistema de informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. 6º edição.** Instituto Brasileiro de Mineração, site www.ibram.org.br. Acesso em 04/02/2012 – 23h11min
- JUNIOR, Tadeu Antônio Torquato de Souza. – **Respostas Estruturais em Pavimentos Flexíveis Via Utilização de Equações de Módulo de Resiliência de Solos de Subleito e da Camada de Reforço.** 2011, 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.
- LEITE, L. F. M., RIBEIRO, R. C. C., DA SILVA, P. D., A., BORGES, P., e MORÃO, F., **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas, Relatório Técnico, CENPS,** Rio de Janeiro, 2002.
- LIMA, D.C.(1985). **Apostila no 205 – Tópicos em Estradas. Imprensa Universitária, UFV, Viçosa-MG, 32p.**
- MEDRADO, Wallen Alexandre. - **Caracterização Geotécnica de Solos da Região Norte de Minas para Aplicações em Obras Rodoviárias. 2009, 124p.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2009.
- NOCITI, D. M., **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas. 2011. 111 f.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2011.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. (1980). Pavimentação de baixo custo em solos lateríticos. 1995.
- ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. 3. ed. 2007.**
- PIMENTA, Itamar Junior. **Caracterização Geotécnica e Análise de Estabilidade de Taludes de Mineração em Solos da Mina Capão Xavier. 2005, 145p.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.
- PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 3. ed.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- RIBEIRO, R. C. C., CORREIA, J. C. G. E SEIDL, P. R., **Utilização de rejeitos minerais em misturas asfálticas, CT2005-128-00** – Contribuição Técnica publicada no XXI

Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, de 20 a 24 de Novembro de 2005, em Natal, Rio Grande do Norte, Volume 2, págs. 318-325.

SOUZA, Lilian Masetti Lobo Soares de. - **Estudo de Dimensionamento Estrutural de Estradas de Mina a Céu Aberto. 2011, 157p.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 3 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, IPR., 1981 (IPR. Publ. 667).

VON KRÜGER, P. **Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia. Metalurgia & Materiais, p.116-119, fev. 1995.**