

ÂNGELA CAMPANHA

**CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO**

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
2011**

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

T

C186c
2011

Campanha, Ângela, 1957-

Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em
pavimentação / Ângela Campanha. – Viçosa, MG, 2011.
xviii, 86f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 78-82.

1. Minérios de ferro - Resíduos. 2. Pavimentos.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

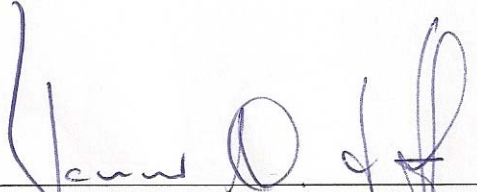
CDD 22. ed. 625.8

ÂNGELA CAMPANHA


**CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO**

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*.

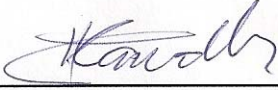
APROVADA: 21 de junho de 2011



Prof. Taciano Oliveira da Silva



Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho
(Co-orientador)



Prof. Cláudio Henrique de Carvalho Silva
(Orientador)

**Aos meus filhos,
Mariana, Marcela e Cláudio,
razão da minha existência.**

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus, a quem confio meus passos, pelo dom da vida, por todas as lutas, pelo fortalecimento diário da minha alma.

Aos meus adorados pais, João (eternamente) e Olguinha, o lar, a música, a cultura, o exemplo dignificante e a simplicidade grandiosa do amor. Mãe querida, sua presença absoluta e forte, é uma manhã ensolarada onde tudo se renova.

À Universidade Federal de Viçosa, a oportunidade honrosa de fazer parte da sua história, desse universo do saber humanizado e agraciado pela natureza.

À FAPEMIG, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo financiamento do projeto do qual faz parte esta pesquisa.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio através da concessão da bolsa de estudos para conclusão desta pesquisa.

Ao Município de Sabará, através do Excelentíssimo Sr. Prefeito Willian Borges, pela concessão da licença para capacitação.

À Companhia Vale, na pessoa do Engenheiro Alysson Borges, pelo fornecimento do material e apoio incondicional para realização da pesquisa.

Ao Laboratório de Solos da UFV, através do Walter Abrahão, pela elaboração das análises químicas e mineralógicas contidas neste trabalho.

Aos Engenheiros que me confiaram ao programa da pós-graduação: Professor Delson Carvalho Diniz (Universidade FUMEC), Sérgio Luiz de Freitas e Anderson Silva Teixeira.

Ao Coordenador da pós-graduação Eduardo Marques, pela presença, generosidade, eficiência e eficácia na solução das dificuldades da vida acadêmica.

Ao Cláudio Henrique de Carvalho Silva, orientador, pela firmeza na condução desta pesquisa, pela disponibilidade, pelos valiosos ensinamentos e aconselhamentos e pelo profissionalismo.

Ao Carlos Alexandre Braz de Carvalho, co-orientador, pela sabedoria e simplicidade que brilham, pelos conselhos, pela serenidade e pelo legado do conhecimento.

Ao Dario Cardoso de Lima, co-orientador, pelos ensinamentos transmitidos com o gosto de quem ama o que faz e pelo exemplo de integridade.

Ao Professor Taciano Oliveira da Silva pela honrosa participação na avaliação desta dissertação e pelas considerações brilhantemente efetuadas.

Aos meus competentes e respeitabilíssimos professores da pós-graduação, que com suas parcelas, fazem da UFV a expressão nacional da qualidade: Roberto Azevedo, Izabel Christina D'Almeida Duarte de Azevedo, Ana Augusta Passos Resende, Eduardo Marques, Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Dario Cardoso de Lima, Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

À Professora do Curso de Inglês Instrumental Vânia de Sá Farias, pela dedicação.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da UFV: Jorge Luiz de Almeida Orlando pelo apoio, Paulo Afonso da Silva e Júlio Carlos dos Santos pela presença indispensável na realização dos ensaios.

Ao Professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa, pelo acolhimento e bom convívio nas dependências do laboratório.

A Divisão de Transportes, através do Sr. Davi Severino, motorista da viagem para coleta do material na cidade de Mariana.

Aos técnicos contratados Leonício de Assis (braço direito), Jonatham dos Santos Augusto (braço esquerdo), o esforço, a dedicação e o competente auxílio durante todo o tempo.

Ao Flávio Crispim, a preciosa contribuição nos ensaios triaxiais de cargas repetidas.

Ao pessoal administrativo da secretaria geral e pós-graduação, Cilene Knauf Lopes, Cristina Beatriz Schemes Costa, Izabela Ávila Pereira, Grasielle Avelar Vieira Rodrigues pela eficiência e zêlo no trabalho, feito com paciência, carinho, solidariedade e humanidade.

A Cristina Figueiredo, o incentivo, a torcida amiga e permanente.

Ao Judson Martinez e Antonio Luiz da Silva, Recursos Humanos da Prefeitura de Sabará, pela segurança e agilidade nas tramitações que se fizeram necessárias durante a vigência da licença para capacitação.

Ao Secretario de Obras, Ubirajara Rosa de Souza e seu Adjunto Luiz Cláudio Lopes, a Gisele Luiz, Andrea Lourenço, pela arte do compartilhamento e união de esforços.

Aos meus companheiros da pós (amigos, filhos?) são todos uma bela esperança de dias melhores, o aconchego, a alegria, o carinho, a receptividade, os inesquecíveis momentos de confraternização e solidariedade: Aline, Ana Amélia, Cátia, Carla, Claudinha (e Alan), Ciro (fiel escudeiro), Gustavo, Luana (e Thiago), Marcos, Mariana, Vera, Henrique (e Juliana), Felipe, Eduardo, Thiago e João.

Aos amigos contemporâneos Prata, Welington (e Tânia), Anibal, Leila, Inês, Isaias por tantos momentos de fraternidade.

Aos primos Sérgio e Rosiane, Paulo Roberto, Fernanda, Nebai e Marcelinho, pela presença querida iluminando minha casa.

As minhas irmãs Valéria, Flávia, Débora e meus amados sobrinhos e sobrinhas pelo apoio e incentivo, ao meu cunhado-irmão Ronaldo por me conduzir a esta cidade.

À Maria do Carmo, Jandira e Anita Corrêa, pela adoção de sobrinha, pelo amparo integral que representam em minha vida.

À Geralda e Sr. Laurindo Clemente de Araújo pelo acolhimento amigo, muito além de um contrato imobiliário.

Ao irmãos de coração Cláudio Mudado e Ana, seus (meus) filhos Juliano e Marcelinha, meu porto seguro, pela delicadeza desse afeto, pela força desses laços, pela linda família que em vocês encontro; pela família maravilhosa que por vocês encontrei nos tão amados: Lairton C. Andrade e Regina, (também meus) Luiza e Lairtinho.

Na realidade, escreveria um livro somente com o que adquiri de humano, fraterno, solidário e amigo nestes tempos em Viçosa e estarão gravados em meu coração todos aqueles que colocados em meu caminho acrescentaram brilho aos meus dias.

BIOGRAFIA

ÂNGELA CAMPANHA, filha de João Batista Campanha e Olga Barbosa Campanha, nascida em 11 de novembro de 1957, na cidade de Ubá, Minas Gerais.

Graduou-se em Engenharia Civil, em janeiro de 1984, na Faculdade de Engenharia da Fundação Mineira de Educação e Cultura – FUMEC, em Belo Horizonte, Minas Gerais. Foi bolsista como monitora das disciplinas: Cálculo Vetorial e Geometria Analítica, ministrada pelo Professor Edmundo Menezes Dantas em 1981 e de Economia pelo Professor Javer de Moura em 1983.

Encontra-se no exercício da engenharia desde a graduação e atualmente ocupa o Cargo Público de Engenheira Civil, no município de Sabará, Minas Gerais, licenciada para capacitação, em março de 2009, para ingressar no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SIGLAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos da Pesquisa	4
1.4 Organização dos conteúdos	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1 Rejeitos de Mineração	6
2.2 Pavimentação Rodoviária	9
2.3 Estabilização granulométrica.....	14
2.4 Estabilização com cimento	16
2.5 Ensaios para a caracterização de materiais a serem empregados em projetos de pavimentos rodoviário.	18
2.6 Classificação geotécnica dos solos	21
2.7 Ensaios de resistência mecânica	25
2.8 Ensaios de caracterização química e mineralógica e pH	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Materiais	34
3.2 Metodologias dos ensaios de laboratório.....	39
4. RESULTADOS E ANÁLISES	51
4.1 Ensaios de caracterização geotécnica dos rejeitos analisados	51
4.2 Ensaios de compactação e CBR.....	53
4.3 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento	56

4.4 Ensaio de compressão simples dos rejeitos melhorados com cimento	59
4.5 Ensaio triaxiais de carregamentos repetidos para a determinação dos módulos de resiliência dos rejeitos analisados sem misturas	65
4.6 Ensaio de caracterização química, mineralógica e análise potenciométrica do pH	72
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	75
5.1 Conclusões	75
5.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	77
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
7. ANEXO A	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Previsão da produção de minério de ferro do Brasil até 2010	1
Figura 1.2: Total de resíduos minerometalúrgicos – Relatório de Sustentabilidade da Vale.....	2
Figura 2.1: Faixas granulométricas, das lamas e rejeitos de flotação, típicas das usinas de processamento de minério de ferro	6
Figura 2.2: Equipamentos de flotação. Fonte: GOMES (2009).....	8
Figura 2.3: Sistema de várias camadas, SENÇO(2008).....	9
Figura 2.4: Comparação de distribuição de tensões entre pavimentos rígido e flexível Fonte: ABCP – CPC-M3/4.....	10
Figura 2.5: Seção transversal típica de pavimento flexível, DNIT,(2006).....	11
Figura 2.6: Seção transversal típica de pavimento rígido, DNIT(2006).....	11
Figura 2.7: Camadas quanto a nobreza, correlações com o CBR. Fonte: Notas de aula Prof.Dario Cardoso de Lima.....	12
Figura 2.8: Distribuição dos esforços na estrutura do pavimento.Fonte:Senço(2008).....	13
Figura 2.9: Características usuais de sub-bases estabilizadas com cimento.....	18
Figura 2.10: Curvas granulométricas quanto a graduação, DNIT (2006).....	19
Figura 2.11: Faixa granulométrica geral recomendada para solo-cimento.Fonte: DNIT (2006).....	19
Figura 2.12: Limites de Atterberg dos Solos	20
Figura 2.13: Classificação dos solos segundo o TRB. Fonte: DNIT (2006).....	23
Figura.2.14: Correlações entre as classificações TRB e USCS. Fonte: DNIT (2006).....	24
Figura 2.15: Carta de plasticidade de Arthur Casagrande.....	25
Figura 2.16: Valores prováveis de CBR para os grupos da classificação TRB. Fonte: DNIT (2006).....	26

Figura 2.17: Esquema de um espectroscópio de emissão óptica com plasma	32
Figura 2.18: Classificação dos solos em função do pH Guimarães <i>et al</i> , 1971, modificado por Pessoa (2004).....	33
Figura 3.1: Mapa de localização da Mina de Alegria, Município de Mariana, MG.....	34
Figura 3.2: Complexo Mariana - Mina Alegria.....	35
Figura 3.3: Adição das aminas necessárias ao processo de flotação.....	35
Figura 3.4 Ponto de amostragem do rejeito de flotação	36
Figura 3.5: Coluna de flotação rejeito de flotação.....	36
Figura 3.6: Vista superior do cone desaguador do rejeito da separação magnética	36
Figura 3.7: Ponto de coleta do rejeito de concentração	37
Figura 3.8: Vista inferior do cone desaguador e ponto de amostragem do Rejeito de concentração.....	37
Figura 3.9: Vista geral do cone desaguador do rejeito da separação magnética	37
Figura 3.10: Usina vista do ponto de coleta do cone desaguador.....	38
Figura 3.11: Fluxograma do beneficiamento do minério de ferro com indicação dos pontos de coleta dos rejeitos 1 e 2. (Vale – usina de Alegria)	38
Figura 3.12: Transporte, chegada, identificação, secagem ao ar, homogeneização e acondicionamento das amostras.....	40
Figura 3.13 : Cronograma do ensaio de resistência à compressão simples	43
Figura 3.14: Registros do ensaio de resistência à compressão simples	44
Figura 3.15: Detalhe da prensa triaxial.....	44
Figura 3.16: Ciclos do ensaio de durabilidade do rejeito da concentração melhorado com cimento	45
Figura 3.17 : Ciclos do ensaio de durabilidade do rejeito da flotação melhorado com cimento.....	46
Figura 3.18: Equipamento triaxial dinâmico da UFV.....	47
Figura 3.19: Seqüência típica do ensaio triaxial de cargas repetidas.....	49

Figura 4.1: Curva granulométrica do rejeito de flotação	52
Figura 4.2: Curva granulométrica do rejeito de concentração	52
Figura 4.3: Curvas de compactação para o rejeito de concentração	55
Figura.4.4: Curvas de compactação energia do rejeito de flotação	55
Figura 4.5: Resultados dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento.....	58
Figura 4.6: Corpos de prova dos rejeitos da flotação mehorados com cimento após os 12 ciclos do ensaio de durabilidade	58
Figura 4.7: Corpos de prova dos rejeitos da concentração melhorados com cimento após os 12 ciclos do ensaio de durabilidade.....	59
Figura 4.8: Ensaio de resistência à compressão simples do rejeito da flotação melhorado com 2 % de cimento aos 3 dias de cura	60
Figura 4.9: Ensaio do ensaio de resistência à compressão simples do rejeito da flotação: melhorado com 3 % de cimento aos 7 dias de cura – CP 5.....	60
Figura 4.10: Evolução da RCS das misturas do rejeito da flotação melhorado com cimento.....	62
Figura 4.11: Evolução da RCS das misturas do rejeito de concentração melhorado com cimento	63
Figura 4.12:Variação de RCS versus ϵ_h (%) para as misturas solo-cimento com o rejeito da flotação nas idades de 3, 7 e 28 dias de cura.....	64
Figura 4.13: Variação de RCS versus ϵ_h (%) para as misturas solo-cimento com o rejeito da concentração nas idades de 3, 7 e 28 dias de cura.....	64
Figura 4.14: Resumo dos resultados do ensaio MR para o rejeito de flotação – energia normal (incluindo o modelo de ajuste conforme saída do software da Geocomp)	66
Figura 4.15: Resumo dos resultados do ensaio MR para o rejeito de flotação – energia intermediária (incluindo o modelo de ajuste conforme saída do software da Geocomp)	67

Figura 4.16: Resumo dos resultados do ensaio MR para o rejeito de concentração – energia normal (incluindo o modelo de ajuste conforme saída do software da Geocomp)	68
Figura 4.17: Resumo dos resultados do ensaio MR para o rejeito de concentração – energia intermediária (incluindo o modelo de ajuste conforme saída do software da Geocomp)	69
Figura 4.18: Variação dos módulos de resiliência dos rejeitos de flotação e de concentração.....	71
Figura 4.19: Difractogramas de Raios-X do rejeito da concentração (Ka = Caulinita, Go = Goethita, Gb = Gibbsita, Qz = Quartzo, Hm = Hematita.)	73
Figura 4.20: Difractogramas de Raios-X do rejeito da flotação (Ka = Caulinita, Go = Goethita, Gb = Gibbsita, Qz = Quartzo, Hm = Hematita)	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Extensão da malha rodoviária nacional – PNV/ DNIT (2010).....	2
Tabela 4.1: Resultados dos ensaios geotécnicos das amostras dos rejeitos e da classificação segundo os Sistemas USCS e TRB.....	51
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de compactação e CBR na energia de compactação do Proctor normal.....	53
Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de compactação e CBR na energia de compactação do Proctor intermediário.....	53
Tabela 4.4: Comparação dos resultados com parâmetros da Classificação dos solos empregados nos pavimentos, DNIT (2006)	56
Tabela 4.5: Perdas de massa no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento.....	57
Tabela 4.6: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples dos rejeitos da flotação melhorados com cimento nos teores de 2, 3, 4 e 5%.....	60
Tabela 4.7: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples dos rejeitos da concentração melhorados com cimento nos teores de 2, 3, 4 e 5%.....	61
Tabela 4.8: Resultados RCS - valores médios em kPa para o rejeito da flotação melhorado com cimento	61
Tabela 4.9: Resultados RCS - valores médios em kPa para o rejeito da concentração melhorado com cimento	61
Tabela 4.10: Modelos para estimativa do módulo de resiliência.....	70
Tabela 4.11: Resultados quantitativos da análise de metais por espectrometria óptica dos rejeitos da flotação e concentração	74

LISTA DE SIGLAS

AASHTO.....	<i>American Association of State Highway Transportation</i>
AASHO.....	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ABCP.....	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT.....	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM.....	<i>American Society for Testing Materials</i>
CAPES.....	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETEM.....	Centro de Tecnologia Mineral
COPPE-UFRJ.....	Coordenação dos Programas de Pesquisa em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro
DNER.....	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT.....	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
FAPEMIG.....	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
HRB.....	<i>Highway Research Board</i>
ICP-OES.....	<i>Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry</i>
IBRAM.....	Instituto Brasileiro de Mineração
IPR.....	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LVDT.....	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
TRB.....	<i>Transportation Research Board</i>
USCS.....	<i>Unified Soil Classification System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Al.....	Alumínio
CBR.....	<i>California Bearing Ratio</i>
CC.....	Coefficiente de Curvatura
Cd.....	Cádmio
CNU.....	Coefficiente de Não Uniformidade
Co.....	Cobalto
Cr.....	Cromo
Fe.....	Ferro
Gb.....	Gibbsita
Go.....	Goethita
h.....	Altura do corpo de prova
Hm.....	... Hematita
IA.....	Índice de Atividade
IG.....	Índice de Grupo
W _{ot}	Teor ótimo de umidade
Zn.....	Zinco
IP.....	Índice de Plasticidade
ISC.....	Índice Suporte Califórnia
Ka.....	Caulinita
K ₁ , K ₂ , K ₃ , K ₄	Coefficientes de ajuste obtidos experimentalmente

LC.....	Limite de Contração
LL.....	Limite de Liquidez
LP.....	Limite de Plasticidade
Mn.....	Manganês
M _R	Módulo de resiliência
Ni.....	Níquel
pH.....	Potencial Hidrogeniônico
Pb.....	Chumbo
Qz.....	Quartzo
Si.....	Silício
Sr.....	Estrôncio

LISTA DE SÍMBOLOS

Δh	Deslocamento axial elástico ou resiliente
ϵ_e	Deformação específica axial ou resiliênte
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico seco máximo
σ_d	Tensão desvio axial
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor ou confinante
θ	Primeiro invariante de tensões

RESUMO

CAMPANHA, Ângela, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2011. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Co-orientadores: Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Dario Cardoso de Lima.

Neste trabalho foram investigadas em laboratório as características químicas, mineralógicas e geotécnicas dos rejeitos provenientes do beneficiamento do minério de ferro, objetivando-se a sua inserção no ciclo produtivo, como materiais de construção para pavimentação. A coleta dos materiais foi efetuada em pontos específicos do processo de beneficiamento, interceptando-se os seus lançamentos em barragem, preservando-se assim as suas propriedades e características individuais. A aplicabilidade ensejada destina-se a minimização dos impactos negativos decorrentes das áreas de empréstimo necessárias às obras de pavimentação e a redução do volume dos rejeitos dispostos em barragens. Assim, foram avaliadas as suas propriedades para utilização em camadas estruturais do pavimento. Os rejeitos analisados foram os da separação por flotação e concentração magnética, coletados na usina de beneficiamento Alegria, pertencente a Companhia Vale, Mariana-MG, Brasil. O programa de laboratório envolveu a realização dos seguintes ensaios: Granulometria conjunta, LL e LP, Massa específica dos sólidos, Compactação, CBR, Resistência à compressão simples e Durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento Portland, Triaxial de cargas repetidas, Difractometria de raio X, Espectrometria por indução óptica e pH. Pela classificação TRB o rejeito da flotação é A4 e o da concentração A3, e suas composições granulométricas são compatíveis para utilização como materiais para sub-base ou base em solo cimento, ABNT (1990) EB 2096. Os resultados CBR dos dois rejeitos na energia intermediária bem como as suas expansões_{CBR} foram: compatíveis com as exigências para sub-base de pavimentos flexíveis. As análises por difratometria apresentam presença de argilominerais não expansivos. O modelo de melhor ajuste do módulo resiliente foi o composto em função da tensão desviadora e tensão confinante. Os rejeitos de mineração de ferro apresentaram potencial para uso em pavimentação especialmente quando melhorados com cimento.

ABSTRACT

CAMPANHA, Ângela, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, June 2011. **Characterization of iron ore tailings for use in paving.** Advisor: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Co-advisors: Carlos Alexandre Braz de Carvalho and Dario Cardoso de Lima.

In this work it was carried out a series of laboratory tests towards chemical, mineralogical and geotechnical characterization of rejects from iron ore processing, for use in paving. Material sampling was done in specific points as they were generated during the beneficiation process along the cycle, in order to preserve their properties. The alternative applicability as paving materials is intended to minimize some of the negative impacts caused in ores as well as by reducing the volume of rejects disposed in tailing dams. Thus, their properties were evaluated for use in structural layers of pavement. The rejects studied were generated by flotation separation and magnetic concentration, sampled from Alegria Mine plant, located at Mariana, Minas Gerais, Brazil. The laboratory testing program carried out the following tests: sieve analysis, Atterberg Limits (LL and PL), Specific gravity, compaction, CBR (California Bearing Ratio), compressive strength rejects of improved with cement, Durability by wetting and drying cycles, Resilient Modulus, X-ray diffraction, optical and induction Spectrometry, and pH. The rejects studied were classified as A4 (flotation) and A4 (magnetic concentration) according to TRB classification system. These materials are suitable for use as sub-base or improved base with addition of cement according to ABNT (1990, EB 2096). CBR test results using intermediate energy of both rejects showed to be compatible with the requirements for sub-base of flexible pavements, Diffraction analysis revealed the presence of non-expansive clay minerals. Results of resilient modulus tests agreed well when using the composite model as a function of confining and deviator stress. Test results from compressive strength and durability by wetting and drying of both rejects improved with cement will serve as reference for future research works. In conclusion, these reject materials from iron mining presented a potential for paving purposes specially when improved with cement.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A produção de minério de ferro do Brasil ocupa o segundo lugar no mundo, com resultado no ano de 2010 da ordem de 370 milhões de toneladas, equivalente a 16% do total mundial (2,3 bilhões de toneladas). Apresentam-se na Figura 1.1: Previsão da produção de minério de ferro do Brasil até 2014, as perspectivas de crescimento previstas para o setor. Contextualizado neste cenário, o estado de Minas Gerais contribui com 67 % do total produzido no país, seguido pelo Pará com 29,3 % e outros estados 3,7%, IBRAM (2010).

Previsão de produção de minério de ferro do Brasil até 2014				
EMPRESA/ANO	2011	2012	2013	2014
Mhag	500	1.000	4.000	5.000
Arcelor Mittal Serra Azul	5.000	5.000	10.000	15.000
Mineração Corumbaense	4.500	5.000	5.000	10.000
Usiminas (J. Mendes)	8.000	10.000	12.000	20.000
V&M Mineração	4.000	4.000	4.000	4.000
MMX	13.000	13.000	16.500	32.500
Anglo Ferrous	5.000	5.000	26.500	35.000
CSN	40.000	84.000	87.000	105.000
VALE	350.000	400.000	450.000	460.000
TOTAL	430.000	527.000	615.000	688.514
Outros	20.000	30.000	40.000	40.000
Ferrous Resources	1.000	1.000	2.000	25.000
Bahia Mineração	-	-	15.000	20.000
TOTAL	450.000	557.000	655.000	728.514

Fonte: IBRAM

Instituto Brasileiro de Mineração | 2010 | www.ibram.org.br

Figura 1.1: Previsão da produção de minério de ferro do Brasil até 2014

Fonte: IBRAM (2010)

Em contrapartida, o processo de lavra e beneficiamento do minério de ferro, gera a razão média de 2/1 entre o produto final e a geração de rejeitos (Abrão, 1987), que são dispostos em barragens e em pilhas de estéreis. Observa-se na Figura 1.2: Total de resíduos minerometalúrgicos, a proporção da elevada da geração de rejeitos através do relatório de sustentabilidade da Companhia Vale até o ano de 2009.

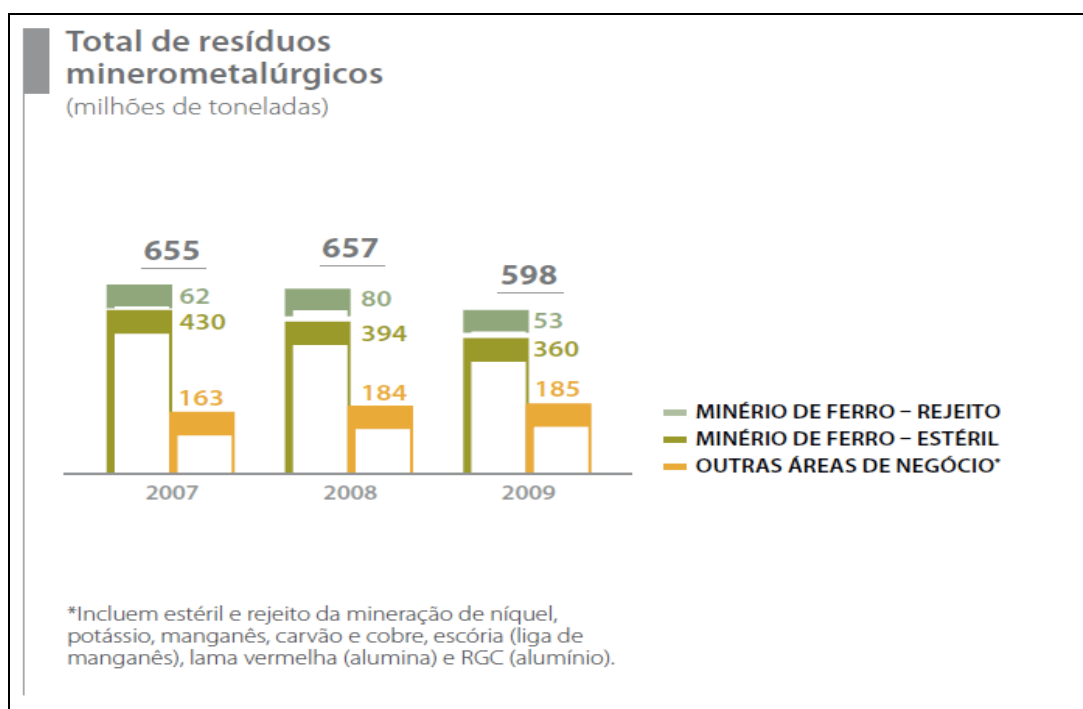


Figura1.2: Total de resíduos minerometalúrgicos

Fonte: Vale (2009)

Sabendo-se que 96 % do transporte nacional de passageiros e 62 % do transporte de cargas é realizado via terrestre, ANTT (2006), quando apenas 212.738 km dos 1.72.296,2 km de rodovias são pavimentadas, DNIT (2010), conforme informações constantes na Tabela 1.1: Extensão da malha rodoviária nacional (km). É possível inferir que as obras de pavimentação deste contingente geram expressivas e intoleráveis cifras aos cofres públicos.

Tabela 1.1: Extensão da malha rodoviária nacional (km)

Extensão (km)	Rede Pavimentada	Não Pavimentada	Total
Federal	62.351,4	13.844,4	119.032,7
Estadual	123.559,9	119.464,1	254.136,6
Municipal	26.2826,7	1.234.918,3	1.339.126,9
Estadual (Planejada)	-	-	131.331,4
Total	212.738,0	1.368.226,8	1.712.296,2

Fonte: DNIT (2011)

Considerando-se ainda a exigência de áreas de empréstimo de materiais para composição da estrutura do pavimento, pouco contempladas nos licenciamentos ambientais. Avaliando-se as implicações de ordem ambiental, do custo e risco social decorrentes da atual prática de deposição desses resíduos em barragens. Em suma, a dependência relativa ao transporte terrestre no país, a expressiva geração de rejeitos e o deficitário contingente de rodovias pavimentadas, conduzem ao desenvolvimento de pesquisas que viabilizem alternativas eivadas pelo conceito de sustentabilidade.

1.2 Justificativa

A possibilidade de se obter no rejeito do beneficiamento do minério de ferro, propriedades tecnológicas passíveis de contribuir como material de construção rodoviária foi a razão para o desenvolvimento deste trabalho.

Neste contexto, a utilização de rejeitos granulares oriundos do processo de mineração de minério de ferro se apresenta bastante atrativa, como uma forma alternativa de dispor adequadamente de parte da produção rejeitos gerada, pois minimizaria a ocorrência de risco ambiental, da possibilidade do seu uso como material de construção para fins rodoviários.

Alternativas tecnologicamente viáveis e ambientalmente corretas como a utilização desses rejeitos granulares estabilizados mecânicamente, granulometricamente ou quimicamente para fins rodoviários, torna-se uma opção em função da sua grande disponibilidade em face do aumento significativo da produção mineral nos últimos anos. Somando-se a isso a carência significativa em muitas áreas urbanas de materiais granulares apropriados para a execução de pavimentos (camadas de base, sub-base e reforço do subleito) de alta resistência mecânica para suportar a crescente demanda de tráfego pesado tanto nas áreas metropolitanas como nas áreas rurais incluindo as estradas vicinais e florestais.

1.3 Objetivos da Pesquisa

1.3.2 Objetivo Geral

Estudar as características físico-químicas, mineralógicas e mecânicas dos rejeitos do beneficiamento de minério de ferro, nos processos de flotação e concentração magnética, com o propósito de aplicá-los em camadas estruturais do pavimento.

1.3.3 Objetivos Específicos

- Caracterizar geotecnicamente os rejeitos através dos ensaios:
 - Granulometria conjunta;
 - Limites de consistência: Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade;
 - Massa específica dos sólidos;
- Analisar comportamento mecânico dos rejeitos efetuando os ensaios:
 - Compactação;
 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR);
 - Triaxial de cargas repetidas;
- Avaliar o comportamento mecânico dos rejeitos melhorados com cimento Portland CP II – E32 (NBR 11578), através dos seguintes ensaios:
 - Resistência à compressão simples;
 - Durabilidade por molhagem e secagem;
- Efetuar caracterização mineralógica, química e potenciométrica do pH
 - Ensaios de Difratomia por raio X;
 - Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado;
 - Análise potenciométrica do pH.

1.4 Organização dos conteúdos

Este trabalho encontra-se subdividido em cinco capítulos: introdução, revisão de literatura, materiais e métodos, resultados e análises, conclusão e sugestões para futuros trabalhos. Descritos a seguir:

- Revisão da Literatura - abordará os temas: rejeito de mineração, pavimentação rodoviária e estabilização de solo-cimento;
- Materiais e Métodos – descreverá os rejeitos analisados, os locais e forma de coleta e a metodologia utilizada na programação e elaboração dos ensaios;
- Resultados e Análises – apresentará os dados obtidos nos ensaios e estabelecerá correlações com a literatura técnico-científica;
- Conclusão e Sugestões para Futuros Trabalhos - serão enfatizados os principais aspectos obtidos nos ensaios e apontadas sugestões para pesquisas futuras, a fim de complementar os resultados obtidos neste trabalho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Rejeitos de Mineração

Na atividade de exploração mineral há uma grande geração de materiais de pouco ou nenhum valor econômico cuja disposição adequada constitui um importante condicionante que influencia a viabilidade do projeto de aproveitamento industrial. Os materiais gerados incluem os chamados minérios pobres, cujo teor de minério é baixo considerando os custos momentâneos de exploração e beneficiamento, ou ainda a inexistência de processos mais sofisticados que viabilizem tecnicamente a sua exploração. Estes materiais são normalmente dispostos em pilhas de estéril. Além desses, existe uma quantidade considerável de materiais que são gerados durante os processos de beneficiamento, normalmente denominados de rejeitos, e por serem gerados na forma de lama ou pasta, a destinação tradicional tem sido o lançamento em barragens de disposição de rejeitos. Uma avaliação crítica dos rejeitos normalmente oriundos de processos de mineração de ferro na região do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais, revela que a maioria dos rejeitos, cerca de 60 % a 70 %, apresentam uma granulometria tendendo às areias finas e médias siltosas, conforme visualiza-se na Figura 2.1.

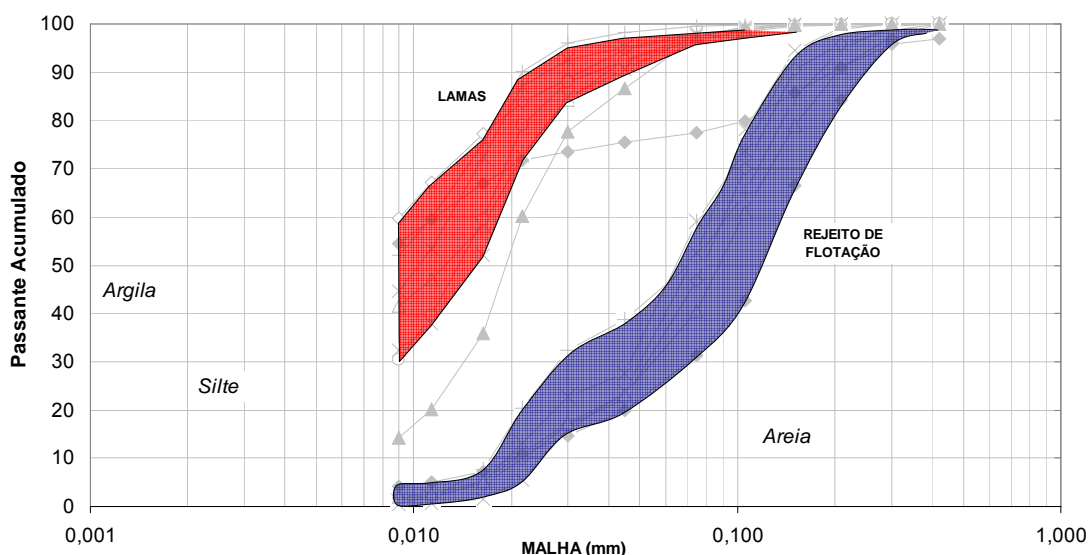


Figura 2.1: Faixas granulométricas, das lamas e rejeitos de flotação, típicas das usinas de processamento de minério de ferro

E como não há uma separação granulométrica durante o processo de disposição da lama gerada, este material tem sido lançado em barragens de rejeito juntamente com os cerca de 30 % restantes, cuja granulometria tende a de siltes e argilas, classificados geotecnicamente como solo finos

Esses materiais são resultado do processo de lavra e beneficiamento do minério de ferro. Em princípio, é necessário abordar alguns aspectos para melhor condução do tema. Conceitualmente, mineral é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. Minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possíveis de serem aproveitados economicamente (CETEM, 2004). A primeira atividade é a lavra, processo de escavação no qual é retirado o solo de recobrimento e efetuado o desmonte da rocha, nesta primeira fase resulta o rejeito denominado estéril, que em função do solo de cobertura e agregado no interior da rocha, sem valor importante ao empreendimento é disposto em pilhas. À partir de então, esse minério é encaminhado para beneficiamento, etapa que visa preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais (Ministério das Minas e Energia, 2008). O mineral de interesse encontra-se agregado a outros, faz-se então necessário efetuar tratamento para apuração daquele cujas propriedades físico-químicas é objetivo do investimento. O beneficiamento divide o mineral bruto em concentrado e rejeito este último sem valor econômico é armazenado em diques ou barragens. Segundo ABRÃO, (1987) os rejeitos podem comportar-se como solos não plásticos (rejeitos granulares), tendendo a areias finas e médias ou como solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas) características dos siltes e argilas.

O processo de obtenção do ferro concentrado é realizado em etapas sucessivas: britagem, moagem, deslamagem e flotação em colunas. Quando o processo utilizado gera rejeitos na forma sólida (pasta) o transporte é feito em caminhões ou correias transportadoras. Porém, se a geração for líquida, veiculam-se os materiais através de tubulações, por bombeamento ou gravidade para deposição em barragens.

Os rejeitos do beneficiamento de ferro de interesse deste trabalho serão os produzidos por separação magnética e flotação para os quais apresentam-se algumas definições divulgadas pelo Ministério de Minas e Energia:

Separação magnética: a propriedade determinante nesse processo é a suscetibilidade magnética. Baseado nesse fato, os minerais podem ser divididos em 3 grupos, de acordo com seu comportamento quando submetidos a um campo magnético (natural ou induzido): ferromagnéticos (forte atração), paramagnéticos (média e fraca atração) e diamagnéticos (nenhuma atração). Os processos podem ser desenvolvidos em via seca ou via úmida. Os equipamentos mais utilizados são os tambores, correias, rolos, carrosséis e filtros. A separação magnética é adotada na produção de minério de ferro, areias quartzosas, feldspatos dentre outros.

Flotação: atualmente, a flotação é o processo dominante no tratamento de quase todos os tipos de minérios, devido à sua grande versatilidade e seletividade. Permite a obtenção de concentrados com elevados teores e expressivas recuperações. É aplicado no beneficiamento de minérios com baixo teor e granulometria fina. O processo se baseia no comportamento físico-químico das superfícies das partículas minerais presentes numa suspensão aquosa. A utilização de reagentes específicos denominados coletores, depressores e modificadores permitem a recuperação seletiva dos minerais de interesse por absorção em bolhas de ar. Os equipamentos tradicionalmente adotados dividem em 2 classes mecânicos e pneumáticos dependendo do dispositivo utilizado para efetivar a separação. A flotação é adotada na produção de areias quartzosas de elevada pureza, cloretos, feldspatos, fluorita, fosfatos, magnesita, sulfetos, mica, berilo dentre outros. Na Figura 2.2: ilustram-se esquematicamente flotação por coluna e célula mecânica.

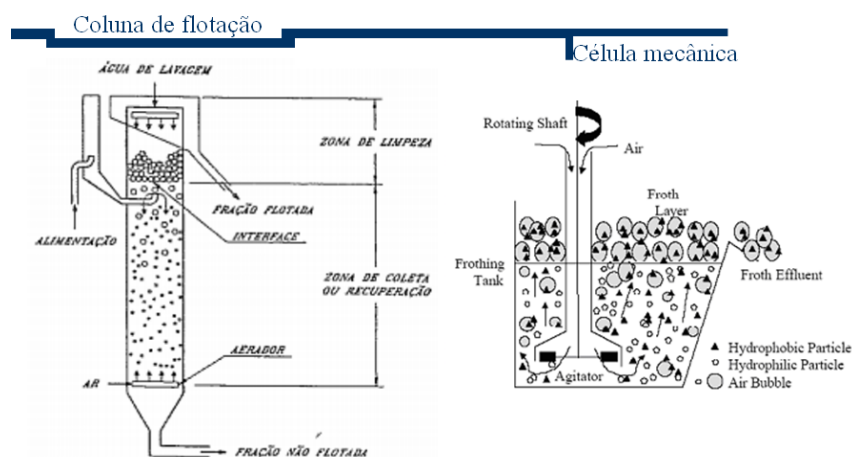


Figura 2.2: Equipamentos de flotação

Fonte: GOMES (2009)

2.2 Pavimentação Rodoviária

Definição de pavimento segundo DNIT (2006): superestrutura constituída por sistema de camadas de espessuras finitas, sobrepostamente compactadas e assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito, o qual é designado subleito – infraestrutura ou terreno de fundação. A Figura 2.3 ilustra uma estrutura de pavimento com várias camadas.

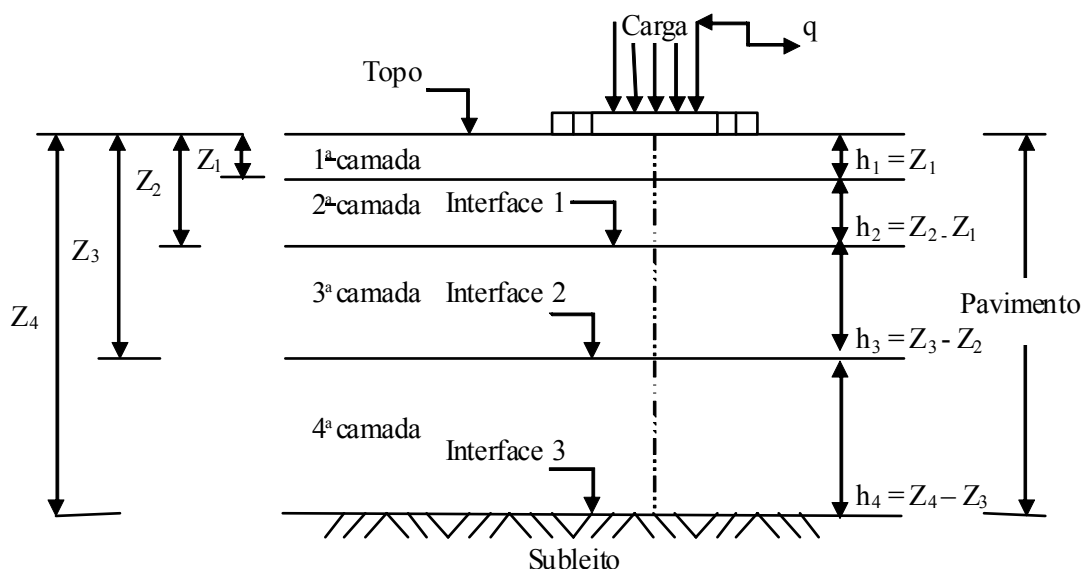


Figura 2.3: Sistema de várias camadas

Fonte: SENÇO (2008)

As principais funções desta obra de engenharia são: possibilitar o trânsito de veículos com conforto e segurança; resistir e distribuir os esforços verticais impostos pelo tráfego e suportar o desgaste decorrente dos esforços horizontais com maior durabilidade possível. Portanto, o dimensionamento deverá ser efetuado de tal forma que a superestrutura atenda a essas funções, através das camadas componentes, que constituídas de materiais adequados, suportarão a esses esforços e ainda aos decorrentes das adversidades climáticas.

Classificam-se os pavimentos de forma geral em rígidos e flexíveis (ABNT, 2006). Os rígidos são pouco deformáveis, sua ruptura ocorre por tração na flexão e são executados em concreto. Além de pista de rolamento, o revestimento tem função estrutural razão pela qual as cargas nele aplicadas são transmitidas de forma distribuída as camadas inferiores. Os flexíveis, face às propriedades viscoelastoplásticas e termoplásticas do asfalto

constituente, respondem mecanicamente às pressões com deformações concentradas; são normalmente dimensionados à compressão e à tração na flexão. A Figura 2.4 mostra esquematicamente as tensões verticais no subleito para os dois tipos de pavimento, quais sejam, rígido e flexível.

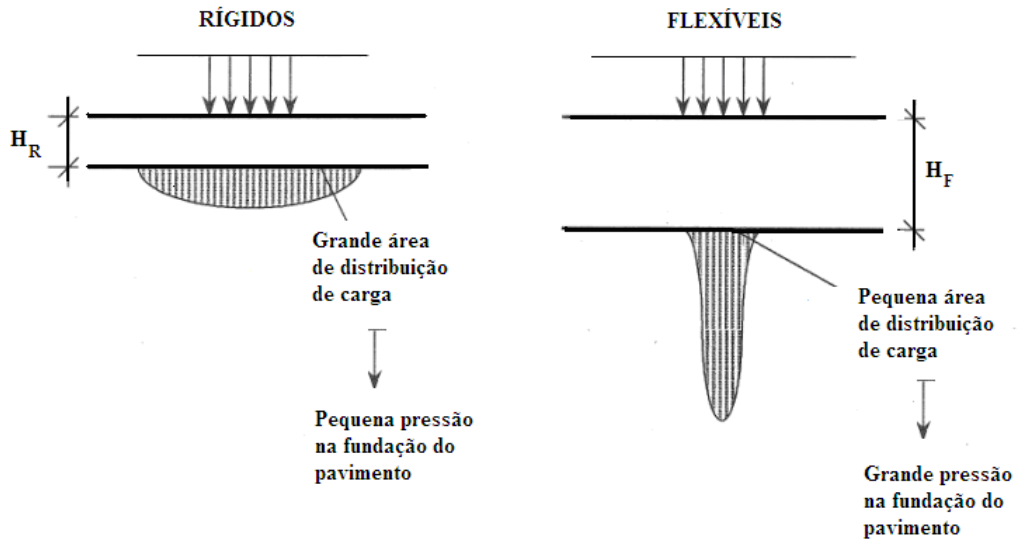


Figura 2.4: Comparação de distribuição de tensões entre pavimentos rígido e flexível

Fonte: ABCP – CPC-M3/4

Entretanto, essas classificações não representam de forma absoluta o comportamento da estrutura, pois um pavimento asfáltico, pode apresentar comportamento rígido quando submetido à temperaturas muito baixas, situação em que a viscosidade característica do material é muito aumentada. Outrossim, um revestimento rígido pode ser executado sobre base flexível, situação normalmente identificada na recuperação de rodovias recapeadas em concreto. Considerações sobre o tema podem ser vistas em Yoder e Witczak (1975), Medina et al (2005), Balbo (2007), Senço (2008) e Rezende (2009).

Definição das camadas componentes da estrutura do pavimento (ABNT, 1982):

- Subleito – terreno de fundação do pavimento ou do revestimento.
- Sub-base – é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido na terraplenagem.

- Base – é uma camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre o qual se constrói um revestimento.
- Revestimento – é a camada, tanto quanto possível impermeável, que se destina, econômica e simultaneamente:
 - a) a melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança;
 - b) a resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável, a superfície de rolamento.

Admite-se ainda uma camada de reforço denominada reforço do subleito, entre este e a sub-base, quando o solo de fundação do pavimento for de baixa capacidade de suporte ou quando economicamente justificar-se a inclusão desta camada. Apresentam-se na Figura 2.5 seção transversal típica de pavimento flexível e na Figura 2.6 seção transversal típica de pavimento rígido.

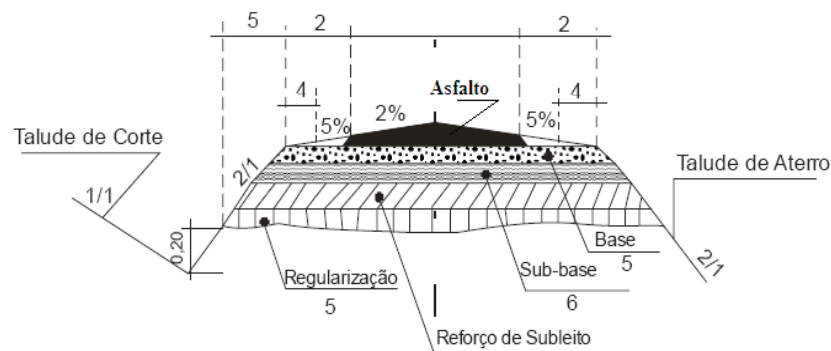


Figura 2.5: Seção transversal típica de pavimento flexível

Fonte: DNIT (2006)

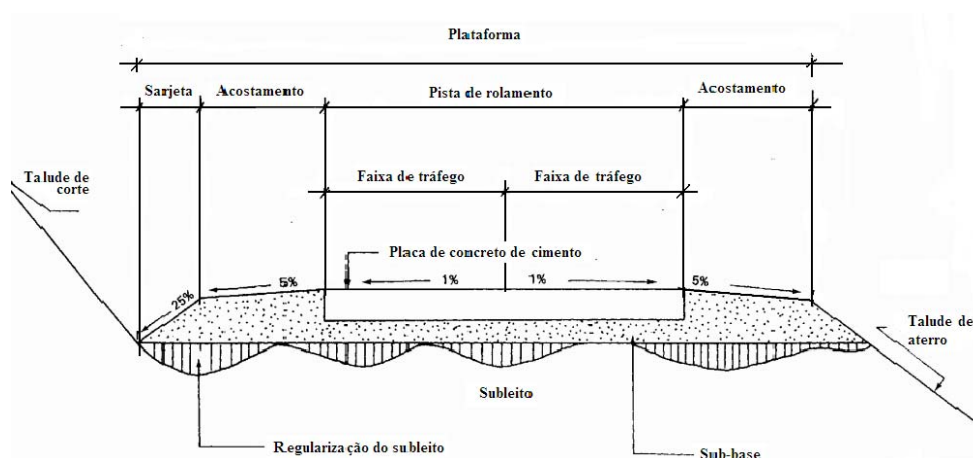


Figura 2.6: Seção transversal típica de pavimento rígido

Fonte: DNIT (2006)

A complexidade estrutural do pavimento encontra-se na diversidade de condições de contorno para o seu dimensionamento estabelecida pelas suas peculiaridades : variação do solo de fundação ou subleito ao longo de quilômetros em função de seção transversal média de 10 m, exposição diária a alterações climáticas e solicitações dinâmicas por esforços dependentes do tráfego, quantitativa e qualitativamente. Além disso, é preponderante a disponibilização de solos compatíveis com as exigências de projeto adequadas físico-química e mecânicamente à composição de suas camadas. As ferramentas básicas estão na teoria da elasticidade, análise numérica, mecânica, resistência dos materiais, Senço (2005).

As camadas estruturais do pavimento podem ser avaliadas quanto a nobreza correlacionando-as com os índices CBR necessários à sua composição conforme ilustrado na Figura 2.7

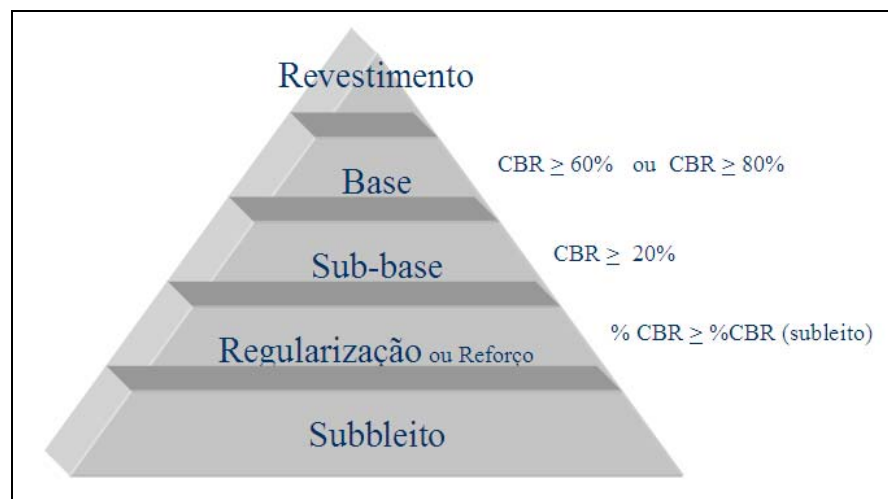


Figura 2.7: Camadas quanto a nobreza, correlações com o CBR

Fonte: Notas de aula - Prof. Dario Cardoso de Lima

As cargas dos pneumáticos são transmitidas às camadas do pavimento e ao subleito sendo absorvidas por elas de uma forma geralmente gradativa e compatíveis com a nobreza das camadas. Demonstram-se na Figura 2.8: Distribuição dos esforços na estrutura do pavimento.

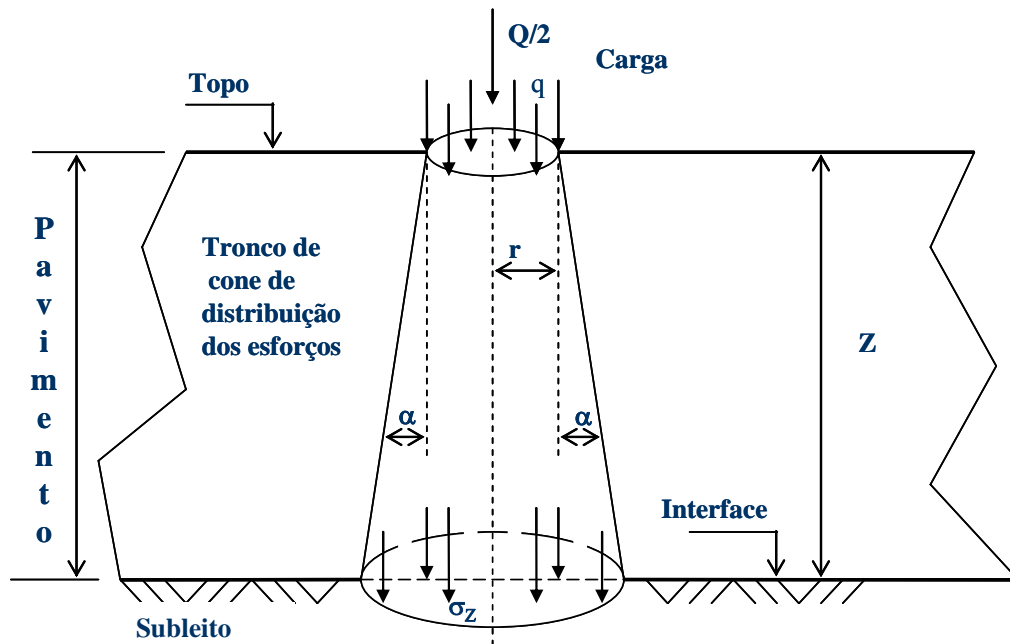


Figura 2.8: Distribuição dos esforços na estrutura do pavimento

Fonte: Senço (2008)

Dimensionam-se os pavimentos através de métodos empíricos ou mecanicistas. Os empíricos se baseiam na formação de banco de dados na aplicação repetida de um procedimento e no acompanhamento avaliativo de seu resultado ou desempenho em laboratório e campo. Os mecanicistas fundamentam-se nas teorias elástica linear e não-linear dos materiais, empregando-se técnicas de elementos finitos ou diferenças finitas; também no comportamento viscoelastoplástico de misturas betuminosas empregadas no revestimento do pavimento bem como no conhecimento das propriedades físico-mecânicas dos materiais encontrados em todas as camadas do pavimento.

O. J. Porter, engenheiro da *California Division of Highways*, realizou pesquisas que permitiram definir algumas das principais causas da ruptura de pavimentos flexíveis, apresentando, então, a primeira curva empírica para dimensionamento com base em um critério de resistência ao cisalhamento do subleito indiretamente obtida pelo ensaio *California Bearing Ratio (CBR)* – Índice de Suporte Califórnia. Na mesma época e local, estabelecia-se o ensaio do Proctor para compactação dos solos, Balbo (2007). No Brasil foi normalizado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), por meio da ABNT (1984), sendo denominado Ensaio Normal de Compactação, Trindade et al (2008).

O dimensionamento pelo método mecanicista demanda ensaios complexos realizados em equipamentos sofisticados, a exemplo do ensaio triaxial de cargas repetidas para obtenção do módulo de resiliência. Senço (2005) exemplifica o Método da Confiabilidade desenvolvido por Motta (1991).

Harold Malcom Westergard propôs equações analíticas para o cálculo de espessuras de placas de concreto apoiadas sobre o subleito de vias, baseadas no cálculo de deformações e momentos fletores, em sua "Teoria para Projeto de Pavimentos de Concreto", utilizada pela ABCP como base para dimensionamento de pavimentos de concreto.

O método da AASHTO (*American Association of State Highway Transportation Officials*), foi desenvolvido a partir de um experimento em larga escala em Ottawa, Estado de Illinois pela AASHO (*American Association of Highway*), Balbo (2007). Foram construídas seis pistas, com dezenas de seções de pavimentos, empregando diversos tipos de materiais de construção. Empregaram-se as mesmas bases e sub-bases para construção de pavimentos rígidos (9 seções) e flexíveis (12 seções) que foram analisadas sob aspectos de degradação funcional e estrutural. Avaliaram o total de 836 seções de pavimentos relativamente a aplicação de mais de um milhão de eixos equivalentes. Os resultados obtidos foram utilizados para desenvolvimento de teorias e métodos de dimensionamento dos pavimentos em todo o mundo.

Encontram-se nos manuais publicados pelo IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias), vinculado ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, procedimentos e referências normativas para os dimensionamentos de pavimentos flexíveis (DNIT, 2006) e pavimentos rígidos (DNIT, 2005). As abordagens de Medina e Motta (2005); Balbo (2007) e Senço (2008) estabelecem conceituações e metodologias fundamentais para a compreensão do tema.

2.3 Estabilização granulométrica

A idéia de estabilização granulométrica de solos emerge da combinação bastante simples de qualidades apresentadas pelos diferentes tipos de solo de forma a resistir aos esforços e deformações impostas pelas solicitações de tráfego. No caso das estradas vicinais não pavimentadas, por exemplo, as estradas constituídas por pavimento de solo arenoso apresentam boa superfície de rolamento durante o período chuvoso mas, muita poeira no

período de estiagem.

Já os pavimentos constituídos por solo argiloso, apresentam superfície de rolamento razoável durante o período de estiagem porém, muita lama no período chuvoso. Assim, a combinação adequada destes materiais, produzirá misturas estáveis durante maior período de tempo e menos dependentes das condições pluviométricas.

A estabilização granulométrica de solos consiste no emprego de um material ou mistura de dois ou mais materiais que se enquadrem dentro de uma determinada especificação, visando a melhoria e a estabilidade das propriedades geomecânicas do solo assim obtido.

Para efeito de estabilização granulométrica, os solos podem ser classificados quanto a relação entre as frações granulométricas em:

- Solos com poucos finos (tipicamente solos granulares):

Nestes solos, a estabilidade é garantida pelos contatos interpartículas (grãos), geralmente são de difícil trabalhabilidade, apresentam baixa densidade e elevada permeabilidade;

- Solos com finos suficientes para preencher os vazios:

Nestes solos, a estabilidade é conferida pelos contatos interpartículas. Devido ao baixo índice de vazios apresentam baixa permeabilidade, elevada densidade, e moderada dificuldade de compactação. Tendem a apresentar elevadas resistências ao cisalhamento.

- Solos com grande quantidade de finos (com pouco contato interpartículas):

Estes solos apresentam boa trabalhabilidade, baixa densidade e permeabilidade. Em função da grande quantidade de finos e conseqüente facilidade de reter água. A estabilidade é grandemente afetada pelas condições hídricas.

Solos naturalmente estabilizados são geralmente chamados de solos bem graduados sendo definidos pela curva de Talbot, cujo diâmetro passante em qualquer peneira é definido pela expressão:

$$\left(\frac{\% \text{ passante na peneira}}{100} \right)^2 = \frac{\text{abertura da peneira}}{\text{diâmetro da maior partícula}}$$

A estabilização granulométrica assume algumas restrições básicas:

- $IP < 6$ e $LL < 25$ para solos de clima temperado, e
- $IP < 15$ e $LL < 40$ para solos tropicais

A composição granulométrica da mistura estabilizada pode ser feita via método algébrico, ou analítico, método do triângulo ou método gráfico de Rothfuchs, que é o mais utilizado por ser mais racional e permitir várias composições e simulações otimizando o processo de obtenção da curva estabilizada.

2.4 Estabilização com cimento

A mistura solo-cimento é o fruto da conjugação do solo, do cimento e da água, em proporções adequadas obtidas em ensaios de laboratório. Segundo Lima (1985), é regra básica que o teor de cimento empregado aumenta com o teor de argila, o que torna os solos arenosos mais favoráveis a esta estabilização. Esta técnica, possui expressivo número de experiências em obras de pavimentação. O mecanismo de reação da mistura solo-cimento, ocorre a partir do desenvolvimento das reações químicas que são geradas na hidratação do cimento (mistura do cimento com água). A partir daí, desenvolvem-se ligações mecânicas e químicas entre as superfícies dos grãos do cimento e as partículas de solo. A cimentação se torna mais efetiva quanto maior for o número de contatos entre os cristais formados.

A adição de pequenas quantidades de cimento, acima de 2 % por exemplo, já é suficiente para alterar as propriedades físico-químicas e mecânicas do solo. A mistura se estabiliza com a hidratação do cimento, tornando-a mais resistente à ação da água. Ingles e Metcalf (1972) relatam que a adição de 5 % a 10 % de cimento a um pedregulho sem impurezas torna-o quase um concreto, semelhante a um concreto rolado.

É válido ressaltar que para serem consideradas misturas de solo-cimento, segundo o DNIT (2006) os teores de cimento Portland, em relação à massa seca do solo, usualmente estão na ordem de 6 % a 10 %. Valores inferiores na faixa de 2 % a 4 % enquadram a mistura na classe de solo melhorado com cimento. Textualmente as classificações estão assim definidas:

- Solo-cimento: é uma mistura devidamente compactada de solo, cimento Portland e água; a mistura solo-cimento deve satisfazer a certos requisitos de densidade,

durabilidade e resistência, dando como resultado um material duro, cimentado, de acentuada rigidez à flexão. O teor de cimento adotado usualmente é da ordem de 6% a 10%.

- Solo melhorado com cimento: esta modalidade é obtida mediante a adição de pequenos teores de cimento (2% a 4%), visando primordialmente a modificação do solo no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água, sem cimentação acentuada, são considerados flexíveis.

Um cuidado, que precisa ser observado, refere-se ao quantitativo do teor de cimento indicado para o projeto da mistura. Dependendo do valor fixado, pode ser inviável estabilizar o solo sob o ponto de vista econômico para a finalidade em vista.

Para a construção de camadas de pavimentos, valores acima de 7 % em relação ao peso seco do solo, consomem grandes quantidades de cimento. Independentemente do valor fixado, cuidados quanto à cura da mistura são indispensáveis, devido às reações de hidratação do cimento, pois se não forem controladas, geram muitas fissuras e trincas na camada compactada, comprometendo o seu desempenho estrutural.

Algumas considerações referentes à constituição química e mineralógica dos solos devem ser observadas na estabilização solo-cimento. Uma delas é a presença deletéria de sulfatos (Petrucci, 1978), visto que existem possíveis reações destes com o hidróxido de cálcio e a alumina livre, formando o sulfo-aluminato de cálcio, de natureza expansiva. Outra é a presença de matéria orgânica, apontada por Petrucci (1978) como um fator que desfavorece a ocorrência das reações de hidratação do cimento.

Finalmente ressalta-se a importância da qualidade da água a ser utilizada nas misturas dos ensaios comparativos de pega e resistência à compressão que devem conter, dentre outras exigências, o pH na faixa de $5 < \text{pH} < 8$ para assegurar as reações de hidratação e endurecimento do cimento ou de preferência água destilada, de acordo com a Método de Ensaio 037/2004, DNIT (2004). Apresentam-se na Figura 2.9 as características usuais de sub-bases estabilizadas com cimento, DNIT (2005).

Tipos de Estabilização	Requisitos Mínimos de Granulometria e Outros	Requisitos de Dosagem	Espessuras Usuais
Solo-cimento	Figura 14	1) Resistência mínima à compressão simples, aos 7 dias, entre 1,4 e 2,1 MPa 2) Consumo mínimo de cimento igual a 5% em massa	10cm a 20cm
Brita tratada com cimento	Figura 15	1) Resistência à compressão simples, aos 7 dias, entre 3,5 e 5,0 MPa 2) Consumo mínimo de cimento igual a 3% em massa	10cm a 20cm
Concreto pobre (ou rolado)	Figura 16	1) Resistência característica à compressão simples, aos 7 dias, entre 3,0 e 7,0 MPa. 2) Relação cimento:agregado entre 1:15 e 1:22	7,5cm a 15cm
Solo melhorado com cimento	DNER-ESP09-71	1) Índice de suporte Califórnia igual ou maior que 30% (conforme DNER-ES-P 09-71) 2) Consumo mínimo de cimento igual a 3% em massa	10cm a 20cm

Figura 2.9: Características usuais de sub-bases estabilizadas com cimento

Fonte: DNIT (2005)

2.5 Ensaios para a caracterização de materiais a serem empregados em projetos de pavimentos rodoviário.

2.5.1 Granulometria conjunta

Consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida do solo. Para partículas de solo maiores do que 0,075 mm (peneira nº 200 da ASTM), o ensaio é feito passando uma amostra do solo por uma série de peneiras de malhas quadradas de dimensões padronizadas. Pesam-se as quantidades retiradas em cada peneira e calculam-se as respectivas porcentagens. As partículas de diâmetro inferiores a 0,075 mm são avaliadas pelo processo de sedimentação contínua em meio líquido (com viscosidade e peso específico conhecidos) baseado na Lei de Stokes que relaciona o diâmetro das partículas com sua velocidade de sedimentação.

À partir dos resultados obtidos traçam-se as curvas granulométricas. O eixo da abscissa corresponde às dimensões da partículas em escala logarítmica e o das ordenadas as porcentagens do material passante na respectiva peneira em escala aritmética. As formas das curvas obtidas possibilitam a comparação dos materiais quanto a sua distribuição granulométrica, conforme indicado na Figura 2.10.

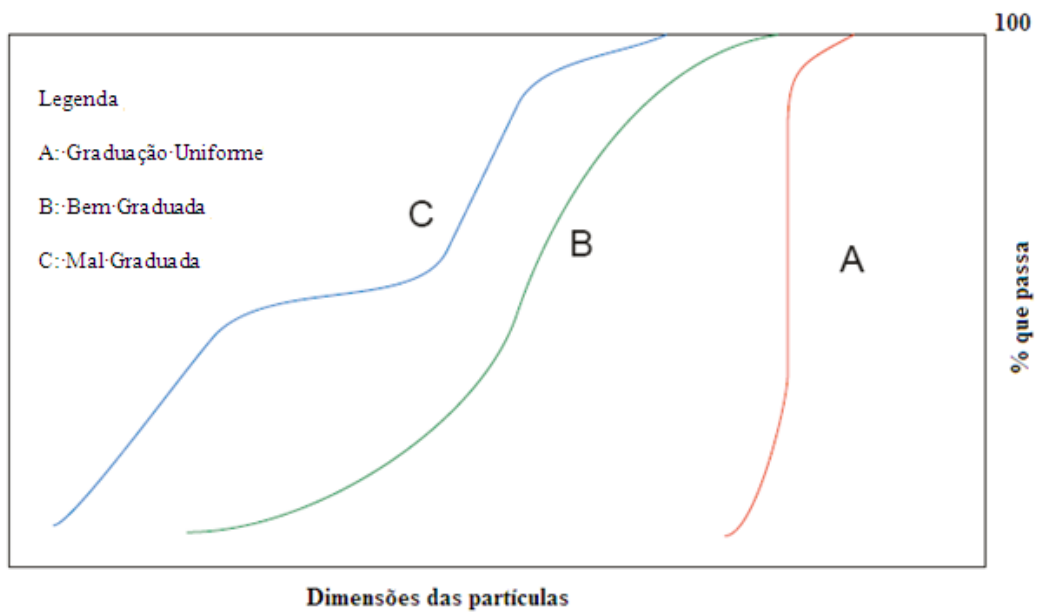


Figura 2.10: Curvas granulométricas quanto a graduação

Fonte: DNIT (2006)

Conforme o uso a que se destina o material deverá situar-se em determinada faixa granulométrica e quando necessário passar por processo de estabilização para adequar-se ao exigido para sua aplicabilidade conforme especificação. Apresenta-se na Figura 2.11 a faixa granulométrica geral recomendada para solo-cimento, DNIT (2006).

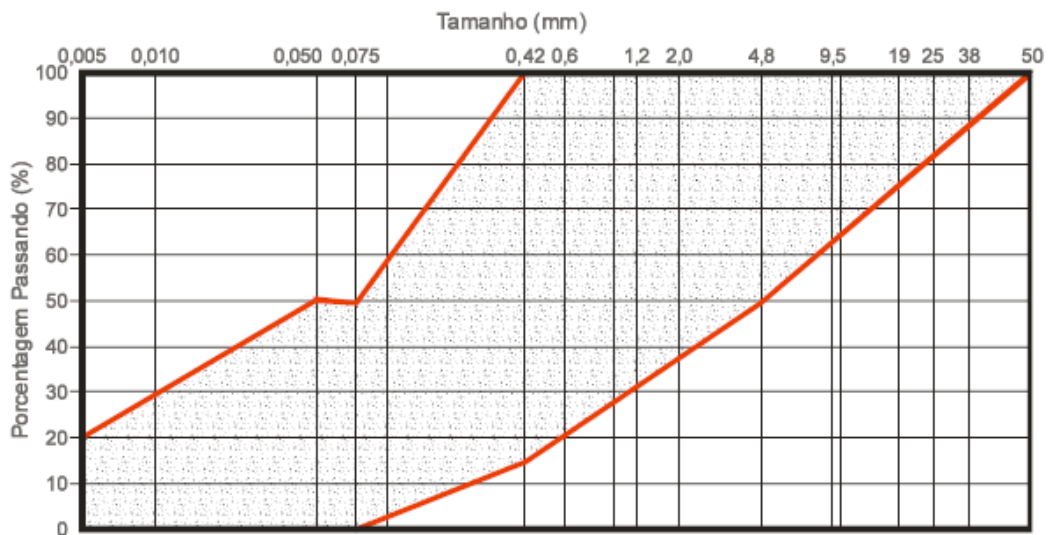


Figura 2.11: Faixa granulométrica geral recomendada para solo-cimento

Fonte: DNIT (2005)

2.5.2 Limites de consistência

Devido ao fato do material fino, fração correspondente às argilas, constituinte do solo representar papel fundamental no seu comportamento, especialmente em presença de água, outras formas de identificação indireta foram estabelecidas. Generalizou-se os ensaios e índices propostos pelo engenheiro químico Atterberg, pesquisador do comportamento dos solos sob o aspecto agrônômico, adaptados e padronizados pelo professor de Mecânica dos Solos Arthur Casagrande. Pinto (2006). Avaliam-se através desses limites a plasticidade propriedade características dos solos argilosos que consistem na capacidade de serem moldados sem variação de volume, sob certas condições de umidade. Quando o teor de umidade é muito elevado o solo tende ao estado líquido, à medida que a umidade decresce adquire plasticidade e torna-se quebradiço com a perda de umidade. Na transição entre um estado e outro estão os limites conforme exemplifica a Figura 2.12: Limites de Atterberg dos Solos.

O Limite de liquidez (LL) é definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar utilizando-se o aparelho de Casagrande. São feitas diversas tentativas para diferentes teores de umidades com os quais correlaciona-se os números de golpes necessários para fechar a ranhura. Através da interpolação dos dados obtém-se a determinação do limite de liquidez.

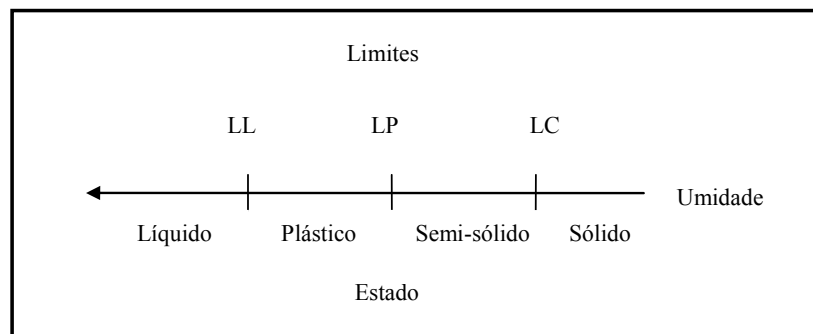


Figura 2.12: Limites de Atterberg dos Solos.

Quanto ao Limite de Plasticidade (LP) é resultado da moldagem de um bastão de 3 mm de diâmetro e de 12 a 15 cm de comprimento. É definido como o teor de umidade do material do bastonete, quando nas dimensões citadas, apresentar fissuras durante o processo de rolamento em placa de mármore ou vidro. Define-se o Limite de Contração (ou Retração) como o teor de umidade abaixo do qual o volume da amostra cessa de diminuir é determinado através de secagem em estufa.

O Índice de Plasticidade é expresso pela diferença entre o de liquidez e o de plasticidade:
 $IP = LL - LP$.

A plasticidade do solo será considerada baixa para valores de $IP < 8$, média caso resulte em $8 < IP < 25$ e alta para $IP > 25$. Além disso, se pequenas quantidades de argila provocarem altos índices de consistência é fator indicativo de argila de elevada atividade decorrente do argilo mineral de origem, conferindo ao solo comportamento coesivo. O índice de atividade IA pode ser quantificado pela equação (1):

$$IA = \frac{\text{Índice de plasticidade}}{\text{Fração de argila}} \quad (1)$$

Segundo SKEMPTON (1953), a argila pode ser classificada em normal, inativa e ativa segundo o valor do IA de acordo com os seguintes limites: normal: $0,75 < IA < 1,25$; inativa: $IA < 0,75$ e ativa: $IA > 1,25$.

2.5.3 Peso específico dos sólidos

É função dos minerais constituintes do solo e do percentual em que se apresentam. Simboliza o valor médio dos pesos específicos da fase sólida dos minerais, compostos orgânicos, sais precipitados e materiais não cristalinos. Mantém valor praticamente inalterado em função do tempo e auxilia na caracterização do solo.

Figueiredo (2007) constatou em sua pesquisa as correlações entre teores de ferro (Fe) e as densidades de partículas de rejeitos de minério apresentadas por Espósito (2000) e Lopes (2000), observando variação incremental na densidade dos grãos relativa ao aumento do teor de ferro contido no rejeito estudado em seu trabalho.

2.6 Classificação geotécnica dos solos

O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema, Pinto (2006). Diversos métodos são utilizados para obtenção destas características, para o propósito deste trabalho empregaram-se o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) e o sistema originário dos Estados Unidos proposto pela *Transportation Research Board*

(TRB), mais usualmente aplicado à engenharia rodoviária.

2.6.1 Classificação *Highway Research Board* (HRB)

Avalia-se através da granulometria e dos limites de *Atterberg* o enquadramento do solo em grupos de materiais granulares e silto-argilosos, inicialmente consideram-se percentuais passantes na peneira nº 200. A HRB (*Highway Research Board*) publicou em 1945 subdivisão dos grupos classificadores, até então utilizados, apresentando o conceito de Índice de Grupo (IG), número inteiro para subsidiar o dimensionamento de pavimentos através da fórmula:

$$IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d \quad (2)$$

onde:

a = percentagem do material que passa na peneira de nº 200, menos 35;

- Se $a > 75$, adota-se $a = 40$; se $a < 35$, adota-se $a = 0$

b = percentagem do material que passa na peneira de nº 200, menos de 15;

- Se $a > 55$, adota-se $b = 40$; se $a < 15$, adota-se $b = 0$;

c = valor do limite de liquidez (LL) menos 40;

- Se $LL > 60 \%$, adota-se $c = 20$; se $LL < 40 \%$, adota-se $c = 0$;

d = valor do índice de plasticidade (IP) menos 10;

- Se $IP > 30 \%$, adota-se $d = 20$; se $IP < 10 \%$, adota-se $d = 0$.

Essa classificação, recomendada pela AASHTO e adotada pelo DNIT, é aplicada para avaliação de solos destinados à pavimentação rodoviária e mundialmente utilizada.

Os solos são divididos em dois grandes grupos em função da percentagem passante na peneira nº 200 menor ou igual a 35 % (granulares) ou maior que 35 % silto-argilosos. Senço (2008). Aplicam-se os valores máximos e mínimos para equação do IG e verificam-se que para os solos A-1-a, A-1-b, A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7 ($p \leq 35\%$) a parcela

relativa $0,2a = 0$ e para os solos A-1-a, A-1-b, A3, A-2-4, A-2-5, A-4 e A-5 a parcela $0,01.b.d = 0$ ($IP \leq 10$).

Enfim, utilizam-se tabela classificatória para a identificação, onde separam-se os solos em grupos e subgrupos através de sistema de eliminação da esquerda para a direita enquadrando-se os percentuais passantes nas peneiras, o limite de liquidez e o índice de plasticidade. Os valores considerados corretos serão os primeiros coincidentes com o enquadramento na tabela no sentido da esquerda para direita. Características principais e comportamento dos solos conforme grupo e subgrupo podem ser encontradas em Senço (2008), DNIT (2006). Apresentam-se a classificação TRB na Figura 2.13.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Figura 2.13: Classificação dos solos segundo o TRB

Fonte: DNIT (2006)

Apresentam-se na Figura 2.14: Correlações entre as classificações TRB e USCS

Classificação TRB	Classificação Unificada		
	Mais provável	Possível	Possível, mas improvável
A-1-a	GW - GP	SW - SP	GM - SM
A-1-b	SW - SP - GM - SM	GP	—
A-3	SP	—	SW - GP
A-2-4	GM - SM	GC - SC	GW - GP - SW - SP
A-2-5	GM - SM	—	GW - GP - SW - SP
A-2-6	GC - SC	GM - SM	GW - GP - SW - SP
A-2-7	GM - GC - SM - SC	—	GW - GP - SW - SP
A-4	ML - OL	CL - SM - SC	GM - GC
A-5	OH - MH - ML - OL	—	SM - GM
A-6	CL	ML - OL - SC	GC - SM - GC - SC
A-7-5	OH - MH	ML - OL - CH	GM - SM - GC - SC
A-7-6	CH - CL	ML - OL - SC	OH - MH - GC - GM - SM

Figura 2.14: Correlações entre as classificações TRB e USCS

Fonte: DNIT (2006)

2.6.2 Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) ou *Unified Soil Classification System* (USCS)

Desenvolvida por Arthur Casagrande baseia-se nas propriedades granulométricas, nos limites de Atterberg (LL e IP), obtidos na fração do solo menor que 0,42 mm, essencialmente para classificar a fração fina do solo, através da carta de plasticidade. Os solos ficam divididos em 14 grupos representados através de duas letras em que a primeira simboliza a granulometria e a segunda refere-se à plasticidade.

Os solos em que mais de 50 % da fração fina fica retida na peneira 0,075 mm identificam-se pelas letras: G (pedregulho), S (areia) acrescidos das letras W (bem graduados) e P (mal graduados).

Quando a fração fina do solo representa mais de 50 % da porcentagem passante na peneira de malha 0,075 mm, então recebem as letras M (silte) e C (argila) e a segunda letra identificará a plasticidade L (baixa) e H (alta). Os solos orgânicos são representados pela letra O.

Este sistema de classificação se fundamenta na caracterização tátil-visual, na textura ao considerar as frações granulométricas e os coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC), conforme as equações 3 e 4 da curva granulométrica e nos limites de

Atterberg ao levar em conta a Carta de Casagrande apresentada na Figura 2.15.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (4)$$

Onde D_{10} , D_{30} , e D_{60} representam respectivamente os diâmetros abaixo dos quais se situam respectivamente 10 %, 30 % e 60 % em peso das partículas. O D_{10} é denominado diâmetro efetivo e indica a finura do solo.

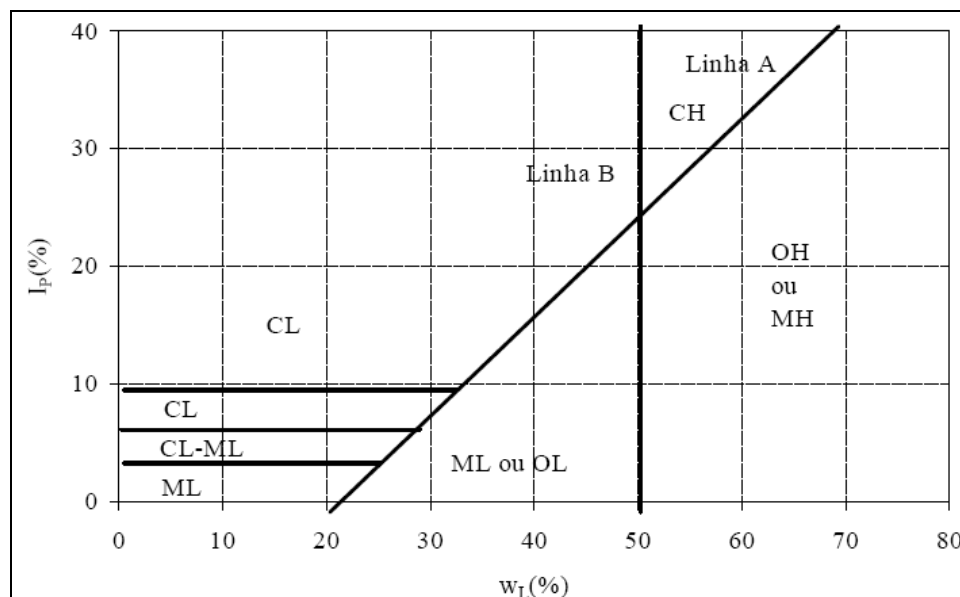


Figura 2.15: Carta de plasticidade de Arthur Casagrande

Fonte: DNIT (2006)

2.7 Ensaios de resistência mecânica

2.7.1. Índice Suporte Califórnia (ISC ou CBR)

A capacidade de suporte de um solo compactado pode ser medida através do ensaio CBR (*California Bearing Ratio* ou ISC "Índice de Suporte Califórnia"), idealizado pelo engenheiro O. J. Porter, em 1939, no estado da Califórnia - USA.

Consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma

penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente. Essa relação é expressa em porcentagem.

Em paralelo, neste ensaio também é medida expansibilidade do solo quando submerso em água por 96 horas.

É sem dúvida, uma das características mais aceitas para avaliar o comportamento de um solo, quer como fundação de pavimento, quer como componente das camadas desse pavimento, Senço (2008). Encontram-se na Figura 2.16 correlações entre os valores prováveis de CBR e os grupos de classificação TRB.

Solos	CBR
A-1-a	40 a mais de 80
A-1-b	20 a mais de 80
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 80
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	menos de 2 a 10
A-6 e A-7	menos de 2 a 15

Figura 2.16: Valores prováveis de CBR para os grupos da classificação TRB

Fonte: DNIT (2006)

Senço (2008), observou a influência dos solos granulares na obtenção de valores elevados de CBR e enfatiza o comportamento inverso para os solos finos, siltes e argilas. Considera a influência da matéria orgânica contida nos solos finos, como causa dos baixos resultados que podem apresentar índices mínimos.

2.7.2. Durabilidade por molhagem e secagem

Avaliam-se neste ensaio, as perdas de massa de corpos de prova de misturas de solo cimento, segundo a metodologia descrita no método de ensaio (DNER, 1994b). Segundo Lima et al. (1993) a durabilidade pode ser definida como sendo a capacidade de um material manter sua integridade quando submetido à ação de agentes externos. Constitui-se esse ensaio, na realização de 12 ciclos de molhagem e secagem em estufa, em 3 corpos

de prova cilíndricos, que após cura de 7 dias em câmara úmida, são levados a imersão durante 5 h, seguindo-se a secagem em estufa a 72⁰C no período de 42 h. Em seguida, dois deles recebem escovação, com escova de fios de aço achatados de peso igual a 1,5kg ABCP (1986). O terceiro corpo de prova é mantido como referência em termos de massa e volume. No último ciclo são mantidos em estufa a 105⁰C para constância de massa e obtêm-se a perda de massa final ou total em relação à massa seca na moldagem.

2.7.3. Resistência à compressão simples

Denominado também ensaio de resistência à compressão não confinada, consiste na aplicação de carregamento axial em corpo de prova cilíndrico sem aplicação de confinamento. Considera-se este procedimento uma particularidade do ensaio triaxial UU (*Unconsolidated Undrained*) em que a pressão confinante é nula e devido a curta duração do ensaio não há tempo suficiente para que ocorra drenagem ou dissipação das tensões neutras provocadas pela carga aplicada. O resultado deste ensaio indica a resistência ao cisalhamento do solo para baixas tensões totais, considerada simplificada como a metade da tensão desviadora máxima, Pinto (2006). A orientação utilizada para realização do ensaio encontra-se em DNER (1994c).

2.7.4. Triaxial de cargas repetidas

O módulo de resiliência (M_R) de um solo é um parâmetro que expressa a sua rigidez, no regime elástico. A sua obtenção em geral é feita no laboratório através de equipamentos mais sofisticados que aplicam cargas repetidas, e isto se faz na tentativa de melhor reproduzir as solicitações que ocorrem no campo. Um mesmo solo, dependendo de suas características de compactação e umidade, pode apresentar valores significativamente diferentes de módulo de resiliência. Na mecânica dos pavimentos é um dos parâmetros mais importantes para expressar a resposta estrutural dos materiais empregados no subleito e nas camadas do pavimento. Dependendo do tipo de material empregado na estrutura e subleito da rodovia, o M_R pode ser expresso como um valor constante (materiais cimentados e revestimentos asfálticos) ou através de equações que refletem o estado de tensão a que está solicitado, em função do tráfego que utiliza a via.

Na determinação do módulo de resiliência ocorrem deformações plásticas e elásticas, mas somente a parcela da deformação recuperável (ϵ_r) que se utiliza para a sua obtenção. O

ensaio é realizado com corpos-de-prova não saturados, geralmente em condições de drenagem livre. As normas geralmente empregadas para obtenção do módulo de resiliência dos solos para finalidades rodoviárias são as seguintes: DNIT (2010) e AASHTO (1999).

A determinação do módulo de resiliência, nas condições do ensaio triaxial cíclico, pode ser feita pela equação 5.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_e} \quad (5)$$

onde: M_R = módulo de resiliência (kPa ou kgf/cm²); σ_d = tensão desvio axial repetida (kPa ou kgf/cm²); $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$; σ_1 = tensão principal maior; σ_3 = tensão principal menor; ϵ_e = deformação específica axial elástica ou resiliente correspondente ao número de aplicações de σ_d .

A deformação específica axial resiliente pode ser determinada pela equação 6:

$$\epsilon_e = \frac{\Delta h}{h} \quad (6)$$

onde: Δh : deslocamento axial elástico ou resiliente (mm); h : altura do corpo de prova (mm).

Desde a década de 60, vários pesquisadores se empenharam em estudar o comportamento resiliente dos materiais empregados nas estruturas de pavimentos viários, como por exemplo: SEED et al. (1962), DUNCAN, MONISMITH e WILSON (1968), DEHLEN E MONISMITH (1970), ALLEN e THOMPSON (1974), YODER e WITCZAK (1975). No Brasil, a partir da década de 70, na COPPE-UFRJ (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia-Universidade Federal do Rio de Janeiro), com apoio do IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias) do DNIT, iniciaram-se os estudos na tentativa de melhor compreender o comportamento dos materiais empregados em pavimentos rodoviários, sujeitos à solicitações dinâmicas. Isto motivou vários pesquisadores de diversas instituições de pesquisa e organismos rodoviários brasileiros a desenvolver estudos em solos e em misturas asfálticas sujeitos a carregamentos repetidos, sob condições diversas de compactação, umidade e temperatura. Dentre os inúmeros trabalhos realizados no Brasil para a determinação de módulos de resiliência de solos, citam-se: MEDINA e PREUSSLER (1980), SVENSON (1980), PREUSSLER (1983), MOTTA (1991), MACEDO (1996), BERNUCCI (1995), MEDINA e MOTTA (2005), TAKEDA

(2006) e REZENDE (2009), dentre outros.

A seguir, serão apresentados alguns modelos clássicos, em função do estado de tensão, que expressam o comportamento resiliente de solos e que podem ser encontrados nas citações supracitadas.

DUNCAN ET AL (1968) apresentaram as seguintes equações:

a) materiais granulares:

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (7)$$

onde: k_1 e k_2 : coeficientes de ajuste obtidos experimentalmente e são apropriados para cada tipo de material granular que se utiliza; σ_3 : tensão confinante.

b) solos de granulometria fina:

$$M_R = K_2 + K_3 \left[K_1 - (\sigma_1 - \sigma_3) \right], \text{ para } K_1 > (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (8)$$

$$M_R = K_2 + K_4 \left[(\sigma_1 - \sigma_3) - K_1 \right], \text{ para } K_1 < (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (9)$$

As Equações 8 e 9 caracterizam o modelo bi-linear sendo os seus coeficientes K_1 , K_2 , K_3 e k_4 obtidos experimentalmente em função dos solos pesquisados.

Dehlen e Monismith (1970) empregaram a Equação 10 para explicar comportamento resiliente de areias e pedregulhos.

$$M_R = K_1 \theta^{k_2} \quad (10)$$

onde: $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (primeiro invariante de tensão), K_1 e K_2 : coeficientes de ajuste obtidos experimentalmente.

SVENSON (1980) empregou a Equação 11 para analisar o comportamento resiliente de solos argilosos oriundos de rodovias federais, DNIT (134/2010 – ME), em seu anexo B, apresenta-se a equação (11).

$$M_R = K_1 \sigma_d^{k_2} \quad (11)$$

onde: σ_d : tensão desvio axial, K_1 e K_2 : são coeficientes de ajuste obtidos

experimentalmente.

Macedo (1996) utilizou a Equação 12, denominada modelo composto, para prever o comportamento resiliente de solos granulares e coesivos. Este modelo, tem demonstrado ser bastante eficaz para expressar o comportamento resiliente de solos de diferentes granulometrias, empregados em pavimentos rodoviário brasileiros, conforme enfatizam Takeda (2006) e Rezende (2009).

$$M_R = K_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_3^{k_3} \quad (12)$$

Em que: σ_d : tensão desvio axial, σ_3 : tensão confinante, K_1 , K_2 e K_3 : coeficientes de ajuste obtidos experimentalmente.

2.8 Ensaios de caracterização química e mineralógica e pH

Através dos ensaios de caracterização química e mineralógica são conhecidas as unidades que constituem as rochas definidas como sólidos homogêneos naturais com arranjo atômico ordenado e composição química definida. O arranjo cristalino característico de cada espécie mineral se apresenta em quantidades definidas e proporcionais de determinados elementos químicos. Quanto a classificação química, as espécies minerais subdividem-se em conjuntos de acordo com a ordem de interesse, tais como:

- Elementos nativos: ocorrência de elementos sob forma não combinada (ouro – Au);
- Sulfetos: combinação de elementos metálicos e enxofre (pirita – FeS₂);
- Óxidos: contém um ou mais elementos metálicos em combinação com oxigênio;
- Hidróxidos: são óxidos combinados com água ou hidroxila (OH⁻), neste grupo encontram-se: hematita (Fe₂O₃), pirolusita (MnO₂), magnetita (Fe₃O₄), goethita [FeO(OH)], gibbsita [Al(OH)₃];
- Carbonatos: contém em sua formulação o radical carbonato (CO₃²⁻) – calcita (CaCO₃), dolomita [Ca, Mg (CO₃)₂];
- Silicatos: representam 95 % dos minerais petrográficos, cuja composição química combina sílica (Si) e oxigênio (O) dentre outros elementos. O quartzo (SiO₂) é um dos minerais silicatados mais comuns nas rochas e por sua resistência ao

intemperismo, está contido na fração areia do solo, caracteriza-se pela falta de capacidade de absorção de bases, má retenção de água e pobreza em elementos nutrientes.

Os minerais sintetizados por intemperismo são denominados secundários e fazem parte do grupo de minerais de argila que se dividem em argilominerais (caulinita, montmorilonita, illita- de coloração branca) e óxidos de ferro (hematita – cor vermelha, goethita – cor amarela) e óxidos de alumínio (gibbsita – cor branca). A estrutura da caulinita possui ligações tipo ponte de hidrogênio (argilominerais não expansivos) ligações estas inexistentes na montmorilonita (argilominerais expansivos). Os óxidos de ferro tem origem na oxidação do ferro presente na estrutura dos silicatos (olivinas, piroxênios, biotita) das rochas ou podem ser herdados das rochas sedimentares ou metamórficas, como é o caso da hematita do itabirito. Quanto aos óxidos de alumínio destaca-se a gibbsita. As argilas silicatadas possuem forma laminar, os óxidos de Ferro e de alumínio apresentam forma relativamente granular ou equidimensional. Resulta que estes últimos atuam como agentes desorganizadores do arranjo paralelo e de máximo contato mútuo das partículas laminares dos solos. A presença dos hidróxidos de ferro e alumínio como agentes desorganizadores no solo provocam a diminuição das forças de coesão e adesão diminuindo o encrostamento, a plasticidade, a pegajosidade e a dureza do solo e acarretam aumento da capacidade de drenagem.

2.8.2 Difratomia por raio X

Método de identificação da estrutura cristalina ou molecular da amostra de solo, através da incidência de feixes de raio-X difratados sobre uma placa fotográfica. Utiliza-se da propriedade das ondas eletromagnéticas de se inclinarem ao atravessar espaços entre partículas. O ajuste entre as dimensões físicas dessas aberturas e o comprimento de onda, ou composição mineralógica, revela as posições dos cristais, sua estrutura e intensidade. Conclui-se então, correlacionando-se com padrões constituídos, sobre a presença de determinado mineral na amostra em estudo. A difratometria de raios-X é a mais poderosa ferramenta para estudo de minerais do solo, particularmente aqueles presentes na fração argila, Resende et al. (2005).

2.8.3 Espectrometria por emissão óptica

Determina-se através da técnica analítica para análises quantitativas de metais, a composição elementar de uma amostra pelo seu espectro de massa ou espectro eletromagnético. Utiliza-se neste trabalho a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado, ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry*). Efetua-se a preparação da amostra em digestão tri-ácida completa utilizando-se consecutivamente: HNO₃ (ácido nítrico), HCl (ácido clorídrico), HF (ácido fluorídrico), para abertura ou ataque ácido à sua matriz sólida. A atomização completa da amostra é obtida em fonte de plasma. As intensidades das luzes emitidas pelos elementos atomizados (átomos livres excitados) são medidas e depois comparadas com intensidades de soluções padrões. Apresenta-se na Figura 2.17 modelo esquemático de um espectroscópio de emissão óptica com plasma

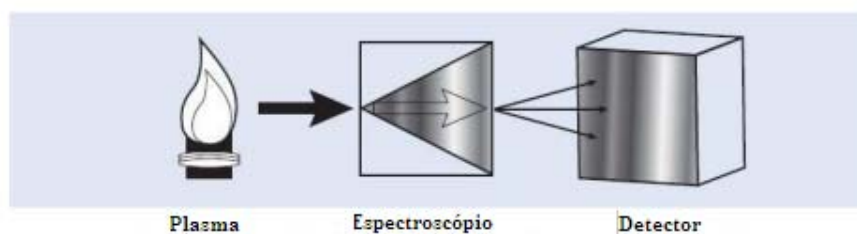


Figura 2.17: Esquema de um espectroscópio de emissão óptica com plasma.

Fonte: PERKIN ELMER (2009)

2.8.4 Análise do pH:

O objetivo deste ensaio é a determinação potenciométrica do pH do solo em água e em solução normal de cloreto de potássio. Indica a presença, quando ácido, de contribuintes tais como matéria orgânica, aluminossilicatos das frações finas, sesquióxidos e a lixiviação de certos sais solúveis. Também afeta a solubilidade de vários elementos, tais como o ferro e alumínio. A Figura 2.18 apresenta a classificação dos solos em função do pH segundo Guimarães et al (1971), modificado por Pessoa (2004).

pH	Classificação
pH > 8	<i>fortemente alcalino</i>
7,4 < pH < 8,0	<i>alcalino</i>
6,6 < pH < 7,3	<i>Neutro</i>
6,0 < pH < 6,5	<i>levemente ácido</i>
5,5 < pH < 5,9	<i>moderadamente ácido</i>
4,5 < pH < 5,4	<i>ácido</i>
4,3 < pH < 4,4	<i>fortemente ácido</i>
pH < 4,3	<i>extremamente ácido</i>

Figura 2.18: Classificação dos solos em função do pH

Fonte: Pessoa (2004).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, citam-se 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 Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil e no laboratório do Departamento de Solos da UFV. A pesquisa abrangeu a realização de ensaios de caracterização geotécnica, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR), triaxial de cargas repetidas, resistência à compressão simples; durabilidade por molhagem e secagem; com vistas a utilização dos rejeitos para fins rodoviários. Além destes foram realizados ensaios de caracterização química, mineralógica através de difratometria por raio X; espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado e análise potenciométrica do pH.

3.1 Materiais

3.1.1. Rejeitos de Minério de Ferro

As amostras de solo empregadas nesta pesquisa foram o rejeito de flotação e rejeito de concentração magnética, provenientes da usina de beneficiamento de minério de ferro, Mina Alegria, Mariana – MG, Figuras 3.1 e 3.2

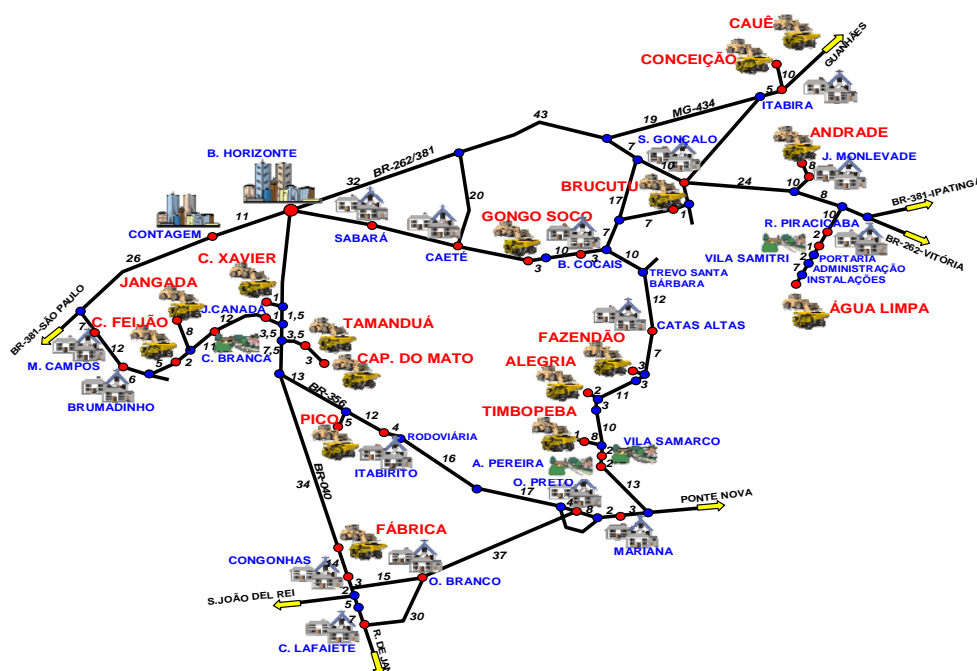


Figura 3.1: Mapa de localização da Mina Alegria, Município de Mariana, MG



Figura 3.2: Complexo Mariana - Mina Alegria.

Os materiais amostrados foram obtidos no processo de beneficiamento ou tratamento do minério. Serão descritos a seguir:

Amostra do Rejeito 1: "doravante denominado de rejeito de flotação", corresponde a separação dos minerais por flotação, representa o *underflow* gerado pelos hidrociclones, conforme Figuras 3.3, 3.4 e 3.5.



Figura 3.3: Adição das aminas necessárias ao processo de flotação.



Figura 3.4: Ponto de amostragem Figura 3.5: Coluna de flotação rejeito de flotação do rejeito de flotação

Amostra do Rejeito 2: doravante denominado de "rejeito de concentração magnética". É o *underflow* do cone desaguador dos rejeitos de concentração magnética, conforme Figuras 3.6 a 3.9.



Figura 3.6: Vista superior do cone desaguador do rejeito de separação magnética



Figura 3.7: Ponto de coleta do rejeito 2

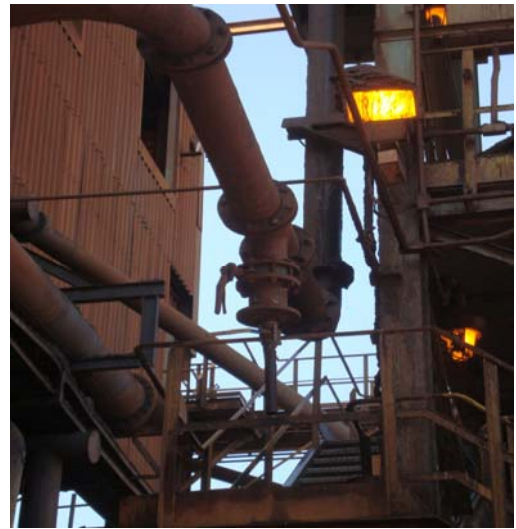


Figura 3.8: Vista inferior do cone desaguador e ponto de amostragem Rejeito 2



Figura 3.9: Vista geral do cone desaguador do rejeito da separação magnética

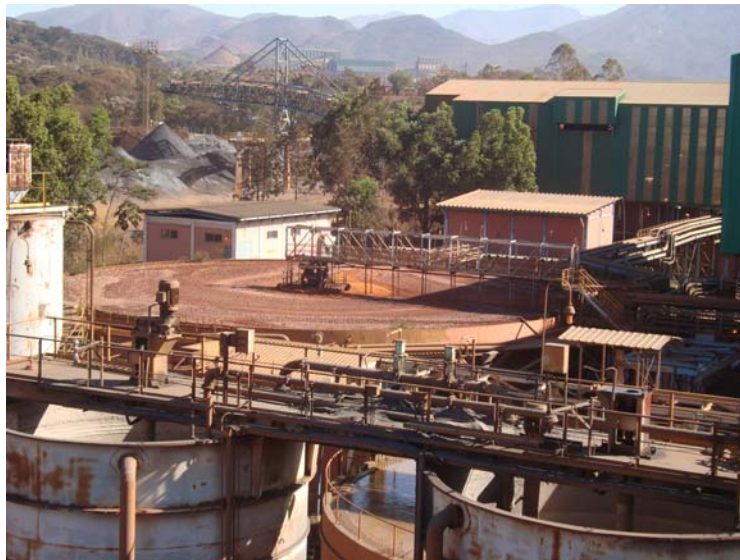


Figura 3.10: Usina vista do ponto de coleta do cone desaguador

A Figura 3.11 ilustra o fluxograma do beneficiamento do minério de ferro com indicação dos pontos de coleta do rejeito da flotação (1) e rejeito da concentração magnética (2), do complexo minerador da Vale – Usina de Alegria localizada no município de Mariana-MG.

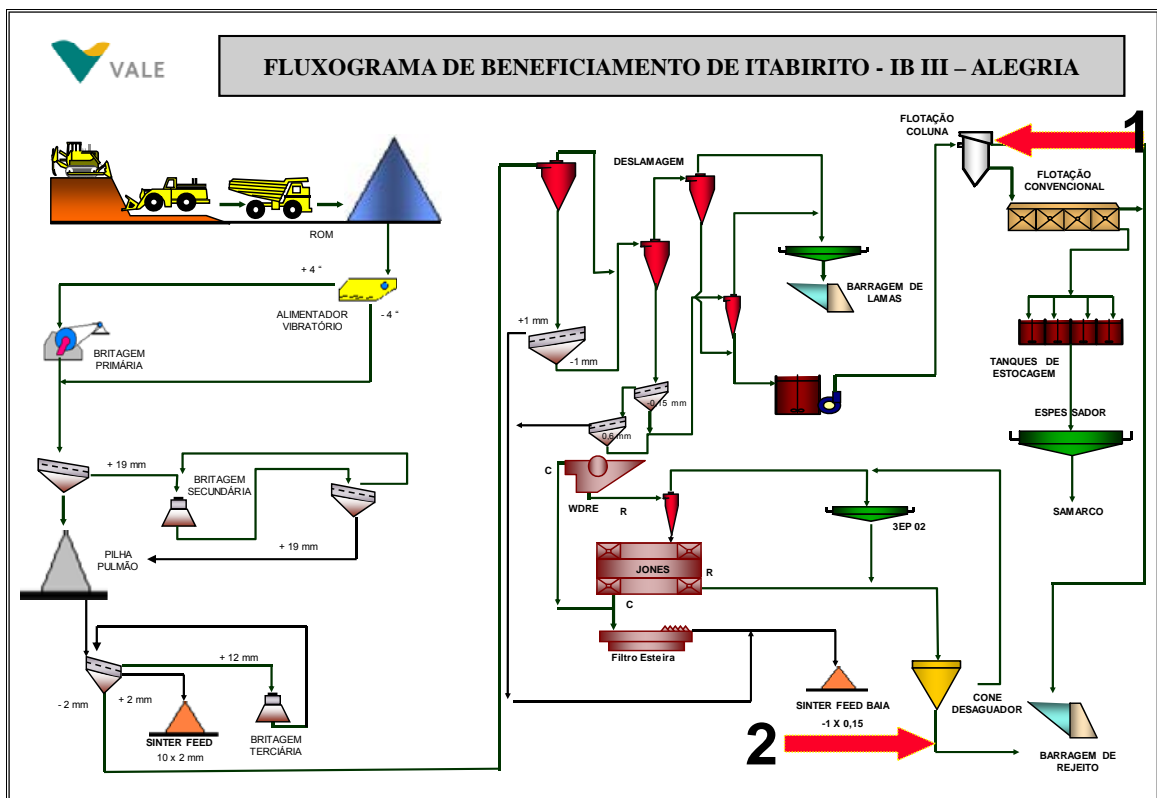


Figura 3.11: Fluxograma do beneficiamento do minério de ferro com indicação dos pontos de coleta dos rejeitos 1 e 2

3.1.2. Cimento

Utilizaram-se nas misturas de rejeito melhorado com cimento, destinadas aos ensaios de resistência à compressão simples e durabilidade por molhagem e secagem, o cimento Portland composto da marca Tupi CP II – E 32 (NBR 11 578). Esse cimento é resultado da mistura homogênea da escória de alto-forno com clínquer e gesso, obtida na moagem conjunta destes três produtos e em diferentes proporções, dando origem aos chamados cimentos de escória metalúrgicos ou siderúrgicos. Os cimentos metalúrgicos apresentam características similares às do cimento Portland tanto mais próximas quanto menor a percentagem de escória. Exigem cura prolongada e úmida e o endurecimento é lento, mas em geral superam a resistência do Portland comum após os 90 dias de idade, PETRUCCI (1978). A opção pela sua utilização nos ensaios, em princípio, deveu-se à disponibilidade do produto no laboratório.

3.2 Metodologias dos ensaios de laboratório

Objetivando cumprir a finalidade desta pesquisa, elaboraram-se os métodos de investigação experimental em laboratório, composto de várias fases, para obtenção de parâmetros geotécnicos característicos dos rejeitos analisados com a finalidade de utilizá-los em pavimentação.

3.2.1. Fase 1: Coleta e preparo das amostras

A coleta ocorreu no período de manutenção da usina de beneficiamento, 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. Após a coleta, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Transportes do Departamento de Engenharia Civil da UFV. Procederam-se então, a secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e armazenamento em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados para a posterior utilização. Realizaram-se a coleta, transporte e o preparo das amostras, de acordo com o especificado na ABNT (1986_a). Apresentam-se alguns registros desta etapa nas imagens da Figura 3.12.



a) Transporte das amostras



b) Chegada das amostras ao Laboratório de Transportes - UFV



c) Detalhe das amostras identificadas



d) Secagem das amostras ao ar



e) Homogeneização das amostras



f) Acondicionamento das amostras em sacos plásticos

Figura 3.12: Transporte, chegada, identificação, secagem ao ar, homogeneização e acondicionamento das amostras

3.2.2. Fase 2: Ensaios de caracterização geotécnica, compactação e CBR

Nesta fase foram realizados os ensaios de caracterização geotécnica das amostras dos rejeitos: análise granulométrica, peso específico dos sólidos, limites de liquidez e de plasticidade. Estes ensaios, foram realizados segundo metodologias da ABNT (1984a, 1984b, 1984c e 1984d). Os resultados deles obtidos, subsidiaram a identificação dos rejeitos conforme a *Transportation Research Board* (TRB) e a *Unified Soil Classification System* (USCS).

Em seguida, procederam-se ensaios de compactação e ensaios para a determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR), em duas energias de compactação: Proctor normal e intermediário. As moldagens realizadas por processo dinâmico, utilizaram-se molde do ensaio Proctor, molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro interno e 12,73 cm de altura, segundo metodologia da ABNT (1986b) e ABNT (1987).

As curvas de compactação serviram para a obtenção dos parâmetros teor de umidade ótima (w_{ot}) e o peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}), para preparação dos ensaios de CBR (*California Bearing Ratio*), resistência à compressão simples (RCS), durabilidade por molhagem e secagem e triaxiais de cargas repetidas.

3.2.3. Fase 3: Moldagem dos corpos de prova

Moldaram-se corpos de prova em moldes cilíndricos, nas dimensões relativas ao ensaio respectivo, compactados por método dinâmico, no teor de umidade ótima (w_{ot}) e peso específico seco máximo (γ_{dmax}). As tolerâncias fixadas para aceitação dos corpos de prova foram as seguintes: teor de umidade de moldagem no intervalo de $\pm 0,3\%$ em relação ao teor de umidade ótima (w_{ot}), altura das amostras com desvio $\pm 0,5$ mm e grau de compactação na faixa de $100 \pm 1,0\%$.

Para os ensaios elaborados para rejeito melhorados com cimento aplicaram-se nesta fase a metodologia de ensaio recomendada pelo DNIT, DNER-ME 202/94 – Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos, com adaptações necessárias à condição de solos melhorados com cimento que serão observadas nos ensaios de resistência à compressão simples e durabilidade por molhagem e secagem.

3.2.4. Fase 4: Ensaios de resistência à compressão simples dos rejeitos melhorados com cimento.

A execução destes ensaios foi resultado de adaptações da NBR 12025/90 – Solo-cimento-Ensaio de Compressão Simples, aplicando-as aos rejeitos melhorados com cimento. A etapa de imersão por 4 horas foi suprimida em função da condição dos rejeitos apenas melhorados com cimento, evitando-se ocasionar a perda das amostras. Quanto aos dias de cura pesquisaram-se as resistências também aos 3 dias teve a finalidade da observação do comportamento das misturas dos rejeitos em prazos emergências de campo. Realizaram-se então misturas de rejeitos de minério de ferro melhorados com cimento Portland, Tupi – CPII – E-32, nos teores 2, 3, 4 e 5 %, em relação à massa seca do material. Em função dos parâmetros (w_{ot} e γ_{dmax}), obtidos no ensaio de compactação na energia intermediária, moldaram-se os corpos de prova, utilizando-se um cilindro metálico de $\phi = 5,0$ cm e altura de 10,0 cm, onde as misturas foram compactadas em 3 camadas. Após a moldagem as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas, separadas em bandejas e levadas para cura em câmara úmida por períodos de 3, 7 e 28 dias.

Foram ensaiados 4 corpos de prova para cada teor de cimento e tempo de cura, totalizando 98 corpos de prova para os dois rejeitos. O tempo entre a mistura e a moldagem foi limitado em 1 hora e elaboraram-se planejamento para o cumprir a programação dos ensaios conforme Figura 3.13. A experimentação com teores de cimento mínimos em relação à massa seca dos rejeitos foi realizada com a finalidade de obtenção das resistências das tensões de ruptura para os rejeitos somente melhorados com cimento e as possibilidades de redução dos teores nas misturas.

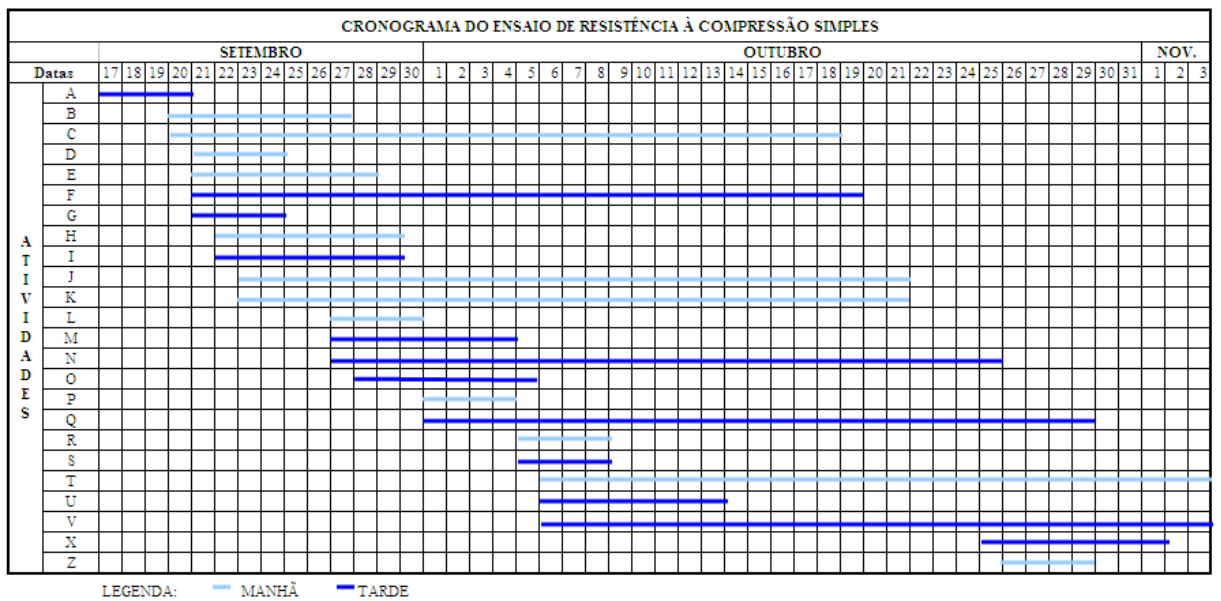


Figura 3.13 : Cronograma do ensaio de resistência à compressão simples

Tabela 3.1: Registros dos ensaios de resistência à compressão simples

Teor de cimento na mistura	Tempo de cura	Rejeito da concentração				Rejeito da flotação			
		Data moldagem	horário	Data ensaio	horário inicial	Data moldagem	horário	Data ensaio	horário inicial
2%	3 dias	17/09/2010	17:00	20/09/2010	17:10	01/10/2010	09:00	04/10/2010	09:03
	7 dias	20/09/2010	09:40	27/09/2010	09:58	27/09/2010	13:40	04/10/2010	13:55
	28 dias	20/09/2010	10:00	18/10/2010	10:18	27/09/2010	15:18	25/10/2010	14:47
3%	3 dias	21/09/2010	08:20	24/09/2010	08:40	05/10/2010	08:22	08/10/2010	08:47
	7 dias	21/09/2010	09:56	28/09/2010	09:31	28/09/2010	14:12	05/10/2010	14:06
	28 dias	20/09/2010	13:22	19/10/2010	14:10	01/10/2010	14:08	29/10/2010	13:52
4%	3 dias	21/09/2010	14:42	24/09/2010	14:23	05/10/2010	10:09	08/10/2010	14:05
	7 dias	22/09/2010	08:45	29/09/2010	08:52	25/10/2010	10:00	01/11/2010	14:08
	28 dias	23/09/2010	09:50	21/10/2010	14:24	06/10/2010	08:45	03/11/2010	08:52
5%	3 dias	27/09/2010	08:20	30/09/2010	09:22	26/10/2010	09:30	29/10/2010	09:53
	7 dias	22/09/2010	13:55	29/09/2010	14:10	06/10/2010	14:00	13/10/2010	14:45
	28 dias	23/09/2010	08:50	21/10/2010	09:08	06/10/2010	10:38	03/11/2010	14:14

Os ensaios foram executados conforme o planejamento, em prensa triaxial, na velocidade de 0,15 mm/s. Para os corpos de prova da mistura de flotação no teor de 4 % de cimento aos 3 dias de cura foi feito o nivelamento do topo e base usando o capeamento com enxofre, para assegurar a aplicação axial das cargas, Figura 3.14.



Figura 3.14: Registros dos ensaios de resistência à compressão simples

Figura 3.15: Detalhe da prensa triaxial

3.2.5. Fase 5: Ensaios de durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento

Utilizaram-se misturas com cimento nos teores de cimento de 2, 3, 4 e 5%, em relação à massa seca do material, nas condições ótimas da curva de compactação do Proctor intermediário, efetuaram-se cura em câmara úmida aos 7 dias. Foram submetidos a imersão durante 5 horas após o período de cura e todas as etapas recomendadas pela metodologia. Ensaíram-se 3 corpos de prova para cada teor de cimento e para cada amostra de rejeito, totalizando 24 amostras. Esses ensaios tiveram a duração aproximada de 60 dias. A metodologia utilizada foi a recomendada pelo DNIT conforme DNER (1994). Os teores de cimento em relação à massa seca dos rejeitos foram relativos à condição de rejeitos melhorados com cimento em adaptação a metodologia recomendada pelo DNIT, para observação dos comportamentos nas condições expostas.

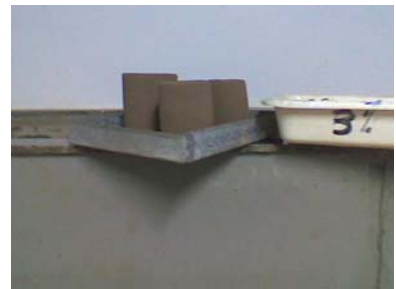
Apresentam-se na Figura 3.16: Ciclos do ensaio de durabilidade dos rejeitos da concentração melhorados com cimento e na Figura 3.17 Ciclos do ensaio de durabilidade dos rejeitos da flotação melhorados com cimento



a) Estufa: 42 horas a 71°C

b) Retirar para ensaio

c) Aferição: volume e massa



d) Escovação

d) Após escovação

e) Para imersão



f) Imersão durante 5 horas

g) Retirada: excesso de umidade

h) Aferição: volume e massa

Figura 3.16: Ciclos do ensaio de durabilidade do rejeito da concentração melhorado com cimento



a) Rejeitos após cura 7 dias em câmara úmida

b) Rejeitos após cura 7 dias em câmara úmida

c) Imersão durante 5 horas



d) Retirados 42 horas à 71°C

d) Aferição: volume e massa

e) Após escovação



f) Pós-imersão em 5 horas

g) Rejeitos aferidos em massa e volume

h) Acondicionados para estufa

Figura 3. 17 Ciclos do ensaio de durabilidade do rejeito da flotação melhorado com cimento

3.2.6. Fase 7: Ensaios triaxiais de carregamentos repetidos para a determinação dos módulos de resiliência dos rejeitos analisados sem misturas

Utilizou-se a AASHTO (1999) relativa a ensaios triaxiais dinâmicos, valendo-se dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização e classificação TRB – AASHTO.

Os ensaios realizados nesta fase seguiram o método de ensaio AASHTO T 307-99, que recomenda o uso de processos estáticos ou vibratórios de compactação para o preparo das amostras, e dimensões com razão altura/diâmetro igual ou maior que dois. Na aplicação de cargas, o método de ensaio sugere o uso de equipamentos hidráulicos ou pneumáticos. Recomenda-se ainda o emprego dos transdutores de deslocamento (*LVDT*) externos à câmara triaxial. A frequência do ciclo de carregamento foi 1 Hz e a duração do tempo de aplicação de cargas foi de 0,1 s. Apresentam-se na Figura 3.18 o equipamento utilizado para a realização dos ensaios.

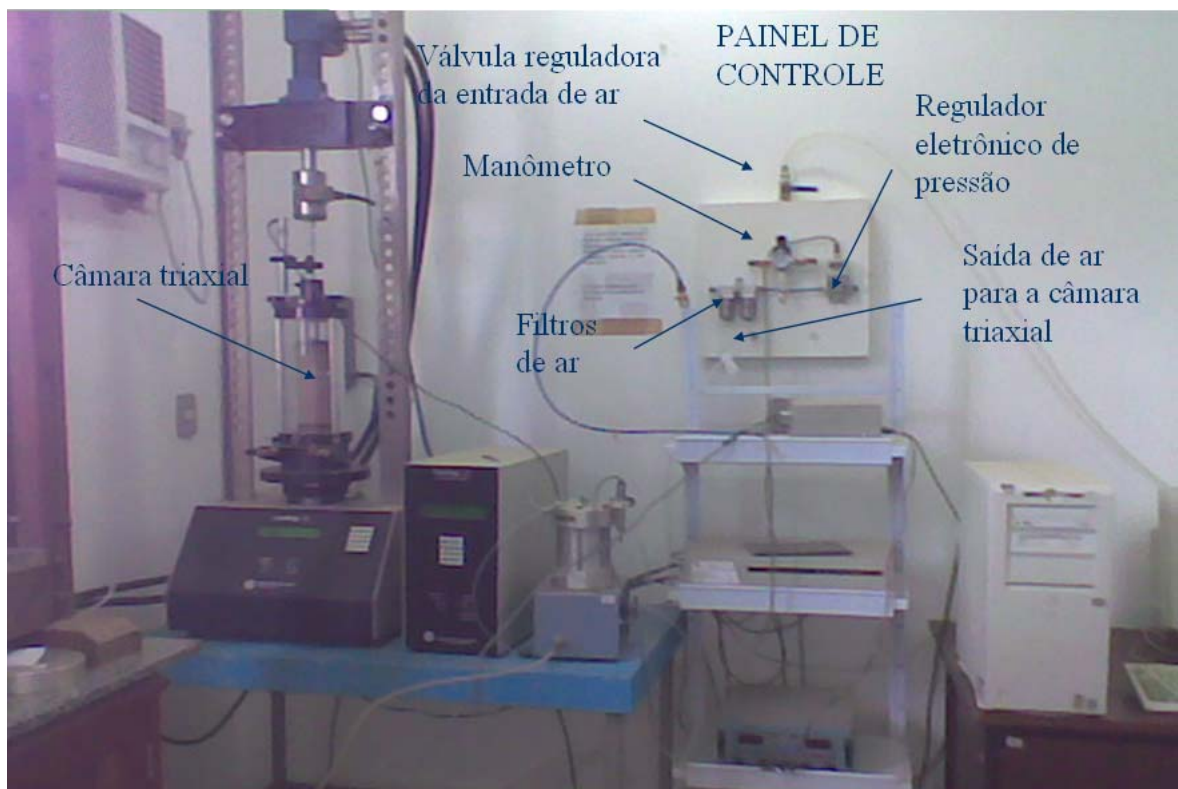


Figura 3.18: Equipamento triaxial dinâmico do laboratório de transportes da UFV

O sistema *LoadTrac II* é totalmente automatizado, posiciona-se o corpo de prova na base da prensa, selecionam-se as condições do teste e o sistema realiza as etapas do ensaio sem

interferências do operador. Os dados do teste são gravados em arquivo e disponibilizados em *software* específico após a realização do ensaio. O sistema consiste de prensa *LoadTrac II*, conjunto atuador hidráulico e cilíndrico hidráulico, servo-válvula, regulador pneumático para controle do confinamento da amostra e computador, *software* de controle e aquisição de dados. O controlador instalado na CPU faz as leituras de força e deslocamentos para controlar os passos do motor. Os cuidados na moldagem e acondicionamento da amostra na câmara triaxial são importantes para integridade dos resultados.

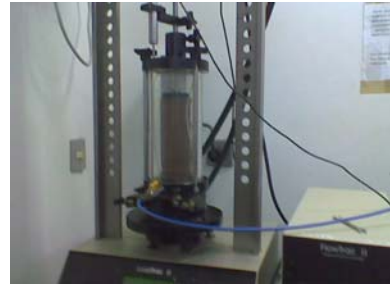
Etapas da execução do ensaio triaxial de cargas repetidas

- o corpo de prova foi montado, entre duas pedras porosas e papel filtro, na base da câmara triaxial;
- colocou-se o cabeçote e envolveu-se as amostras com uma membrana de látex;
- alinhou-se os corpos de prova com o cabeçote garantindo a aplicação axial da carga;
- fechou-se a câmara triaxial;
- posicionou-se o transdutor de deslocamentos tipo LVDT e conectou-se os tubos pressurizados com ar à câmara triaxial;
- posicionou-se a câmara triaxial no equipamento de forma a garantir o melhor ajuste entre a extremidade do atuador onde se encontrava a célula de carga com a haste da câmara triaxial;
- iniciou-se a fase de acondicionamento da amostra aplicando-se a seqüência de carregamentos aos corpos de prova, com a finalidade de eliminar as deformações permanentes mais significativas, que ocorreram nas primeiras aplicações das tensões desviadoras, garantindo melhor contato entre o cabeçote e o topo da amostra. Esta fase, não necessitou de registro das tensões e deformações para determinação do módulo de resiliência;
- registraram-se as tensões e deformações de acordo com a norma utilizada, através de *software* de controle especificamente escrito para esta modalidade de ensaio. Ao término do ensaio, o programa gerou diversos modelos de previsão do comportamento resiliente dos materiais ensaiados.

Na Figura 3.19 apresentam-se a seqüência típica do ensaio triaxial de cargas repetidas.



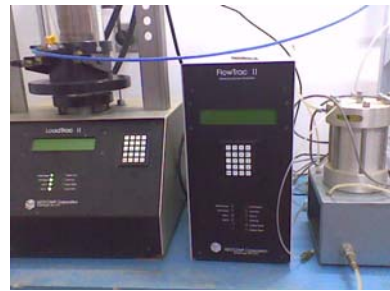
a) Acondicionamento da amostra na câmara triaxial



b) Aplicação da tensão confinante



d) Vista geral do equipamento com amostra



e) Detalhes do *LoadTrac II* e *FlowTrac II* e aplicação da tensão confinante



f) Amostra retirada da câmara triaxial e da membrana de borracha



g) Amostra após o ensaio

Figura 3.19: Sequência típica do ensaio triaxial de cargas repetidas

3.2.7. Fase 8: Caracterização química e mineralógica

As amostras dos rejeitos de minério de ferro 1 e 2 foram ensaiadas no laboratório do Departamento de Solos da UFV, onde foram realizados os seguintes ensaios:

- **Difratometria:** foi realizada em lâmina fina da fração areia do minério, em difratômetro de raios-X SIEMENS equipado com tubo de Cobalto;
- **Análise química:** foi realizada em ICP-EOS (PERKIN ELMER 3300) em extrato de digestão ácida total (HF, HNO₃, HCl) sob aquecimento e pressão em digestor de micro-ondas;
- **Análise do pH:** em água 1:2,5 (minério:água) - 10 ml minério para 25 ml de água destilada, agitado durante 15min e deixado em repouso por 30 min, para a leitura efetuada em peagâmetro calibrado.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Serão apresentados neste capítulo os resultados dos seguintes ensaios: caracterização geotécnica, compactação, índice de suporte Califórnia, resistência à compressão não confinada, durabilidade por molhagem e secagem, módulo de resiliência e análises química e mineralógica. Também, os modelos de previsão do comportamento resiliente dos rejeitos de minério de ferro pesquisados neste trabalho

4.1 Ensaios de caracterização geotécnica dos rejeitos analisados

Na Tabela 4.1, encontram-se os resultados do ensaio de granulometria conjunta, limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) e peso específicos dos sólidos. Também, o valor do índice de plasticidade e a classificação dos rejeitos de minério de ferro, segundo a metodologia TRB.

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios geotécnicos e da classificação das amostras dos rejeitos segundo os Sistemas USCS e TRB

Amostra	rejeito de flotação	rejeito de concentração
Argila (% < 0,002 mm)	2	3
Silte ($0,002 \leq \% < 0,06\text{mm}$)	39	7
Areia ($0,06 \leq \% < 2 \text{ mm}$)	59	90
LL (%)	15	NL
LP (%)	10	NP
IP (%)	5	NP
Peso específico dos sólidos (kN/m^3)	31,76	35,58
Classificação TRB	A4	A3
Classificação USCS	SM-ML	SW-ML

As Figuras 4.1 4.2 mostram as curvas granulométricas dos rejeitos de flotação e concentração

- O rejeito da flotação pode ser classificado como uma areia fina siltosa com 51,46 % passante na peneira #200, enquanto que o rejeito da concentração é uma areia com

10,00 % passante na peneira #200.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram as curvas granulométricas dos rejeitos de flotação e concentração.

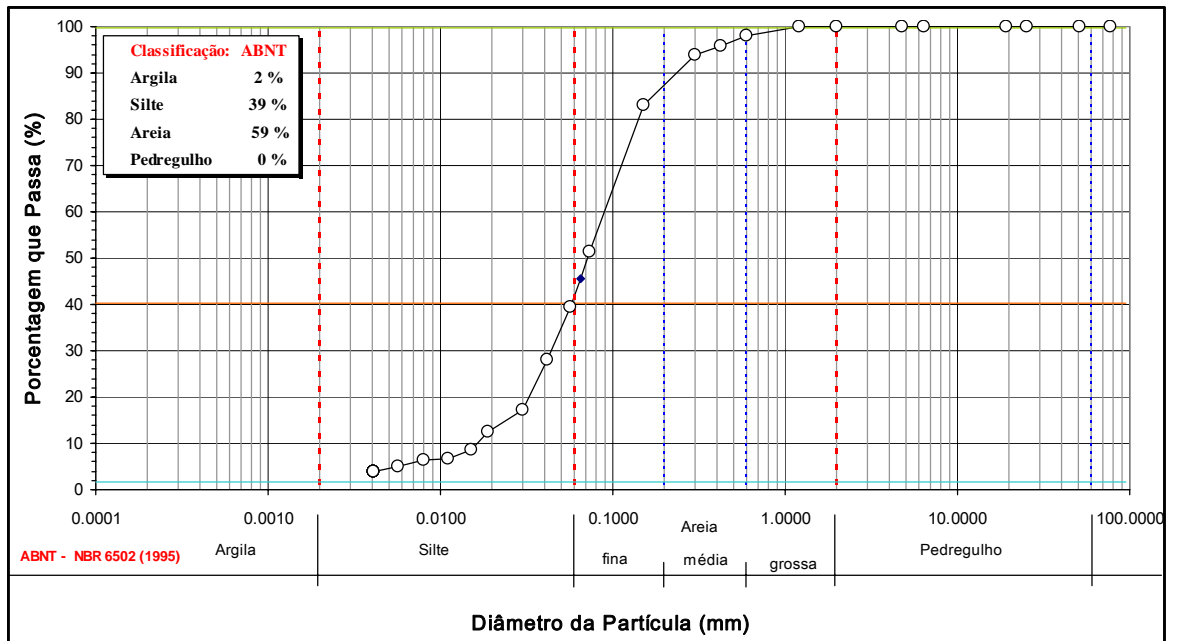


Figura 4.1: Curva granulométrica do rejeito de flotação

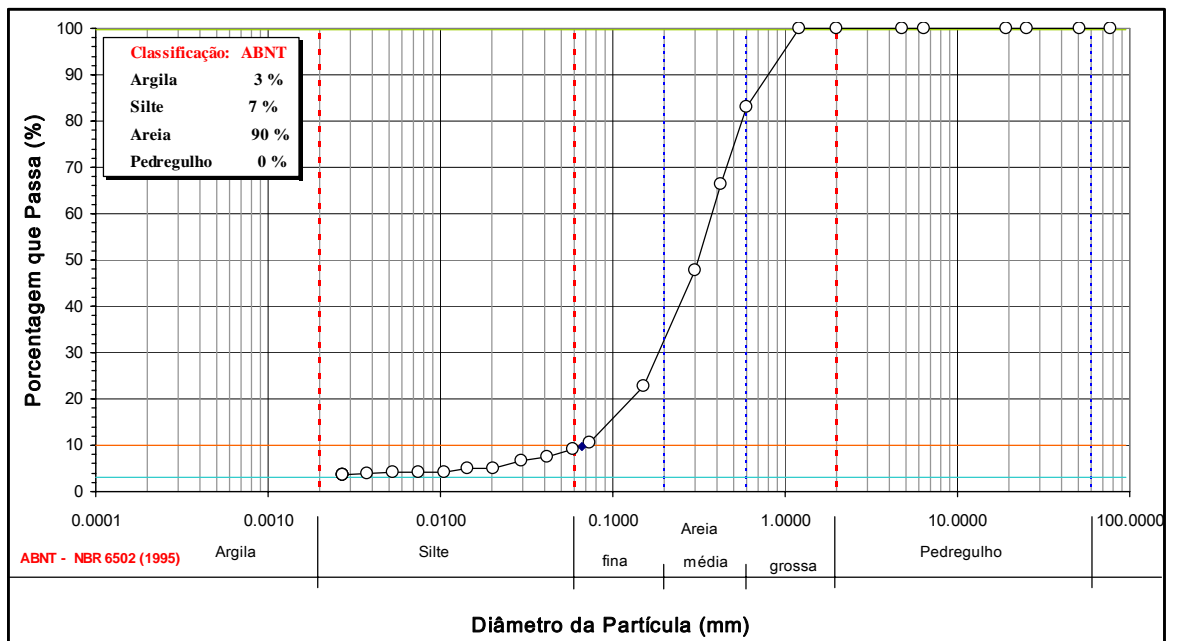


Figura 4.2: Curva granulométrica do rejeito de concentração

- Os dois solos apresentam pesos específicos elevados comparados com as areias quartzosas, em função dos teores de minério de ferro ainda presentes nestes rejeitos de processamento mineral. O IP destes materiais apresentou-se baixo e um deles é não plástico.
- As curvas granulométricas definidas estão contidas nas faixas recomendadas no manual DNIT (2005) – pavimentos rígidos - para utilização em subbase de solo melhorado com cimento e também para solo cimento. Ainda o rejeito de concentração apresenta faixa granulométrica correspondente a recomendação de solo para ser utilizado em sub-bases granulares de pavimento de concreto na faixa F (DNIT, 2005).

4.2 Ensaios de compactação e CBR

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os parâmetros de compactação (teor ótimo de umidade e peso específico aparente seco máximo - $\gamma_{d\max}$), índice de suporte Califórnia (CBR) e expansão_{CBR} (%) dos dois rejeitos em estudo, para as energias de compactação do Proctor Normal e Intermediário.

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de compactação e CBR : energia normal

Amostra	w_{ot} (%)	$\gamma_{d\max}$ (kN/m ³)	CBR (%)	Expansão _{CBR} (%)
Rejeito da flotação	9,20	21,81	23,46	0,02
Rejeito da concentração	12,24	18,23	7,07	1,53

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de compactação e CBR: energia intermediária

Amostra	w_{ot} (%)	$\gamma_{d\max}$ (kN/m ³)	CBR (%)	Expansão _{CBR} (%)
Rejeito da flotação	9,26	22,32	40,83	0,02
Rejeito da concentração	11,41	18,78	22,93	0,01

- Observam-se que o rejeito da concentração apresentou acréscimo do peso específico seco máximo e redução do teor ótimo de umidade. Porém, para o rejeito da flotação compactado nas energias normal e intermediária, os teores ótimos de

umidade e peso específico seco máximo, apresentam valores maiores, com variação pouco significativa do teor de umidade. O fato provavelmente decorre da redução da permeabilidade pelo aumento da energia de compactação na presença de finos não coesivos.

- A Expansão $_{CBR(\%)}$ manteve-se constante para o rejeito da flotação nas duas energias e para o da concentração observou-se redução significativa com o aumento da energia. Todavia, o rejeito da flotação nas duas energias apresentou caráter não expansivo Também o rejeito da concentração apresentou-se não expansivo na energia intermediária. Para o rejeito da concentração pode-se considerar a influência da energia de compactação quanto a expansibilidade conforme resultado obtido no Proctor normal.
- Nota-se que o rejeito de flotação apesar de ser um material de granulometria mais fina apresenta um CBR bem superior ao rejeito de concentração. Tal comportamento pode ser explicado pela presença de alguma fração mais fina que resulta em maiores densidades tanto na energia normal quanto na intermediária, além do fato de conceder uma certa "coesão" ao solo resultante. Já o rejeito de concentração é tipicamente uma areia sem nenhuma coesão e de granulometria bastante uniforme.
- De acordo com o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis (DNER, 1981), proposto pelo Eng. Murilo Lopes de Souza, e com base nos resultados dos ensaios CBR na energia intermediária (Tabela 4.4), esses rejeitos poderiam ser utilizados até em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.
- Observa-se ainda que o CBR do rejeito de flotação na energia intermediária “sem adição de cimento” equipara-se ao determinado para o CBR de solo melhorado com cimento, aplicável em sub-base de pavimentos rígidos, conforme DNIT (2005) DNIT 140/2010 – ES.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as curvas de compactação dos Rejeitos de flotação e de concentração nas energias normal e intermediária.

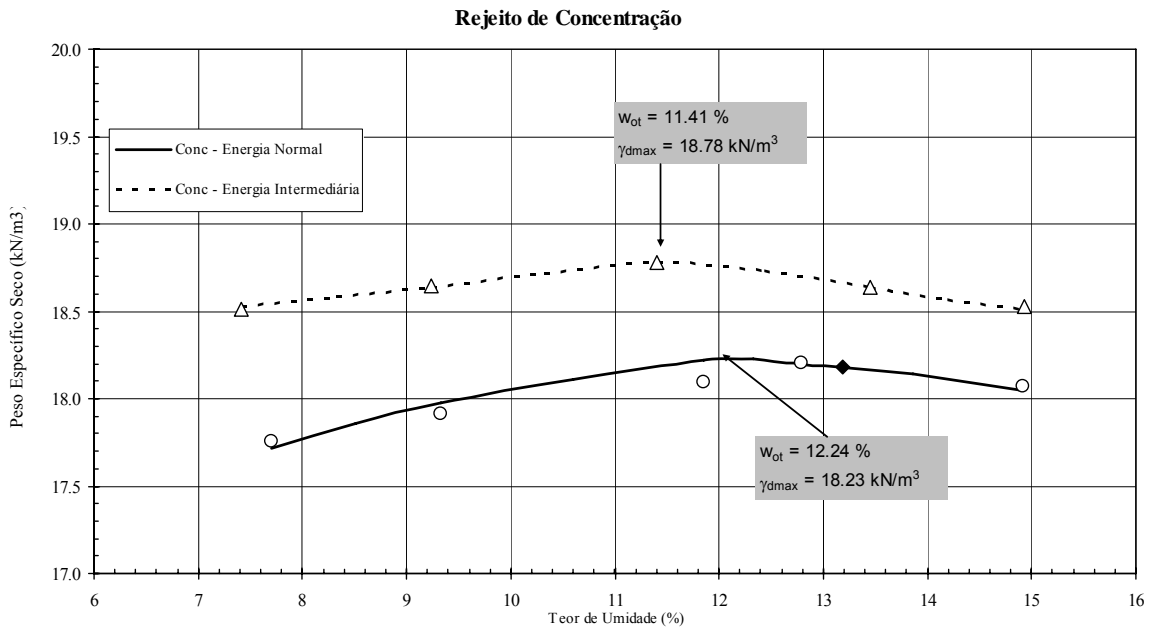


Figura 4.3: Curvas de compactação para o rejeito de concentração

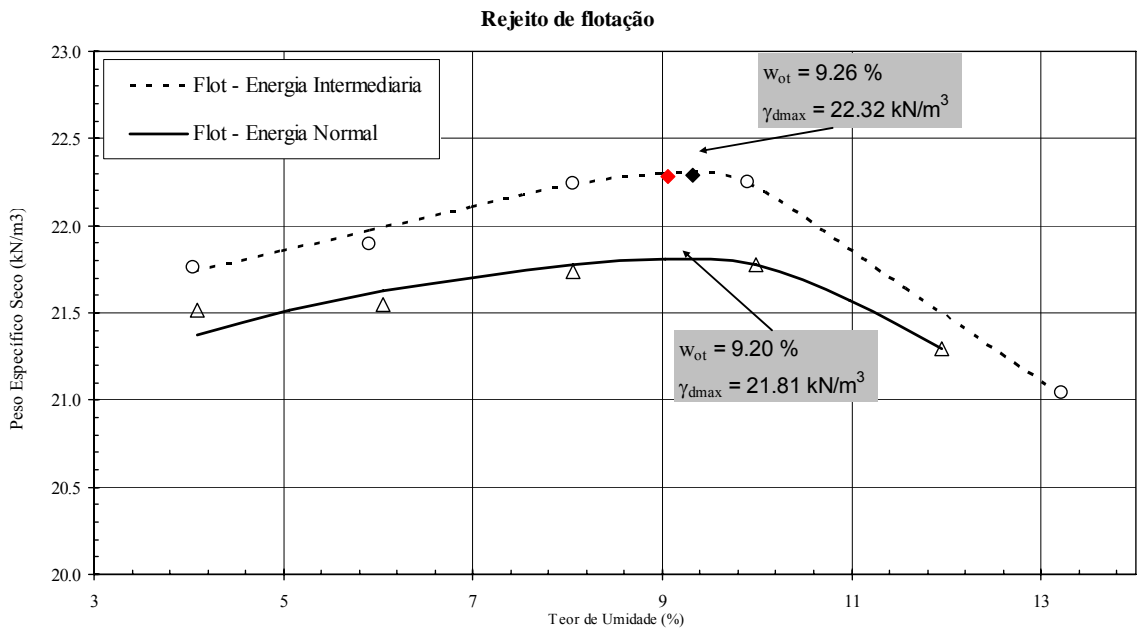


Figura 4.4: Curvas de compactação rejeito de flotação

Tabela 4.4: Comparação dos resultados com parâmetros da Classificação dos solos empregados nos pavimentos (DNIT, 2006)

Classificação dos solos empregados nos pavimentos									
CAMADAS Recomendações DNIT (2006)	Reforço de subleito	Sub-base IG=0				Base LL ≤ 25% LP ≤ 6%			
		CBR (%)	Exp. _(CBR)	CBR	Exp. _(CBR)	IG	CBR	Exp. _(CBR)	LL
	> subleito	≤ 1%	≥ 20%	≤ 1%	O	≥ 80%	≤ 0,5%	≤ 25%	≤ 6%
Flotação (EN)*	23,46	0,02	23,46	0,02	4	23,46	0,02	15%	5%
Flotação (EI)**	40,83	0,02	40,83	0,02		40,83	0,02		
Concentração (EN)*	7,07	1,53	7,07	1,53	0	7,07	1,53	NL	NP
Concentração (EI)**	22,93	0,01	22,93	0,01		22,93	0,01		

* Energia do Proctor Normal

** Energia do Proctor Intermediário

- Senço (2007), correlaciona a classificação dos Índices de Grupo e os seus valores prováveis de CBR. Para o Índice de Grupo A4 esperam-se valores CBR de 4 % a 25 %. A expectativa para o Índice de Grupo A3 sugere valores de CBR da ordem de 15 % a 40 %. Os rejeitos analisados apresentam comportamento inverso conforme resultados contidos na Tabela 4.4.

Os resultados obtidos reportam às considerações de Nogami e Villibor relativamente a padrões estabelecidos como referencial produzidos em ambientes e condições adversas. Tais fatos podem estar associados em razão destes rejeitos serem materiais obtidos artificialmente em processos de britagem e beneficiamento além de terem pesos específicos elevados.

4.3 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento

Os rejeitos de flotação e de concentração apresentaram significativas perdas de massa nos ensaios de durabilidade por secagem e molhagem conforme resultados mostrados resumidamente na Tabela 4.5. Após os 12 ciclos de secagem e molhagem, o rejeito da concentração apresentou uma perda de massa quase total para o teor de cimento de 2 % e de 41.5 % para o teor de cimento de 5 %, enquanto que a mistura de rejeito da flotação e

cimento apresentou uma perda de 56 % para o teor de 2 % de cimento e de 19.5 % para o teor de 5 % de cimento. Nos dois casos as perdas de massa foram excessivas.

Tabela 4.5: Perdas de massa nos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento nos teores indicados

Teores de cimento das amostras de rejeito	Perdas de massa nos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem (%)	
	Rejeito da flotação	Rejeito da concentração
2 %	56.0	98
3 %	36.5	70.5
4 %	27.0	52.5
5 %	19.5	41.5

- Observam-se que as perdas de massa, relativas aos mesmos teores da mistura, significam para o rejeito da concentração percentuais da ordem de 43% a 53 % a mais do que as obtidas para o rejeito da flotação.
- Comparando-se ainda, para rejeito da flotação acréscimo de 1 % no teor de cimento na mistura ocasionou de 26% a 35 % a menos de perda de massa. As variações para o rejeito da concentração magnética foram de 21% a 28% nos incrementos de 1% de cimento utilizados. Esse comportamento reitera as considerações feitas quanto aos resultados obtidos para o ensaio CBR. Evidenciam-se esses percentuais no gráfico da Figura 4.5.
- Para os teores de cimento utilizados nos rejeitos melhorados com cimento e na energia de compactação intermediária, não foram atingidos os limites de aceitação para o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. O melhor resultado obtido deveu-se ao rejeito da flotação melhorado no teor de 5 % de cimento em relação à massa seca do material que apresentou perda de massa igual a 19 %. Entretanto, observaram-se ganhos significativos de resistência mecânica para os acréscimos percentuais de 1 % de cimento.
- Todas as amostras ensaiadas apresentaram perdas significativas de massa após os ciclos de molhagem, secagem e escovação.

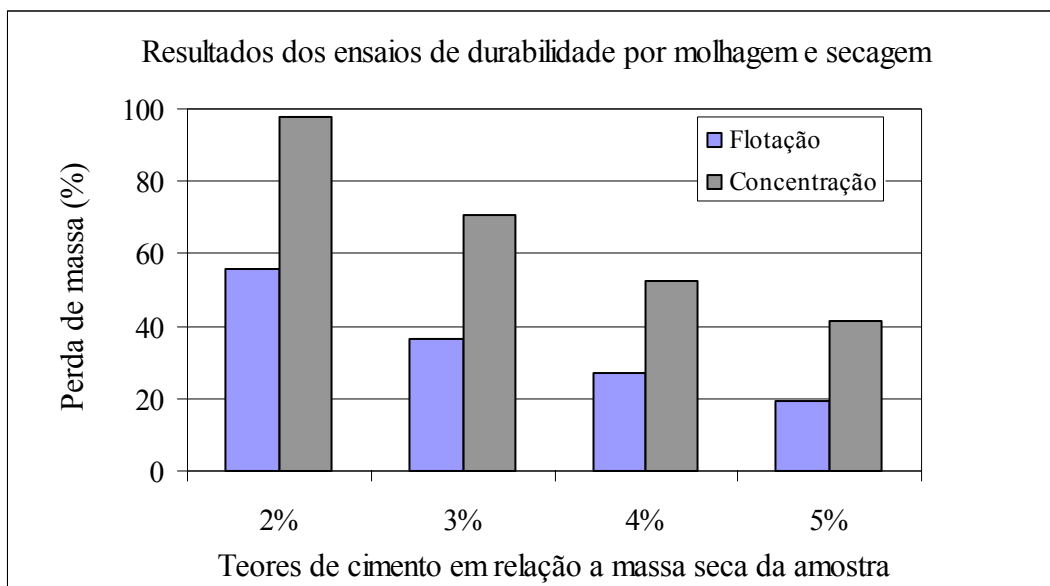


Figura 4.5: Resultados dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento

Nas figuras 4.6 e 4.7 apresentam-se imagens dos rejeitos da flotação e concentração melhorados com cimento após os 12 ciclos do ensaio de durabilidade por molhagem, secagem e escovação.

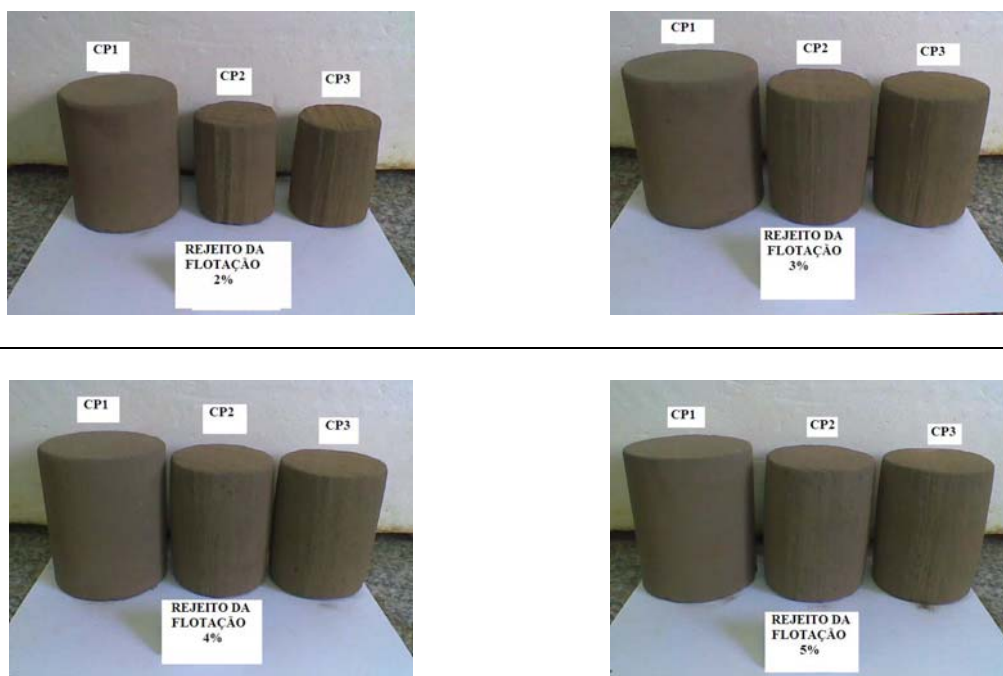


Figura 4.6: Corpos de prova do rejeito da flotação melhorado com cimento após os 12 ciclos de molhagem, secagem e escovação

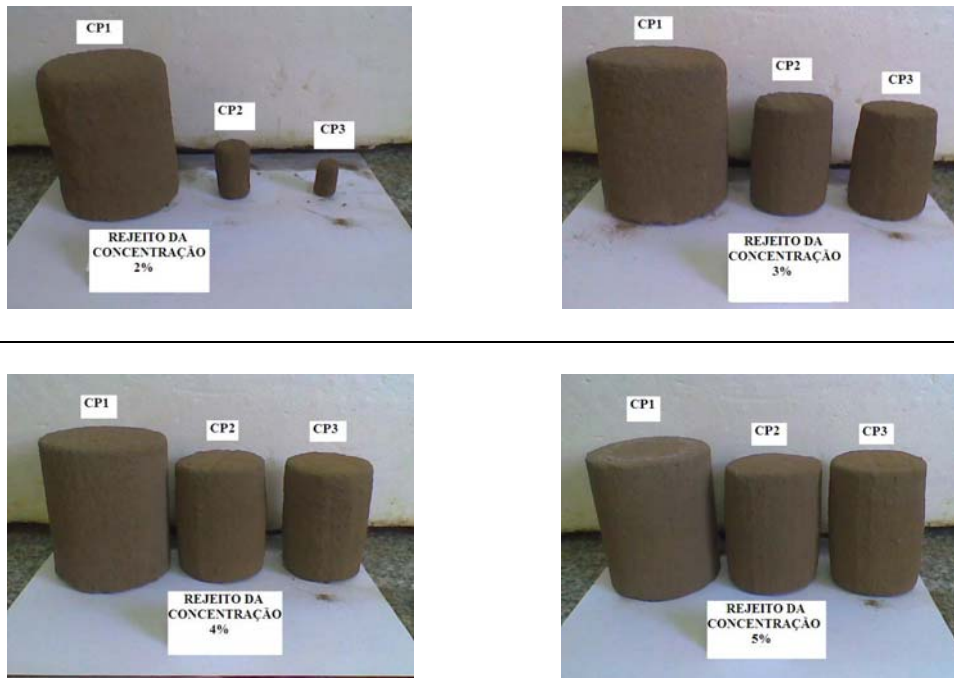


Figura 4.7: Corpos de prova dos rejeitos da concentração melhorados com cimento após os 12 ciclos de molhagem, secagem e escovação

4.4 Ensaio de compressão simples dos rejeitos melhorados com cimento

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) ou resistência à compressão não confinada (RCNC) para os corpos de prova dos rejeitos da flotação e rejeito da concentração melhorados com cimento, nos teores de 2 %, 3 %, 4 % e 5 % para as idades de 3, 7 e 28 dias estão apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram detalhes da montagem e ruptura dos corpos de prova na prensa triaxial, durante o ensaio de resistência à compressão simples



Figura 4.8: Ensaio de resistência à compressão simples do rejeito da flotação melhorado com 2 % de cimento aos 3 dias de cura



Figura 4.9: Ensaio de resistência à compressão simples do rejeito da flotação melhorado com 3 % de cimento aos 7 dias de cura

Nas Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam-se todos os resultados do ensaio de resistência à compressão simples em função da idade de cura dos corpos de prova em câmara úmida.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples dos rejeitos da flotação melhorados com cimento nos teores de 2, 3, 4 e 5%

Idade (dias)	2%		3%		4%		5%	
	RCS (KPa)	ϵ_{axial} (%)	RCS (KPa)	ϵ_{axial} (%)	RCS (KPa)	ϵ_{axial} (%)	RCS (KPa)	ϵ_{axial} (%)
3	370	2,00	491	3,20	527	2,00	1003	2,80
	314	2,20	353	2,00	705	2,98	840	2,20
	282	2,40	401	2,40	-----	-----	779	2,59
	333	2,80	528	3,00	660	2,58	821	2,59
7	519	2,20	657	1,99	798	2,19	1138	2,79
	517	2,39	880	2,40	1042	2,99	946	2,39
	531	1,99	840	2,40	1040	3,38	957	2,39
	529	2,39	690	3,00	949	2,99	1233	2,79
28	854	2,78	1311	3,37	858	1,59	2055	2,00
	817	2,79	1280	3,15	1185	2,18	1621	2,20
	800	2,59	1199	2,99	1037	2,58	2360	2,59
	764	2,39	986	3,15	771	1,99	2033	2,00

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples dos rejeitos da concentração melhorados com cimento nos teores de 2, 3, 4 e 5%

Idade (dias)	2%		3%		4%		5%	
	RCS (KPa)	ϵ_{axial} (%)	RCS (KPa)	ϵ_{axial} (%)	RCS (KPa)	ϵ_{axial} (%)	RCS (KPa)	ϵ_{axial} (%)
3	105	1,59	164	1,80	208	1,60	301	1,80
	97	1,39	110	1,40	215	1,80	345	2,00
	106	1,39	147	1,80	194	2,00	341	1,60
	96	1,39	125	1,40	194	1,80	333	1,80
7	133	1,80	215	2,00	318	1,79	502	2,39
	128	1,59	213	1,80	402	1,79	516	2,40
	144	2,19	190	2,00	423	1,79	500	2,00
	135	1,59	197	1,40	368	1,79	452	1,80
28	218	1,59	425	2,00	721	2,20	964	3,00
	224	1,59	468	2,00	678	2,39	936	3,00
	203	1,59	431	2,00	643	2,19	955	2,80
	203	1,79	407	1,80	717	2,39	756	2,60

Nas Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam-se os resultados do ensaio de resistência à compressão não confinada (RCS), dos rejeitos melhorados com cimento, com valores médios da tensão de ruptura dos 4 corpos de prova e em função das idades de cura em câmara úmida.

Tabela 4.8: Resultados RCS - valores médios em kPa para o rejeito da flotação melhorado com cimento

Tempo de cura	Teor de cimento 2%	ϵ_{axial} (%)	Teor de cimento 3%	ϵ_{axial} (%)	Teor de cimento 4%	ϵ_{axial} (%)	Teor de cimento 5%	ϵ_{axial} (%)
3 dias	324,75	2,35	443,25	2,65	604,25	2,35	860,75	2,55
7 dias	524,00	2,24	766,75	2,45	957,25	2,24	1068,50	2,59
28 dias	808,75	2,64	1194,00	3,17	1319,25	2,64	2017,25	2,20

Tabela 4.9: Resultados RCS - valores médios em (kPa) para o rejeito da concentração melhorado com cimento

Tempo de cura	Teor de cimento 2%	ϵ_{axial} (%)	Teor de cimento 3%	ϵ_{axial} (%)	Teor de cimento 4%	ϵ_{axial} (%)	Teor de cimento 5%	ϵ_{axial} (%)
3 dias	101,00	1,44	136,50	1,60	202,75	1,80	330,00	1,80
7 dias	135,00	1,79	203,75	1,80	377,75	1,79	492,50	2,15
28 dias	212,00	1,64	432,75	1,95	689,75	2,29	902,75	2,85

- na Tabela 4.8 observa-se que o valor médio da RCS aos 7 dias de cura para a mistura no menor teor de cimento (2 %) foi de 524 kPa e para o maior teor utilizado (5 %) a RCS foi de 1068 kPa, portanto uma variação de 51 %.
- para o rejeito da concentração (Tabela 4.9) as variações percentuais relativas aos acréscimos de 1 % nos teores de cimentos das misturas representaram ganhos da ordem de 73 % na RCS, entre os teores mínimo (2 %) e máximo (5 %) de cimento utilizados nas misturas, conforme valores médios relativos aos resultados respectivos de RCS = 135 kPa e RCS = 492 kPa.
- observam-se que apenas nas misturas efetuadas para o rejeito da flotação obtiveram-se melhor resultado apresentando RCS média aos 7 dias de 1068 kPa, para o teor de 5 % de cimento na mistura e na energia de compactação intermediária.

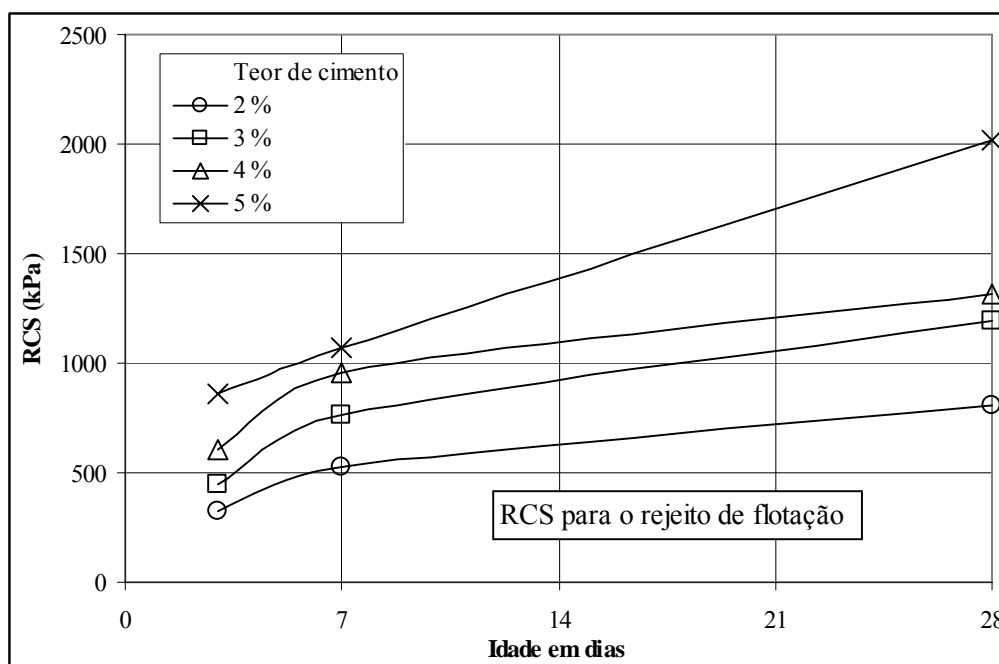


Figura 4.10: Evolução da RCS para as misturas do rejeito de flotação melhorado com cimento

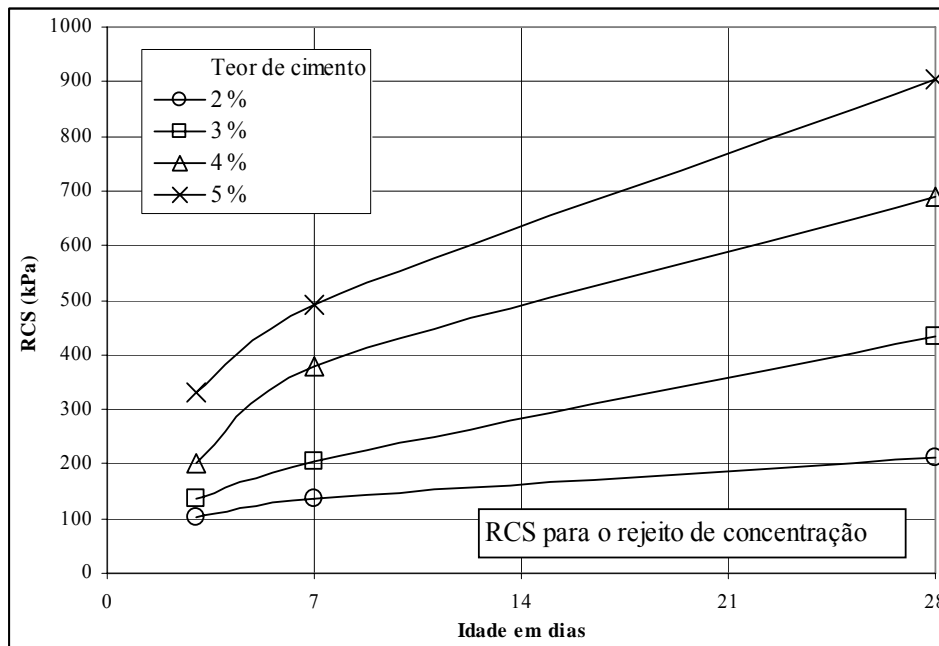


Figura 4.11: Evolução da RCS das misturas do rejeito da concentração melhorado com cimento

- o rejeito da flotação apresentou acréscimos médios da RCS em relação aos teores de cimento na mistura e ao tempo de cura, com resultados mais significativos de variação aos 28 dias para o teor de 5% conforme apresentado na Figura 4.10
- o comportamento do rejeito da concentração em relação aos teores de cimento na mistura e tempo de cura apresentam variações crescentes enfatizando-se a RCS aos 28 dias para o teor de cimento de 5 % na mistura, conforme apresentado na Figura 4.11.
- Quanto aos resultados obtidos comparando-se os dois rejeitos verificam-se melhor resposta a resistência à compressão simples (RCS) para o rejeito da flotação que supera em 55 % os valores apurados aos 28 dias de cura resultantes dos ensaios do rejeito da flotação.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os gráficos relativos da RCS versus ϵ_a (%) para os rejeitos de flotação e concentração. Observa-se para os dois rejeitos comportamentos bem peculiares com decréscimos da deformação para os teores de 3 % do rejeito da concentração aos 3 dias, como também para o da flotação aos 7 dias de cura nos teores de 2, 3 e 4 % de cimento e aos 28 dias no teor de 5 %.

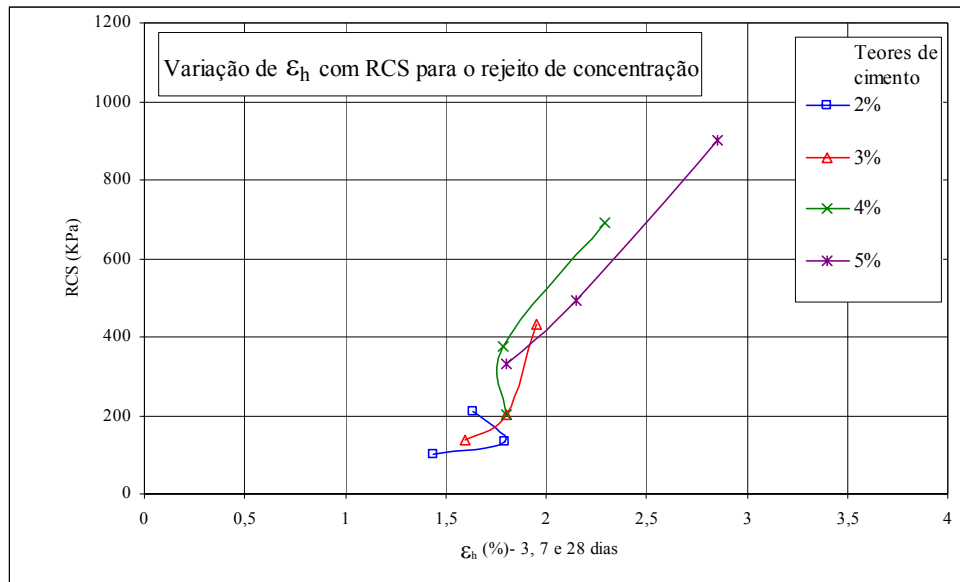


Figura 4.12: Variação de RCS versus ϵ_h (%) para as misturas de rejeito melhorado com cimento do rejeito da flotação nas idades de 3, 7 e 28 dias de cura

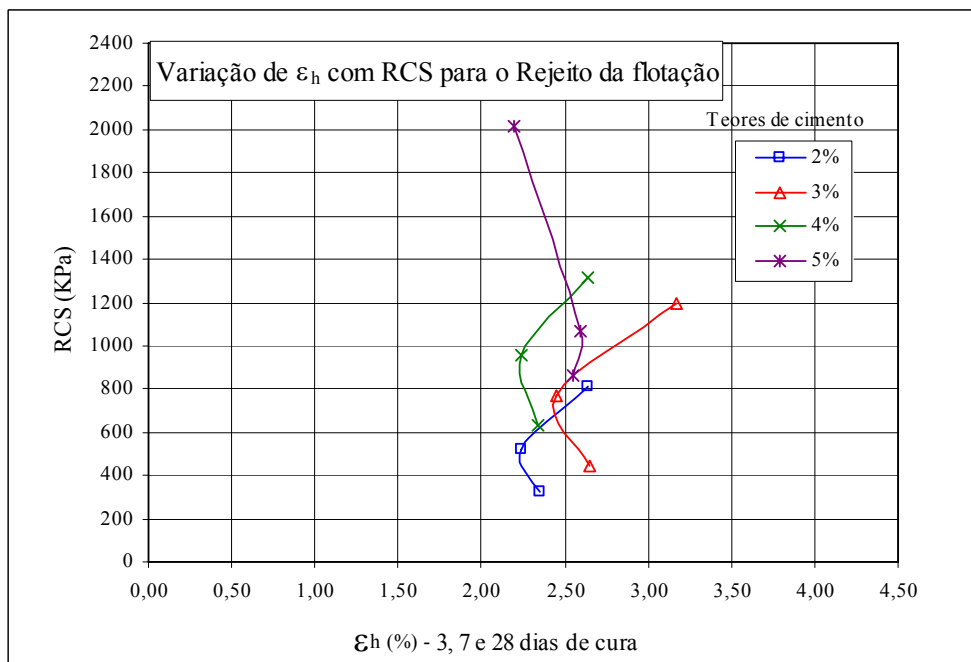


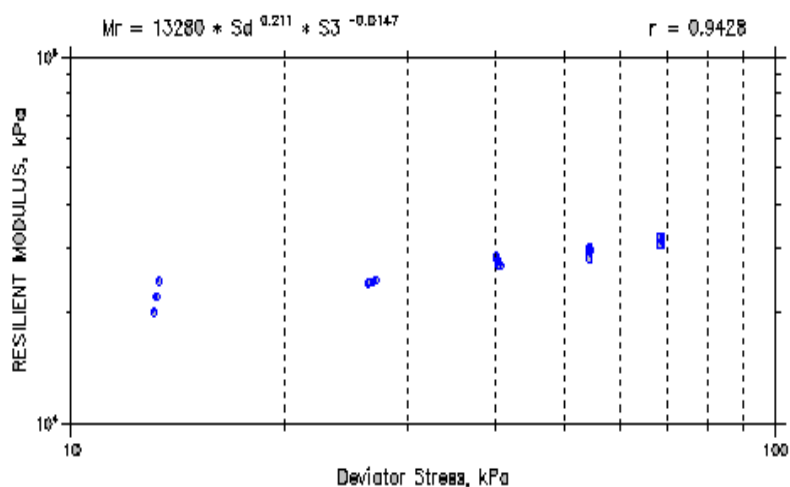
Figura 4.13: Variação de RCS versus ϵ_h (%) para as misturas de rejeito melhorado com cimento do rejeito da concentração nas idades de 3, 7 e 28 dias de cura

4.5 Ensaio triaxiais de carregamentos repetidos para a determinação dos módulos de resiliência dos rejeitos analisados sem misturas

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR) realizados de acordo com a metodologia AASHTO T 307 para os rejeitos de flotação e de concentração compactados nas energias normal e intermediária e teor ótimo de umidade são mostrados nas Figuras do Anexo A

Apresentam-se nas Figuras: 4.14 a 4.17 os relatórios de síntese fornecidos pelo programa e escolhidos no modelo de melhor ajuste obtido nos ensaios, em função da tensão desviadora σ_d e tensão confinante σ_3 .

RESILIENT MODULUS TEST DATA
SUMMARY REPORT



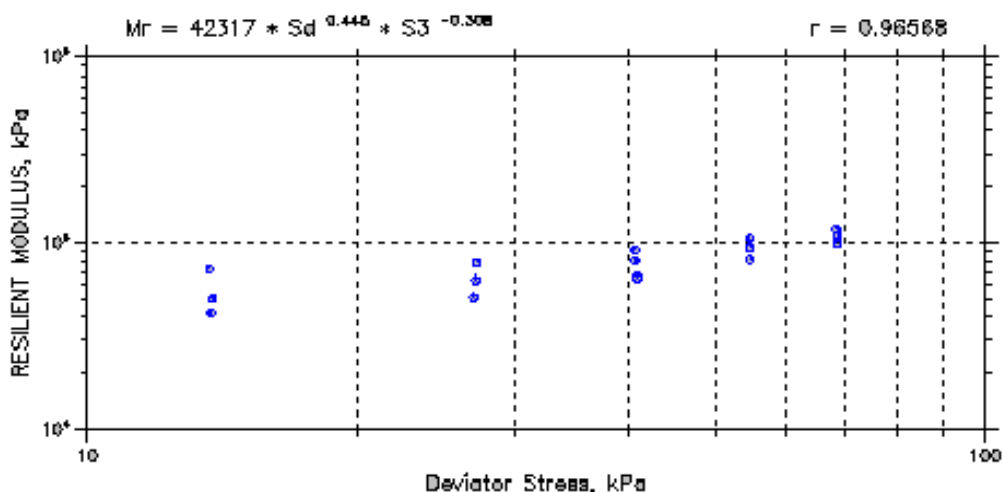
Confining Stress S3 (kPa)	Nom. Max. Deviator Stress (kPa)	Mean Deviator Stress (kPa)	Std. Dev. Deviator Stress (kPa)	Mean Bulk Stress (kPa)	Mean Resilient Strain (%)	Std. Dev. Resilient Strain (%)	Mean Resilient Modulus (kPa)	Std. Dev. Resilient Modulus (kPa)
41.48	13.79	13.07	0.3288	137.5	0.07	0.00	20088	570.06
40.83	27.58	26.42	0.4924	148.2	0.11	0.00	24282	436.63
41.35	41.37	40.18	0.3247	164.2	0.14	0.00	28559	309.4
41.43	55.16	54.37	0.4717	178.7	0.18	0.00	30089	538.88
40.93	68.95	68.63	0.4234	181.4	0.21	0.00	32307	234.31
27.26	13.79	13.2	0.3684	94.88	0.07	0.00	22188	671.86
26.96	27.58	26.64	0.4850	107.5	0.12	0.00	24497	640.09
27.3	41.37	40.67	0.5284	122.6	0.18	0.00	27090	585.28
27	55.16	54.46	0.5024	136.5	0.19	0.00	28459	385.83
27.31	68.95	68.65	0.3466	150.6	0.22	0.00	30725	391.83
12.95	13.79	13.3	0.1663	52.15	0.06	0.00	24586	328.49
13.41	27.58	26.96	0.2818	87.2	0.12	0.00	24809	407.01
13.32	41.37	40.44	0.3710	80.41	0.15	0.00	27388	443.91
13.21	55.16	54.33	0.4619	93.87	0.19	0.00	28478	608.49
13.1	68.95	68.61	0.4682	107.8	0.22	0.00	30847	333.61

Project: Angola	Location:	Project No.: Fiat Nor
Boring No.:	Tested By: Claudio	Checked By:
Sample No.: 01	Test Date: 24-11-10	Depth:
Test No.: RM 10-008	Sample Type:	Elevation:
Description: Norma AASHTO T307; Rejeito de Flotação - Energia Normal		
Remarks: 5 kN load cell - Sodmak N600 5/N 4813; 2.5 In LVDT - 5/N 55001		

Figura 4.14: Resumo dos resultados do ensaio do Módulo de Resiliência para o rejeito da flotação - energia do Proctor normal

RESILIENT MODULUS TEST DATA

SUMMARY REPORT

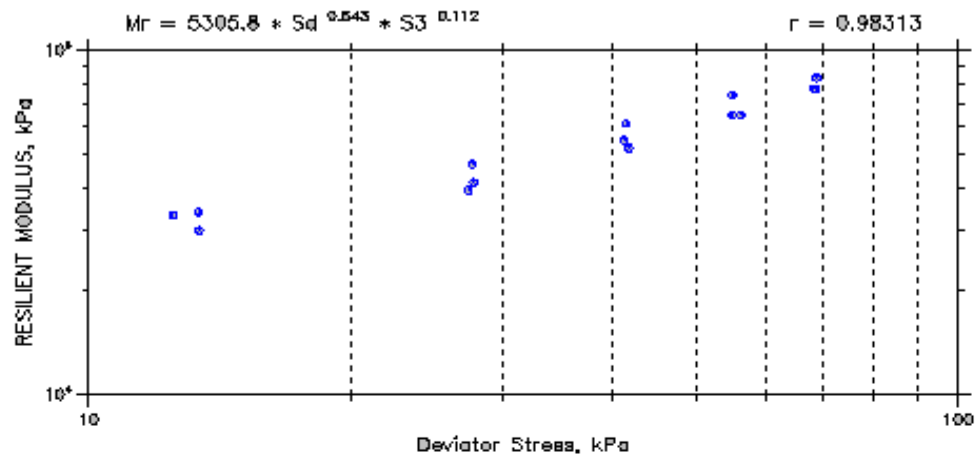


Confining Stress S3 (kPa)	Nom. Max. Deviator Stress (kPa)	Mean Deviator Stress (kPa)	Std. Dev. Deviator Stress (kPa)	Mean Bulk Stress (kPa)	Mean Resilient Strain (%)	Std. Dev. Resilient Strain (%)	Mean Resilient Modulus (kPa)	Std. Dev. Resilient Modulus (kPa)
41.38	13.79	13.73	0.1409	137.8	0.04	0.00	41925	888.48
41.55	27.58	26.86	0.2566	151.6	0.06	0.00	51210	1166
41.22	41.37	40.94	0.3417	164.6	0.06	0.00	65439	540.43
41.43	55.16	54.61	0.2872	178.9	0.07	0.00	81059	1484.7
41.08	68.95	68.56	0.3068	181.8	0.07	0.00	99610	1319.3
27.31	13.79	13.78	0.1279	95.71	0.03	0.00	50385	667.62
27.37	27.58	27.11	0.3776	109.2	0.04	0.00	63610	1635.3
27.21	41.37	40.69	0.4459	122.3	0.05	0.00	79917	329.7
27.04	55.16	54.61	0.4270	136.7	0.06	0.00	94410	815.22
27.4	68.95	68.6	0.4476	150.8	0.06	0.00	1.1033e+005	1046.9
13.51	13.79	13.66	0.1663	54.2	0.02	0.00	71940	1250.6
13.47	27.58	27.2	0.2109	67.62	0.04	0.00	78148	1157.8
13.45	41.37	40.75	0.5810	81.11	0.04	0.00	81795	1833.7
13.43	55.16	54.56	0.3262	94.85	0.05	0.00	1.0655e+005	1633.1
13.42	68.95	68.33	0.5219	106.6	0.05	0.00	1.199e+005	2237.6

Project: Angola Teste	Location:	Project No.: Flat E1
Boring No.:	Tested By: Claudio	Checked By:
Sample No.:	Test Date: 25-11-2010	Depth:
Test No.: RN 10-008	Sample Type:	Elevation:
Description: Norma AASHTO T307; Rejeito de flotação Energia Intermediária		
Remarks: 5 kN load cell - Sedmax N600 S/N 4913; 2.5 In LVDT - "LVDT 2"		

Figura 4.15: Resumo dos resultados do ensaio do Módulo Resiliênte para o rejeito de flotação energia do Proctor intermediário

RESILIENT MODULUS TEST DATA
SUMMARY REPORT

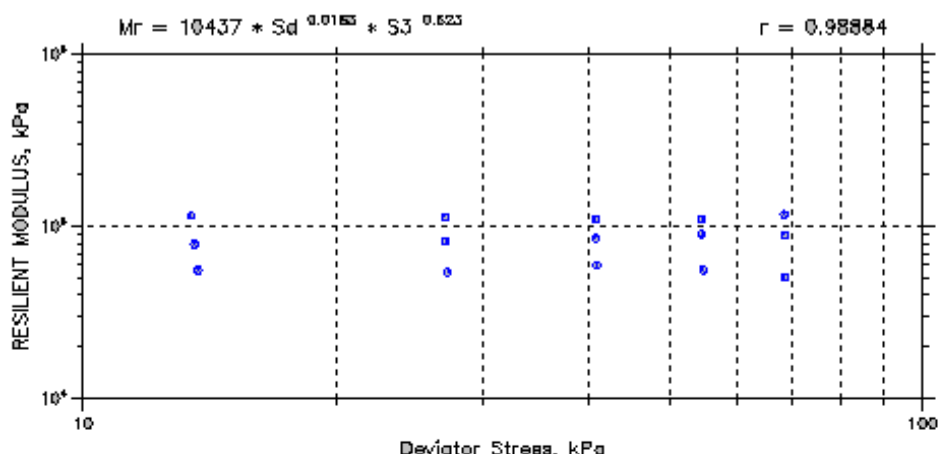


Confining Stress S3 (kPa)	Nom. Max. Deviator Stress (kPa)	Mean Deviator Stress (kPa)	Std. Dev. Deviator Stress (kPa)	Mean Bulk Stress (kPa)	Mean Resilient Strain (%)	Std. Dev. Resilient Strain (%)	Mean Resilient Modulus (kPa)	Std. Dev. Resilient Modulus (kPa)
41.33	13.79	13.39	0.0488	137.4	0.04	0.00	33989	345.13
41.2	27.58	27.66	0.2443	151.3	0.05	0.00	46620	189.71
41.39	41.37	41.54	0.4747	165.7	0.06	0.00	61276	675.33
41.33	55.16	54.96	0.4403	178.9	0.07	0.00	74187	756.89
41.14	68.95	68.77	0.3056	192.2	0.08	0.00	83280	977.2
26.91	13.79	12.5	1.4671	93.24	0.04	0.01	33143	1332.7
27.13	27.58	27.72	0.3628	109.1	0.06	0.00	41336	293.56
27.3	41.37	41.29	0.0874	123.2	0.07	0.00	54737	529.38
27.27	55.16	56.06	0.2839	136.9	0.08	0.00	64757	349.84
27.3	68.95	68.33	1.4862	150.2	0.08	0.00	77482	1861.9
12.81	13.79	13.4	0.2959	51.82	0.04	0.00	29972	726.84
13.14	27.58	27.36	0.7288	68.77	0.07	0.00	39288	449.68
13.23	41.37	41.81	0.3092	81.51	0.08	0.00	52058	432.73
13.31	55.16	56.23	2.4964	96.16	0.08	0.00	65054	2255.5
13.11	68.95	68.64	0.4684	108	0.08	0.00	77182	697.85

Project: angela	Location:	Project No.: Conc EN
Boring No.:	Tested By: Crispim	Checked By:
Sample No.:	Test Date: 26-11-2010	Depth:
Test No.: RM10-DD1	Sample Type:	Elevation:
Description: Norma AASHTO T307; rejeito de concentração - Energia normal		
Remarks: 5 kN load cell - Soehnle N600 5/N 4813; 2.5 In LVDT - "LVDT 2"		

Figura 4.16: Resumo dos resultados do ensaio do Módulo Resiliênte para o rejeito de concentração – energia do Proctor normal

RESILIENT MODULUS TEST DATA
SUMMARY REPORT



Confining Stress S3 (kPa)	Nom. Max. Deviator Stress (kPa)	Mean Deviator Stress (kPa)	Std. Dev. Deviator Stress (kPa)	Mean Bulk Stress (kPa)	Mean Resilient Strain (%)	Std. Dev. Resilient Strain (%)	Mean Resilient Modulus (kPa)	Std. Dev. Resilient Modulus (kPa)
41.42	13.79	13.44	0.1423	137.7	0.01	0.00	1.1562e+005	3881.3
41.34	27.58	26.88	0.2728	151	0.02	0.00	1.1347e+005	1841.6
41.41	41.37	40.79	0.4222	165	0.04	0.00	1.1006e+005	1307.4
41.28	55.16	54.61	0.2400	178.5	0.05	0.00	1.1011e+005	2315.5
41.34	68.95	68.44	0.4844	192.5	0.08	0.00	1.1789e+005	2010.2
27.12	13.79	13.56	0.1462	94.83	0.02	0.00	76895	2550.7
27.19	27.58	27.03	0.2336	106.6	0.03	0.00	81848	2601.4
27.13	41.37	40.81	0.4894	122.2	0.05	0.00	85391	2158.8
27.35	55.16	54.6	0.5011	138.8	0.08	0.00	90550	1014.7
27.25	68.95	68.53	0.4382	150.3	0.07	0.00	89448	1401.3
13.14	13.79	13.71	0.0937	53.14	0.03	0.00	55831	393.25
12.91	27.58	27.2	0.3080	65.94	0.05	0.00	54389	1440.5
13.07	41.37	40.83	0.3696	80.15	0.07	0.00	58371	1588.6
13.2	55.16	54.8	0.3804	94.41	0.10	0.00	55815	388.18
13.07	68.95	68.56	0.0905	107.8	0.13	0.00	50596	638.71

Project: Angola Teste	Location:	Project No.: Danc EI
Boring No.:	Tested By: Crispim	Checked By:
Sample No.:	Test Date: 29-11-2010	Depth:
Test No.: RM 10-D11	Sample Type:	Elevation:
Description: Norma AASHTO T307; Rejeito de concentração magnética - Energia Intermediária		
Remarks: 5 kN load cell - Soatex N600 5/N 4813; 2.5 In LVDT - "LVDT 2"		

Figura 4.17: Resumo dos resultados do ensaio do Módulo Resiliênte para o rejeito de concentração – energia do Proctor intermediário

A seguir, ajustaram-se os modelos citados no item 2.7.4 do Capítulo II para os resultados dos ensaios listados nas Figuras 4.14 a 4.17 de modo a expressar o comportamento resiliente do solo em função das variáveis envolvidas: σ_d – tensão desviadora; σ_1 – tensão principal maior; σ_3 – tensão confinante e de $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ – primeiro invariante de tensões.

A Tabela 4.10 mostra os modelos de ajuste e os respectivos coeficientes ajustados segundo os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência para os rejeitos da flotação e da concentração.

Tabela 4.10: Modelos para estimativa do módulo de resiliência

Variáveis	Modelo	K ₁ (kPa)	K ₂	K ₃	R ²
- Rejeito da flotação - energia normal					
σ_d	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	12668	0,211	-	0,87
θ	$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	13767	0,14	-	0,15
$(\sigma_d \text{ e } \sigma_3)$	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \cdot \sigma_3^{k_3}$	13280	0,211	-0,0147	0,89
- Rejeito da flotação - energia intermediária					
σ_d	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	15700	0,445	-	0,71
θ	$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	79339	-0,00621	-	0,00
$(\sigma_d \text{ e } \sigma_3)$	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \cdot \sigma_3^{k_3}$	42317	0,445	-0,308	0,93
Rejeito da concentração – energia normal					
σ_d	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	7577,8	0,544	-	0,94
θ	$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	3282	0,585	-	0,41
$(\sigma_d \text{ e } \sigma_3)$	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \cdot \sigma_3^{k_3}$	5305,8	0,543	0,112	0,97
Rejeito da concentração - energia intermediária					
σ_d	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	76985	0,0143	-	0,01
θ	$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	2713,9	0,715	-	0,73
$(\sigma_d \text{ e } \sigma_3)$	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \cdot \sigma_3^{k_3}$	10.437	0,0153	0,523	0,98

Nota-se que o modelo que expressa o Módulo Resiliente em função da tensão confinante, σ_3 , e da tensão desvio, σ_d , foi o que apresentou melhor desempenho para os dois rejeitos estudados. O modelo de ajuste em função da tensão desvio apresentou desempenho razoável para o rejeito de flotação e concentração na energia normal. Quanto ao modelo de

ajuste em função do primeiro invariante de tensões, θ , não se ajusta aos dados experimentais obtidos, apresentando um desempenho apenas razoável, $R^2=0.73$, para os ensaios realizados com o rejeito de concentração na energia intermediária.

Os melhores ajustes foram obtidos no modelo em que se correlacionam a tensão desviadora (σ_d) e a tensão confinante (σ_3), especialmente para o rejeito da concentração na energia intermediária com resultado para $R^2 = 0,98$, conforme dados apresentados na Tabela 4.10.

A Figura 4.18 ilustra a variação dos módulos de resiliência dos rejeitos de flotação e de concentração para as energias de compactação do Proctor normal e intermediário e no teor ótimo de umidade.

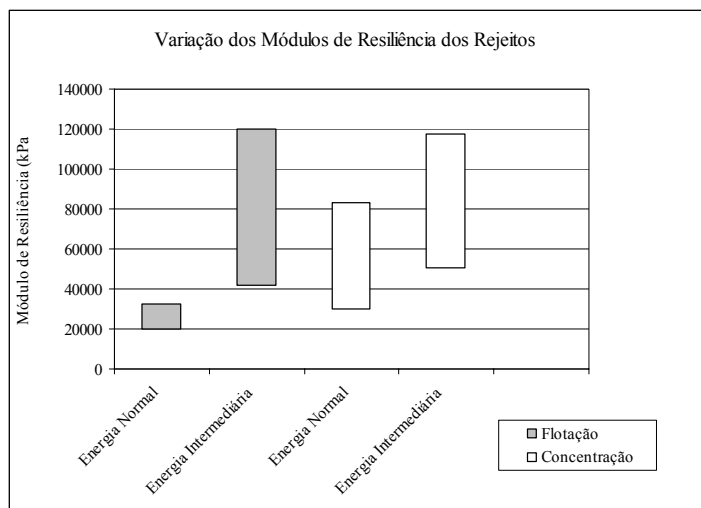


Figura 4.18: Variação dos módulos de resiliência dos rejeitos de flotação e de concentração

Na energia intermediária os dois rejeitos apresentam comportamento, em relação valores máximos e mínimos atingidos, bem semelhantes com pouca variação entre seus módulos resilientes. Para a energia normal houve significativa variação entre os módulos, demonstrando que a energia de compactação exerce influência na avaliação dos módulos de resiliência dos rejeitos ensaiados.

Os valores médios dos módulos de resiliência na energia intermediária, da ordem de 80.000 kPa, qualificam estes materiais para utilização em camadas de reforço de pavimentos flexíveis.

Observam-se ainda a influência da energia de compactação no comportamento resiliente dos rejeitos estabelecendo-se para o rejeito da concentração variação da ordem de 34% da energia de compactação normal para intermediária e ao rejeito de flotação variação de 66%, correlacionando-se valores médios obtidos nos ensaios.

4.6 Ensaios de caracterização química, mineralógica e análise potenciométrica do pH

A caracterização química e mineralógica consistiu de ensaios de difratometria de Raios-X, espectrometria de emissão óptica e da determinação do pH para duas amostras dos rejeitos ensaiadas.

Os resultados das análises do pH encontrados foram: para o rejeito da flotação igual a 8,11 fortemente alcalino básico e para concentração de 6,13 – levemente ácido, em conformidade com a Figura 2.10 do Capítulo 2. Observam-se também que os limites alcançados encontram-se dentro do recomendado pelo DNIT (2006) para água de amassamento $5 < Ph < 8$ do concreto, correlação que expressa razoabilidade dos valores encontrados relativos a sua utilização em misturas com cimento.

Apresentam-se nas Figuras 4.19 e 4.20 os resultados dos difratogramas de Raios-X dos rejeitos de flotação e de concentração destacando-se os principais argilominerais presentes: Ka = Caulinita, Go = Goethita, Gb = Gibbsita, Qz = Quartzo, e Hm = Hematita. A Tabela 4.15 apresenta os percentuais dos principais elementos químicos encontrados nas amostras dos rejeitos ensaiados.

Cabe destacar que a presença do elemento ferro nos argilominerais como a Hematita $[Fe_2O_3]$, peso específico entre 5,17 e 5,18 g/cm^3 , e a Goetita $[FeO.OH]$, peso específico entre 5,158 e 5,180 g/cm^3 e do alumínio na Gibbsita $[Al_2O_3.3H_2O]$, peso específico da ordem de 2,60 g/cm^3 , justificam os pesos específicos encontrados para os rejeitos estudados, assim como o caráter não expansivo dos materiais em função dos argilominerais presentes.

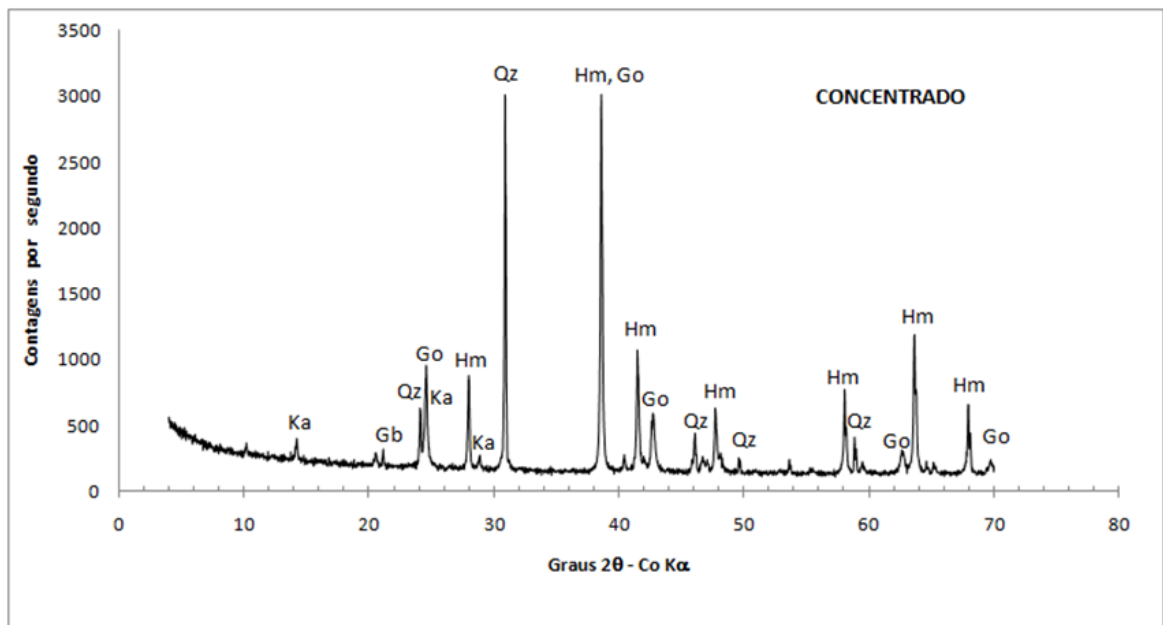


Figura 4.19: Difratomogramas de Raios-X do rejeito da concentração (Ka = Caulinita, Go = Goethita, Gb = Gibbsita, Qz = Quartzo, Hm = Hematita.)

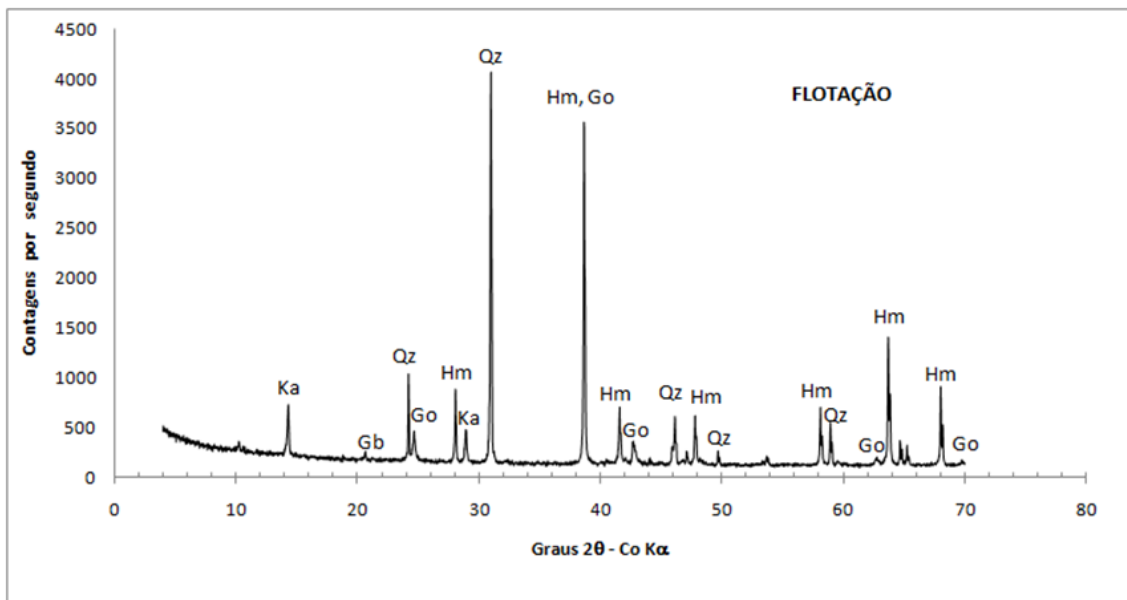


Figura 4.20: Difratomogramas de Raios-X do rejeito da flotação (Ka = Caulinita, Go = Goethita, Gb = Gibbsita, Qz = Quartzo, Hm = Hematita)

Tabela 4.11: Resultados quantitativos da análise de metais por espectrometria óptica dos rejeitos da flotação e concentração

	Rejeito da concentração				Rejeito da flotação			
	a	b	c	Média	a	b	c	Média
Al	5,20	5,11	5,14	5,15	6,75	6,58	6,37	6,567
Cd	0,032	0,032	0,034	0,033	0,019	0,021	0,020	0,020
Co	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000	0,002	0,001	0,001
Cr	0,253	0,251	0,262	0,255	0,135	0,143	0,142	0,140
Fe	296,0	311,5	328,1	311,9	211,9	204,5	203,4	206,6
Mn	0,474	0,514	0,532	0,507	0,231	0,220	0,222	0,224
Ni	0,021	0,020	0,021	0,021	0,008	0,009	0,009	0,009
PB	0,002	0,002	0,002	0,002	0,037	0,035	0,036	0,036
Sr	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
V	0,016	0,015	0,016	0,015	0,010	0,011	0,011	0,010
Zn	0,046	0,044	0,046	0,045	0,042	0,044	0,046	0,044
Si	116,290		119,570	117,93	200,370	186,480		193,425

Os metais pesquisados neste ensaio foram os que se apresentam na tabela 4.11; as maiores concentrações foram as obtidas para os elementos Ferro e Silício. O resultado da análise confirma os dados obtidos na difratometria por raio-X e dos argilo-minerais presentes naquela análise, cujos elementos de sua formulação se configuram como os de maior concentração.

O rejeito da concentração apresenta maior teor de ferro (Fe) do que o da flotação, também o maior peso específico dos sólidos, reafirmando as correlações apresentadas por Espósito (2000), Lopes (2000) e Figueiredo (2007).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

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

5.1 Conclusões

- As classificações TRB obtidas para os rejeitos da concentração A3 e da flotação A4 assim como as suas características granulométricas estão em conformidade com as exigências da ABNT,1992 - NBR 12253 compatíveis com as exigências para utilização dos solos empregados em camadas de solo cimento
- De acordo com o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis (DNER, 1981), proposto pelo Eng., Murilo Lopes de Souza, e com base nos resultados dos ensaios CBR na energia intermediária e também na energia normal para o rejeito da flotação (Tabelas:4.2 e 4.3), esses rejeitos poderiam ser utilizados em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.
- Comparando-se os dois materiais e com base nos ensaios que foram empregados neste trabalho, observou-se um comportamento melhor do rejeito flotação, sob o ponto de vista mecânico. Consideram-se a maior presença da fração fina na composição granulométrica deste rejeito que resulta em maior coesão e conseqüentemente melhor desempenho.
- Observa-se ainda que o CBR do rejeito de flotação na energia intermediária “sem adição de cimento” equipara-se ao determinado para o CBR de solo melhorado com cimento, aplicável em subbase de pavimentos rígidos, conforme DNIT (2005) – DNER ES-302/97.
- Os ensaios de resistência à compressão simples aplicados aos rejeitos melhorados com cimento apresentaram resultados inferiores ao exigido pela normalização. Apesar disto os incrementos de 1% nos teores de cimento em relação à massa de rejeito conferiu significativa melhora nas resistências. Afinal o melhor resultado alcançado aos 7 dias foi de 1,07 MPa para o rejeito da flotação melhorado no

teor de 5%. Entretanto a sua utilização na composição da camada de sub-base para pavimentos rígidos, deveria atender ao mínimo exigido que é de 1,40 MPa, DNIT (2005).

- Referenciando-se ainda aos ensaios de resistência à compressão simples efetuados com rejeitos melhorados com cimento. As recomendações da NBR 12253/92 aplicáveis a camadas de “solo-cimento” para as classificações A3 e A4 os teores mínimos de cimento recomendados são respectivamente 9% e 10% para a obtenção da resistência mínima de 2,1MPa. Utilizaram-se apenas rejeitos melhorados com cimento com objetivo de analisar seu comportamento em teores mínimos e para avaliar resultados também relativos ao tempo de cura.
- Quanto ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem o melhor resultado ocorreu para o rejeito da flotação “melhorado com cimento” no teor de 5% de cimento que apresentou perda de massa igual a 19% . Entretanto, observaram-se ganhos significativos de resistência mecânica para os acréscimos percentuais de 1% de cimento nas misturas As recomendações para a categoria “solo-cimento” para as classificações: A3 perda de massa $\leq 10\%$ e A4 perda de massa $\leq 14\%$.
- Os valores médios dos módulos de resiliência na energia intermediária, da ordem de 80.000 kPa, qualificam estes materiais para utilização em camadas de reforço de pavimentos flexíveis.
- As composições mineralógicas dos rejeitos revelam a presença de argilominerais não expansivos compatibilizando-se aos resultados obtidos na expansão_{CBR} , excetuando-se o rejeito da concentração na energia normal cujo comportamento pode estar relacionado com a granulometria com menor percentual de finos.

Os comportamentos não expansivos afiançados pelas composições mineralógicas e químicas, a resistência mecânica crescente em função das energias de compactação, as perspectivas de estabilização tanto química quanto granulométrica para evolução do uso, conforme projeção das camadas, reiteram o propósito inicial. Entretanto, pesquisas complementares se fazem necessárias para a consolidação deste ensejo e restarão as sugestões para trabalhos futuros.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

- Complementar os ensaios CBR e RCS na energia do Proctor modificado para os dois rejeitos sem mistura, bem como para as misturas pesquisadas neste trabalho e nas energias do Proctor normal, intermediário e modificado.
- Verificar o comportamento resiliente dos rejeitos relativos a energia do Proctor modificado e também para os rejeitos melhorados com cimento no teor de 2% de cimento em relação à massa seca de rejeito, nas energias intermediária e modificada.
- Executar o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem na energia do Proctor modificado para os rejeitos melhorados com cimento nos teores trabalhados e no teor de mistura de 6% nas energias do Proctor intermediário e modificada.
- Realizar ensaios mini-CBR segundo a metodologia Nogami e Villibor, para estabelecimento de correlações
- Estabilizar granulométricamente o rejeito da concentração magnética para verificação do comportamento CBR como material de base para pavimentos rígidos com função drenante na energia do Proctor modificado.
- Estudar o comportamento dos rejeitos como agregados (filler) de concreto asfáltico.
- Utilizar os rejeitos em trechos experimentais como camadas de sub-base de pavimentos asfálticos na energia do Proctor intermediário e efetuar monitoramento. Estabelecer parcerias entre Universidade, Poder Público e Mineradoras através de convênios como instrumento para viabilização dos projetos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Washington, DC, 1993.
- AASHTO (1999). *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. American Association of State Highways Officials, AASHTO Designation T 307-99, pp, 1084-1109.
- ABNT (1984a). NBR 7181/84: Solo – **Análise Granulométrica**– Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 13p.
- ABNT (1984b). NBR 6459/84: Solo – **Determinação do Limite de Liquidez**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 6p.
- ABNT (1984c). NBR 7180/84: Solo – **Determinação do Limite de Plasticidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 3p.
- ABNT (1984d). NBR 6508/84: **Grãos de Solos que Passam na Peneira 4,8 mm**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 8p.
- ABNT (1986). NBR 7182/86: Solo – **Ensaio de Compactação** – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 10p.
- ABNT (1987). NBR 9895/87: Solo – **Determinação do CBR** – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 4p.
- ABNT (1990). EB 2096: **Materiais para sub-base ou base de solo cimento** – Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2p.
- ABNT (1992). NBR 12253 – **Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento**. Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 4p.
- ABRÃO, P.C. (1987), “**Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil**”,In: ISimpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO’87, ABMS/ABGE/CBGB/CE, Rio de Janeiro, RJ, I: 1-10.
- AGUILAR, S.E.S, **Deformabilidade de uma argila colapsível não saturada sob compressão isotrópica com sucção controlada**, Tese de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, 1989.
- AITCHISON, G.D., Donald, B.I. *Effective stresses in unsaturated soils*. Proceedings of the 2nd Aust./N. Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Christchurch, pp. 192-199, 1956.
- AITCHISON, G.D., Woodburn, J.A.. *Soil suction in foundation design*.. Proceedings of the 7nd Aust./ Mexico Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Christchurch, v.2, pp. 1-8, 1969.

- ALLEN, John J.; THOMPSON, Marshall R. (1974). *Resilient response of granular materials subjected to time-dependent lateral stresses*. Transportation Research Record, Washington, DC, n. 510, p. 1-13.
- BALBO, José T. (2007) **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos, São Paulo, 558 p.
- BERNUCCI, Liedi L. B. (1995). **Considerações sobre o Dimensionamento de Pavimentos Utilizando Solos Lateríticos para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego**. São Paulo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo Tese de Doutorado. 237 p.
- CARVALHO, C. A. B. (1997). **Estudo da Contribuição das Deformações Permanentes das Camadas de Solo na Formação das Trilhas de roda num Pavimento Flexível**. São Carlos, Tese de Doutorado, EESC-USP, Universidade de São Paulo, 206p.
- CARVALHO, C. A. B. (2010). **Notas de aula CIV 615**. Programa de Pós Graduação. Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa MG.
- CULLITY, B. D.,(1978). *Elements of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts, 1978, p 296.
- DEHLEN, G.L.; MONISMITH, C.L. (1970). *Effect of non linear material response on the behavior of pavement under traffic*. Highway Research Record, Washington, DC, n. 310, p. 1-16.
- DNER – ME 201/94. **Solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ, 1994^a. 4 p.
- DNER – ME 202/94. **Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ, 1994b. 7 p.
- DNER – ME 203/94. **Solo-cimento: determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem**. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ, 1994b. 4 p.
- DNER – 131/94. **Solos - Determinação do Módulo de Resiliência**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, 8 p.
- DNIT 134/2010 - ME. **Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010, 11 p.
- DNIT (2006). **Manual de Pavimentação**. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Publicação IPR – 719, 3a edição, Rio de Janeiro, 278 p.
- DNIT (2005). **Manual de Pavimentos Rígidos**. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Publicação IPR – 714, 2a edição, Rio de Janeiro, 234 p.

- DNIT (2011). **Plano Nacional Viário** DPP/CGPLAN/Coordenação de Planejamento – www.dnit.gov.br – consulta em 02/04/2011.
- DUNCAN, J.M.; MONISMITH, C.L.; WILSON, E.L. (1968). *Finite element analyses of pavements*. Highway Research Record, Washington, DC, n. 228, p. 18-33.
- ESPÓSITO, T. (2000). **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada à Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF.363p.
- FIGUEIREDO, M. M. (2007). **Estudo de Metodologias Alternativas de Disposição de Rejeitos para Mineração Casa de Pedra – Congonhas, MG**. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 147p.
- GOMES, M. A. (2009). **Caracterização Tecnológica para Rejeitos de Mineração de Ferro**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Mineral, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 89 p.
- IBRAM, (2010). **Sistemas de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 5ª edição. 28p. Instituto Brasileiro de Mineração, site: www.ibram.org.br. Acesso em 10/12/2011 – 10:30h
- INGLES E METCALF (1972) - *Soil Stabilization. Principles and Practice*. Butterworth, Sydney, Austrália, 374 p.
- LIMA, D. C. (1985). Apostila no 205 – **Tópicos em Estradas**. Imprensa Universitária, UFV, Viçosa-MG, 32p.
- LIMA, D. C., ROHM, S. A., BARBOSA, P. S. A. (1993). **Estabilização de Solo III – Mistura Solo-cal para fins rodoviários**. UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 46p.
- LOPES, M.C.O (2000). **Disposição Hidráulica de Rejeitos Arenosos e Influência nos Parâmetros de Resistência** – Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF.
- MACEDO, J. A. G., (1996). **Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – A Experiência com FWD no Brasil**. Tese de Doutorado. PEC. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.
- MACHADO, C. C.; FERNANDES, D. C. M.; PEREIRA, R. S.; SANTANA, G. L.; LIMA, D. C.; PIRES, J. M. M. (2003). **Classificação tecnológica de solos e resíduos industriais, com e sem tratamento térmico, para fins rodoviários**. Viçosa, Minas Gerais, Revista Árvore, v. 27 no.5.
- MACHADO, C. C.; SANTANNA, G. L.; LIMA, D. C.; CARVAHO, C.A.B., FERNANDES, D.C.M., (2009). **Comportamento geotécnico de misturas granulométricas de solo-grits**. Viçosa, Minas Gerais, Revista Árvore, v. 33 no.3.

- MACHADO, C. C.; SANTANA, G. L.; LIMA, D. C.; CARVALHO, A. B.; ALMEIDA, A.; OLIVEIRA, T.; (2006). **Durabilidade de solos estabilizados quimicamente com vistas à aplicação em estradas florestais**. Viçosa, Minas Gerais, Revista Árvore, v. 30 no.6, p.981.
- MEDINA, Jacques; PREUSSLER, Ernesto S. (1980). **Características resilientes de solos em estudos de pavimentos**. Rio de Janeiro, Revista Solos e Rochas, ABMS, v.3, p. 3-26.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2005). **Mecânica dos Pavimentos**, Capa e Editoração Eletrônica Imagemaker Interactive, 2ª Edição, Rio de Janeiro/RJ, 570 p.
- MINERAIS- solos.ufmt.br, site: <http://solos.ufmt.br/docs/solos1/minerais.pdf>. 16 p. Consulta em 20/04/2011 - 18:06 h.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – **Beneficiamento do Minério de Ferro** - site: www.pormin.gov.br/biblioteca/.../beneficiamento_de_minerio.pdf. 10 p. Consulta em 07/12/2010 - 06:33 h
- MOTTA, L. M. G. (1991). **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas**. Tese de Doutorado, COOPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 366p.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1981). **Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias**. Anais do Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Vol. 1, 30/41. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- PEREIRA, R. S. (2005). **Viabilidade Técnica do Emprego de Resíduos da Indústria de Celulose para a Construção de Estradas Florestais**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 356p. Tese de Doutorado.
- PESSOA, F. H. C.; (2004). **Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Distrito Federal. 151p.
- PETRUCCI, E. G. R. (1978). **Materiais de Construção**. Porto Alegre - RS, Globo, 435p.
- PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo, SP: Editora Oficina de Textos, 2006. 350 p.
- PREUSSLER, Ernesto S. (1983). **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. Rio de Janeiro, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 257 p
- REZENDE, D. S. V (2009). **Estudo do Comportamento Mecânico de Alguns Tipos de Solo da Região de Viçosa-MG, Através de Ensaios Triaxiais de Cargas Repetidas para Fins de Projeto de Pavimentos Rodoviários**. Tese de Doutorado, DEF, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 144 p.

- SANT'ANA, A. P. (2003). **Caracterização tecnológica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, MG, 88p.
- SENÇO, W. (2008). **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo. Ed. PINI. volume1, 2. ed. ampl – 761 p.
- SILVA, G. P.; FONTES, M. P.; COSTA, L. M.; BARROS, N. F; **Caracterização Química, Física e Mineralógica de Estéreis e Rejeito da Mineração de Ferro da Mina de Alegria, Mariana-Mg**, Pesquisa Agropecuária Tropical, 36 (1): 45-52, 2006 – 45.
- SOUZA, Murilo L. (1980). **Pavimentação Rodoviária**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., vol. 1. 131 p.
- SVENSON, M. (1980). **Ensaio Triaxiais Dinâmicos em Solos Argilosos**. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 251p.
- TRINDADE, P. T.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A.; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. (2008). **Compactação dos Solos: fundamentos teóricos e práticos**. Viçosa, MG: Ed. UFV, (2008), 95p.
- TRINDADE, T. P (2006). **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 254 f. Tese de Doutorado.
- VALE (2009) **Relatório de Sustentabilidade**, site: www.vale.com/Util/relatorio-de-sustentabilidade/2009/pt/operador-ambiente-gestao-disposicao.html, consulta em 01/04/2011 – 20:00h.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. (1975). **Principles of Pavement Design**. New York, John Wiley & Sons, Inc. 711p.

