Campus de São Carlos

**CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS BASÁLTICOS
ATRAVÉS DA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO**

SANDRA FABIANA RODGHER

ORIENTADOR: PROF. DR. GLAUCO TULIO PESSA FABBRI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES - STT

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS BASÁLTICOS
ATRAVÉS DA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO

Sandra Fabiana Rodgher

Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Transportes.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016396

São Carlos, setembro de 1996

Class.	700.855C
Cutt.	4884
Tombo	199/96

Transportes

sf 0745731

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

R691c Rodgher, Sandra Fabiana
Caracterização de agregados basálticos através
da adsorção de azul de metileno / Sandra Fabiana
Rodgher. São Carlos, 1996.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996. .
Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa
Fabbri

1. Azul de metileno. 2. Adsorção. 3.
Agregados. I. Título

*“Os nossos sonhos acabam por se realizar,
mas de um modo tal, que já não podemos reconhecê-los”.*

Fyodor Dostoyevski (1821-1881)

DEDICATÓRIA

**À minha família,
pelo constante apoio e pela imensa alegria.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri, pela orientação efetiva e pela paciência constantes durante o desenvolvimento do trabalho;

A Diógenes Bosquetti, pelo estímulo, pelo carinho e pela compreensão dispensada nos momentos mais difíceis;

Aos professores do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, em especial ao Prof. Dr. José Bernardes Félex e ao Prof. Dr. Alexandre Benetti Parreira, pelas sugestões dadas ao trabalho;

Aos técnicos do Laboratório de Estradas do STT, ao Sr. Antonio Carlos Gigante, Sr. Roberto Antonio Morasco e Sr. Antonio Carlos Oliveira pelos auxílios na coleta das amostras e na realização dos ensaios e, principalmente, pela amizade;

Aos técnicos do Laboratório de Geologia do SGS, pela ajuda prestada na realização dos ensaios;

Ao Prof. Dr. Adail R. L. Gonçalves e ao Prof. Dr. Reinaldo Lorandi da Universidade Federal de São Carlos pelas discussões que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa;

Ao Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette, pelo auxílio prestado durante parte do desenvolvimento desta pesquisa

À Sra. Vânia, técnica do Laboratório de Cristalografia do Departamento de Química e Física Molecular do IQSC, pelos ensaios realizados;

Aos funcionários do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, em especial à Heloisa H. M. Belo, ao Sr. Ângelo Leoni, ao Sr. Vicente Rafael Daló e ao Sr. Carlos Mariano;

Às Pedreiras Bandeirantes, Santo Antonio, Ouro Fino e Multipedras pela gentileza em cederem as amostras de rocha;

Ao Eng. Sebastião Brito Fernandes, da Prefeitura de Araraquara, pelo apoio na coleta de amostras nas pedreiras pertencentes ao município de Araraquara;

Aos meus amigos Sandra Oda, Sandra Aparecida Margarido, Vânia Maria Pessôa Pampolha, Suelly Helena de A. Barroso, Roberto T. Aramaki, Jairo Salim Pinheiro de Lima e Alexandre Cagnani Foretti.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha para qualificar agregados basálticos. Analisa-se, também, outros ensaios, tais como ensaios analíticos, ensaios físico-mecânicos, ensaios de adesividade e ensaios de alteração, abordando aspectos relacionados à validade e representatividade dos resultados destes na caracterização de agregados basálticos.

Foram estudadas nove amostras de agregados basálticos (quatro sãs e cinco alteradas), originárias de afloramentos existentes em três municípios do interior do estado de São Paulo.

Conclui-se que o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha é promissor para a detecção da alteração de agregados basálticos e que alguns dos ensaios rotineiros não são capazes de distinguir materiais sãos dos alterados, fatos estes observados mediante um estudo comparativo entre o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e os outros ensaios.

ABSTRACT

An estimative of methylene blue adsorption analysis is used to quality basaltic aggregates. It is also analysed others tests like: analytic, physical-mechanics, adhesiveness and alteration tests showing aspects related to the validity and representativeness of the results of these tests for the basaltic aggregation characterization

In this work it is studied nine samples of basaltic aggregations (four considered good and five changed) extracted from stone-quarries located in three different cities in the state of São Paulo.

It is concluded that the methylene blue adsorption test can be promising in detecting the alterability of basaltic samples and also that some routine tests are not able to distinguish good materials from the changed ones. These facts were observed from a comparative study among methylene blue test and other tests.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Esquema de seqüência de conversões químicas do azul de metileno, segundo SHREVE & BRINK (1980). 5
- Figura 2.2 - Variação da adsorção de azul de metileno em função do pH da suspensão para quatro caulinitas, segundo FARUQI et alii (1967). 10
- Figura 2.3 - Capacidade de troca catiônica *versus* superfície específica, segundo PHELPS & HARRIS (1970). 11
- Figura 2.4 - Capacidade de troca catiônica *versus* módulo de ruptura de misturas argilosas, segundo PHELPS & HARRIS (1970). 12
- Figura 2.5 - Variação do consumo de azul de metileno em função da quantidade e do tipo de argila nas misturas, segundo LAN (1980). 16
- Figura 2.6 - Variação da adsorção de azul de metileno em função da composição granulométrica das argilas, segundo LAUTRIN (1987). 21
- Figura 2.7 - Comparação da capacidade de troca catiônica obtida pelo método do Instituto Agronômico de Campinas e pelo ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, segundo PEJON (1992). 25
- Figura 4.1 - Equipamento utilizado no ensaio de alteração por lixiviação contínua com o extrator "Soxhlet". 44

Figura 4.2 - Esquema do equipamento para o ensaio de alteração por lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” (Figura sem dimensões).	45
Figura 4.3 - Fluxograma do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.	53
Figura 5.1 - Valores da densidade real de agregado miúdo.	60
Figura 5.2 - Valores de Desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” e o valor máximo recomendado, segundo DER-SP (1991).	61
Figura 5.3 - Valores de do índice de tenacidade Treton e o valor máximo recomendado, segundo FRAZÃO (1987).	62
Figura 5.4 - Valores das perdas do agregado ao esmagamento e o valor máximo recomendado, segundo MACEDO et alii (1988).	63
Figura 5.5 - Valores de resistência mecânica de agregado pelo método dos 10% de finos e o valor máximo recomendado, segundo MACEDO et alii (1988).	64
Figura 5.6 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” após o ensaio de alteração por lixiviação contínua para 0, 10 e 40 ciclos.	70
Figura 5.7 - Valores dos índices de proporções de metais alcalinos e alcalino-terrosos (I), para 10 e 40 ciclos.	73
Figura 5.8 - Valores de Avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio e o valor máximo recomendado, segundo DER-SP (1991).	75
Figura 5.9 - Valores de azul de metileno (Va).	78
Figura 5.10 - Valor de azul (Va) <i>versus</i> “área” aproximada da “fração fina” da rocha.	78

Figura 5.11 - Valores de azul <i>versus</i> valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.	80
Figura 5.12 - Valores de azul <i>versus</i> valores do índice de tenacidade Treton.	81
Figura 5.13 - Valores de azul <i>versus</i> valores do perdas de agregado ao esmagamento.	82
Figura 5.14 - Valores de azul <i>versus</i> valores da carga para a produção de 10% de finos.	84
Figura 5.15 - Valores de azul <i>versus</i> valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.	85
Figura 5.16 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” <i>versus</i> valores do índice de tenacidade Treton.	87
Figura 5.17 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” <i>versus</i> valores do ensaio de esmagamento.	88
Figura 5.18 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” <i>versus</i> valores de avaliação da resistência mecânica de agregado pelo método dos 10% de finos.	89
Figura 5.19 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” <i>versus</i> valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.	90
Figura 5.20 - Valores do índice de tenacidade Treton <i>versus</i> valores de perda do agregado ao esmagamento.	91
Figura 5.21 - Valores do índice de tenacidade Treton <i>versus</i> valores de avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos.	92
Figura 5.22 - Valores do índice de tenacidade Treton <i>versus</i> valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.	93

- Figura 5.23 - Valores do ensaio de esmagamento *versus* valores de avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos. 94
- Figura 5.24 - Valores do ensaio de esmagamento *versus* valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio. 95
- Figura 5.25 - Valores avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos *versus* valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio. 96

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valores encontrados para a área da molécula de azul de metileno, segundo KIPLING & WILSON (1960).	7
Quadro 2.2 - Capacidade de troca catiônica de vários argilo-minerais, obtidos pela adsorção de azul de metileno e pelo método do acetato de amônio, segundo NEVINS & WEINTRITT (1967).	8
Quadro 2.3 - Valores apresentados na literatura para capacidade de troca catiônica, segundo NEVINS & WEINTRITT (1967).	9
Quadro 2.4 - Superfície específica de argilo-minerais obtidas pelo ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, segundo LCPC (1979).	15
Quadro 2.5 - Superfície Específica das argilas, segundo DENNIS et alii (1980).	17
Quadro 2.6 - Adsorção de azul de metileno <i>versus</i> estados de alterações de rochas magmáticas, segundo DENNIS et alii (1980).	18
Quadro 2.7 - Comparação entre propriedades geotécnicas e valor de azul de certas rochas, segundo DENNIS et alii (1980).	19
Quadro 2.8 - Composições das frações das argilas utilizadas por LAUTRIN (1987).	21
Quadro 2.9 - Valores de adsorção de azul de metileno relatados por SAMESHIMA (1990) et alii segundo HIGGS (1988).	22
Quadro 3.1 - Procedência e localização das amostras coletadas.	28

Quadro 3.2 - Relação das faixas granulométricas e quantidades de material utilizadas na fase experimental.	30
Quadro 3.3 - Identificação das amostras ensaiadas.	31
Quadro 4.1 - Roteiro para avaliação preliminar do estado de alteração e do grau de coerência de rochas, segundo FRAZÃO & AUGUSTO (1994).	35
Quadro 5.1 - Descrição das características macroscópicas e microscópicas e avaliação preliminar do estado de alteração e do grau de coerência de rochas.	56
Quadro 5.2 - Resultados de densidade real de agregado miúdo (método do picnômetro) e dos ensaios físico-mecânicos.	59
Quadro 5.3 - Resultados dos ensaios de adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso e estimativa do grau de descolamento da película betuminosa.	66
Quadro 5.4 - Resultados do ensaio de adesividade de agregado miúdo a ligante betuminoso.	67
Quadro 5.5 - Resultados dos ensaios de alteração por lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” para 10 e 40 ciclos conjugado com desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.	69
Quadro 5.6 - Análise química da água utilizada no ensaio de lixiviação contínua com extrator “Soxhlet”.	71
Quadro 5.7 - Índice de proporções de metais alcalinos e alcalino-terrosos (I).	72
Quadro 5.8 - Resultados do ensaio de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.	74
Quadro 5.9 - Resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.	77

Quadro 5.10 - Posições das amostras em relação a cada ensaio. 99

Quadro 6.1 - Relação entre o consumo de azul de metileno entre os pares de rochas de mesmo local de origem. 101

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	xi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2: A UTILIZAÇÃO DO AZUL DE METILENO	4
2.1. Introdução	4
2.2. Utilização do Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha na Caracterização de Solos e Rochas	6
CAPÍTULO 3: AMOSTRAS ESTUDADAS	27
3.1. Introdução	27
3.2. Localização e Características Geológicas das Amostras	28
3.3. Coleta e Preparação das Amostras.	29
CAPÍTULO 4: PROGRAMA DE ENSAIOS	32

4.1. Introdução	32
4.2. Determinações Analíticas	33
4.2.1. Difractometria de Raios X	33
4.2.2. Análise Petrográfica Macroscópica	34
4.2.3. Análise Petrográfica Microscópica	36
4.3. Determinações Complementares	36
4.3.1. Densidade Real de Agregado Miúdo - Método do Picnômetro	36
4.3.2. Análise Granulométrica por Sedimentação - Método do Densímetro	36
4.4. Ensaio Físico-Mecânicos	37
4.4.1. Desgaste de Agregado por Abrasão “Los Angeles”	37
4.4.2. Determinação do Índice de Tenacidade de Agregados pelo Aparelho Treton	37
4.4.3. Ensaio de Esmagamento	38
4.4.4. Avaliação da Resistência Mecânica de Agregados pelo Método dos 10% de Finos	39
4.5. Adesividade de Agregado a Ligante Betuminoso	39
4.5.1. Adesividade de Agregado Graúdo a Ligante Betuminoso	41
4.5.2. Adesividade de Agregado Miúdo a Ligante Betuminoso	41
4.6. Ensaio de Alteração	42

4.6.1. Ensaio de Alteração por Lixiviação Contínua com Extrator “Soxhlet” conjugado com Desgaste de Agregado por Abrasão “Los Angeles”	42
4.6.2. Avaliação da Durabilidade de Agregados pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio	48
4.7. Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha	49
4.7.1. Aparelhagem e Materiais	49
4.7.2. Preparação da Amostra	50
4.7.3 Execução do Ensaio	50
4.7.4 Resultados	51
CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA	54
5.1. Introdução	54
5.2. Determinações Analíticas	55
5.2.1. Difratometria de Raios X	55
5.2.2. Análises Petrográficas Macroscópicas	55
5.2.3. Análises Petrográficas Microscópicas	58
5.3. Ensaio Físico-Mecânicos e Densidade real de agregado miúdo	58
5.3.1. Densidade Real de Agregado Miúdo - Método do Picnômetro	60
5.3.2. Desgaste de Agregado por Abrasão “Los Angeles”	60

5.3.3. Determinação do Índice de Tenacidade de Agregados pelo Aparelho Treton	62
5.3.4. Ensaio de Esmagamento	63
5.3.5. Avaliação da Resistência Mecânica de Agregados pelo Método dos 10% de Finos	64
5.4. Ensaio de Adesividade de Agregado a Ligante Betuminoso	65
5.4.1. Ensaio de Adesividade de Agregado Graúdo a Ligante Betuminoso	65
5.4.2. Ensaio de Adesividade de Agregado Miúdo a Ligante Betuminoso	66
5.5. Ensaio de Alteração	68
5.5.1. Alteração por Lixiviação Contínua com Extrator “Soxhlet” conjugado com Desgaste de Agregado por Abrasão “Los Angeles”	68
5.5.2. Avaliação da Durabilidade de Agregados pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio	73
5.6. Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha	75
5.7. Discussão dos Resultados do Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha <i>versus</i> Outros Ensaio	79
5.7.1. Valor de Azul (Va) <i>versus</i> Valores de Ensaio Físico-Mecânicos	79
5.7.2. Valor de Azul (Va) <i>versus</i> Valores de Ensaio de Alteração	85

5.8. Discussão dos Resultados dos Outros Ensaios Entre Si	86
5.8.1. Desgaste de Agregado por Abrasão “Los Angeles” <i>versus</i> Outros Ensaios	86
5.8.2. Determinação do Índice de Tenacidade de Agregados pelo Aparelho Treton <i>Versus</i> Outros Ensaios	91
5.8.3. Ensaio de Esmagamento <i>versus</i> Outros Ensaios	94
5.9. Considerações Finais	97
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	100
6.1. Introdução	100
6.2. Principais Conclusões	100
6.2.1. Quanto ao Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha	100
6.2.2. Quanto aos Ensaios Físico- Mecânicos	102
6.2.3. Quanto aos Ensaios de Adesividade	103
6.2.4 Quanto aos Ensaios de Alteração	103
6.2.5 Outras Conclusões	104
6.3. Considerações Finais	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXO I: FOTOS DOS LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS	113
ANEXO II: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X	119

**ANEXO III: MÉTODO DE CÁLCULO DA “ÁREA” APROXIMADA
DAS AMOSTRAS E OS RESULTADOS DOS ENSAIOS
DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR
SEDIMENTAÇÃO**

129

**ANEXO IV: FOTOS DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE
ADESIVIDADE DE AGREGADO GRAÚDO A LIGANTE
BETUMINOSO**

137

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Os agregados pétreos, para fins de utilização em engenharia civil, devem apresentar certas características mínimas de qualidade, notadamente para uso em pavimentação. Existem, para fins de caracterização dos materiais pétreos, inúmeros ensaios de laboratório que procuram estabelecer a qualidade dos agregados em função da sua utilização. Na escolha destes ensaios é importante avaliar a sua aplicabilidade e a validade dos índices fornecidos para a previsão do comportamento dos materiais quando em serviço.

É evidente que não é possível estabelecer qual ou quais ensaios seriam considerados adequados para a utilização em pavimentação. O que se pretende é avaliar o comportamento de cada ensaio frente a um mesmo conjunto de amostras.

Neste trabalho é realizada uma avaliação do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha para a caracterização de agregados basálticos, assim como de outros ensaios mais conhecidos no meio técnico, tais como desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton, esmagamento etc. Para isto foram coletadas nove amostras (quatro comercializadas e cinco alteradas) de cinco pedreiras do interior do estado de São Paulo.

O ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha vem sendo utilizado com sucesso na França (Laboratoires des Ponts et Chaussées) por inúmeros pesquisadores, visando a classificação de solos e rochas. Esta dissertação baseou-se nas idéias lançadas por DENNIS et alii (1980) e HIGGS (1988), que o utilizaram para a caracterização de rochas.

O princípio deste ensaio fundamenta-se no fato de que o azul de metileno é uma molécula polar que, quando em solução aquosa e em contato com materiais pétreos ou solos, é adsorvido à superfície destes materiais devido à atração elétrica. Assim, ele é capaz de avaliar, nos agregados pétreos, a presença de materiais deletérios (argilo-minerais) ou ainda detectar a presença de microfissuramentos, uma vez que a quantidade de corante consumida no ensaio é proporcional à superfície específica do material analisado.

Neste trabalho foi utilizado o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha adaptado por FABBRI (1994), que consiste, simplificada, na determinação, por titulação, da quantidade de azul de metileno consumida por grama de rocha pulverizada.

Além do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, foram utilizados os seguintes ensaios: desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton, esmagamento, avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos, adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso, adesividade de agregado miúdo a ligante betuminoso, avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4) ou de magnésio (MgSO_4) e lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” conjugado com desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.

Esta dissertação está organizada em seis Capítulos e quatro Anexos, que têm os seguintes conteúdos:

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre a utilização da adsorção do azul de metileno ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$) em diversas áreas do conhecimento humano, desde a medicina, farmacologia e indústria têxtil, até sua contribuição para a caracterização de materiais, tanto para uso em indústrias cerâmicas como para a classificação de solos e rochas. São citados trabalhos de diversos pesquisadores que trabalharam nesta área,

bem como as principais conclusões e os índices propostos para a classificação de solos e rochas.

O Capítulo 3 é reservado à descrição, à localização e às características geológicas das amostras que foram estudadas. Por fim, descreve-se o processo de coleta e transporte das amostras, bem como os métodos e nomenclatura adotados e utilizados na execução dos ensaios.

No Capítulo 4 são descritos os métodos de ensaios de laboratório utilizados, que forneceram indícios quanto à qualidade dos agregados pétreos estudados. Neste capítulo os ensaios foram agrupados em cinco grupos, a saber: ensaios analíticos, físico-mecânicos, de alteração, de adesividade e de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa, seguindo a ordem de apresentação utilizada no capítulo anterior. Inicialmente faz-se uma discussão individual de cada ensaio, avaliando a correspondência e aplicabilidade dos resultados obtidos com os valores recomendados na literatura. Em sequência, são efetuados confrontos entre ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e os outros ensaios e, posteriormente faz-se o confronto dos outros ensaios entre si.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões desta pesquisa, que são divididas quanto ao ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e quanto aos outros ensaios utilizados.

Os Anexos I, II, III e IV contêm, respectivamente, as fotos dos locais de coleta das amostras, a interpretação dos ensaios de difratometria de raios X, o método de cálculo da “área” aproximada das amostras e os resultados dos ensaios de análise granulométrica por sedimentação e as fotos dos resultados do ensaio de adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso.

CAPÍTULO 2: A UTILIZAÇÃO DO AZUL DE METILENO

2.1 INTRODUÇÃO

O azul de metileno é um corante orgânico iônico, que origina-se a partir da dimetilanilina, como mostra a Figura 2.1. Atualmente este composto iônico recebe o nome científico de cloreto de tetrametildiaminodifenaztiônio ($C_{16}H_{18}N_3SCL$), possuindo peso molecular 319,9, cor azul Básico nº 9 e a classificação CI 52015, segundo o “Merck Index”. Uma vez hidratado, seu peso molecular aumenta para 373,9, com a inclusão de três moléculas de água ($C_{16}H_{18}N_3SCL.3H_2O$).

Caracteriza-se como um corante catiônico, ou seja, em solução aquosa apresenta-se dissociado em ânions cloreto (CL^-) e cátions azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3S^+$), e colocado em contato com materiais negativamente carregados, suas moléculas são rapidamente adsorvidas mediante um mecanismo de troca iônica irreversível (adsorção).

Segundo CASANOVA (1986), dado o tamanho do cátion azul de metileno, a velocidade de troca ou de adsorção decresce à medida que as posições de troca vão sendo preenchidas. Contudo, ao final do processo a troca é total e cada molécula de azul de metileno ocupa uma área de $132 \text{ \AA}^2$. Sabendo-se isso e mais a quantidade que foi adsorvida pode-se calcular a capacidade de troca catiônica (CTC) e a superfície específica (SE) do material analisado.

Figura 2.1 - Esquema de seqüência de conversões químicas do azul de metileno, segundo SHREVE & BRINK (1980).

O azul de metileno, devido ao mecanismo de adsorção que ocorre quando há a incorporação de uma camada de azul de metileno sobre a superfície de outra substância, é amplamente empregado na medicina e veterinária como antisséptico e antídoto para envenenamento por cianeto e nitrato.

Na farmacologia é útil como pigmento biológico (teste no leite para detectar infecção tubercular, tingimento de bacilos de Koch em tecido de mamífero, corar fibras elásticas e tecido conectivo) e para o tratamento de amigdalites ou faringites agudas via oral. Na indústria química é utilizado como indicador nas reações de oxi-redução, com solução aquosa para determinação fotométrica por extração dos elementos: B, Sb, Ga, In, Pd, Os, Ta. Já na indústria têxtil, para o tingimento de materiais, como juta, linho, seda, lã, couro e papel.

2.2. UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA NA CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS E ROCHAS.

A utilização de corantes para determinação de superfície específica (SE) e capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos, segundo CHEN et alii (1974), iniciou-se com PANETH que, em 1924, testou o uso de corantes para a determinação de superfície específica de sais de chumbo, concluindo que havia a formação de uma camada monomolecular quase que completa de moléculas de azul de metileno adsorvidas sobre as faces dos sais.

MITCHELL et alii (1955) utilizaram o azul de metileno em areias quartzosas, concluindo que as areias recobertas artificialmente com óxidos de ferro (F_2O_3) ou cromo (Cr_2O_3) adsorviam menor quantidade do corantes e que o pH da solução influenciava a quantidade de corante adsorvida.

KIPLING & WILSON (1960) utilizaram o azul de metileno em esferas de carbono não porosas para determinação da área da molécula do corante e obtiveram os valores apresentados pelo Quadro 2.1. Concluíram que o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha não fornece resultados precisos para a determinação da superfície específica de materiais compostos de carbono.

NEVINS & WEINTRITT (1967) discutiram o uso do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha para a determinação da capacidade de troca catiônica (CTC) de várias bentonitas e argilas utilizadas em cerâmicas e estes resultados foram comparados com os obtidos do método do acetato de amônio ($NH_4C_2H_3O_2$).

Estes autores utilizaram o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha desenvolvido por JONES (1964), que consiste, basicamente, da titulação de uma suspensão de solo mais água com uma solução de azul de metileno padronizada, em meio intensamente agitado; após a adição de uma certa quantidade de corante,

retira-se uma gota da solução (corante + água + solo), que é pingada sobre o papel de filtro. Se a mancha formada pela difusão da gota no papel apresentar uma áura azul clara ou esverdeada, significa que há excesso de corante na solução, senão, adiciona-se mais corante e repete-se o teste da mancha até atingir o ponto onde há excesso de corante, designado como ponto de viragem. O ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha será descrito com maiores detalhes no Capítulo 4.

Quadro 2.1 - Valores encontrados para a área da molécula de azul de metileno, segundo KIPLING & WILSON (1960).

Amostras	Temperatura (°C)	Adsorção máxima (mg/g)	Área da molécula de azul de metileno (Å ²)
Spheron 6	20	63	102
	80	68	94
Grafite	20	59	108
	80	64	100

No Quadro 2.2 são apresentadas as capacidades de troca catiônica de diversos argilo-minerais, obtidas por NEVINS & WEINTRITT (1967), pelos ensaios de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e de acetado de amônio.

Já no Quadro 2.3 são apresentados as capacidades de troca catiônica comumente encontradas na literatura, segundo NEVINS & WEINTRITT (1967), para alguns argilo-minerais.

Quadro 2.2 - Capacidade de troca catiônica de vários argilo-minerais, obtidas pela adsorção de azul de metileno e pelo método do acetato de amônio, segundo NEVINS & WEINTRITT (1967).

Amostras	Ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha CTC (meq/100 g)*	Ensaio de acetato de amônio CTC (meq/100 g)*
EG 28 BentonitaWyoming	76,6	77,5
EG 98 BentonitaWyoming	74,5	74,9
EG 20 BentonitaWyoming	77,8	81,9
MI 19 Bentonita Centrifugada	101,0	91,9
EG 16 Bentonita inferior	71,8	76,4
EG 24 Bentonita inferior	69,2	73,2
EG 21 Bentonita Texas	62,2	65,5
EG 21 Bentonita Texas tratada	85,2	83,3
NE 93 Hectorita Centrifugada	117,0	85,5
BI 52 Atapulgita	25,7	22,3
NE 96 Argila nativa	46,2	47,4

* Unidade de capacidade de troca catiônica (CTC) dada em miliequivalente por 100 g de argila.

Ainda, segundo NEVINS & WEINTRITT (1967), os resultados apresentados mostraram que o método de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha forneceu valores próximos aos determinados pelo método de acetato de amônio, sendo que as diferenças foram comumente menores que 5,0 meq/100 g, indicando ser um método prático, com alto grau de reprodutibilidade, precisão e rapidez.

Quadro 2.3 - Valores apresentados na literatura para capacidade de troca catiônica, segundo NEVINS & WEINTRITT (1967).

Amostras	Limite (meq/100 g)
Montmorilonita	80 - 150
Vermiculita	100 - 150
Halosita - $4\text{H}_2\text{O}$	10 - 40
Ilita	10 - 40
Clorita	10 - 40
Sepiolita - Atapulgita	20 - 30
Halosita - $2\text{H}_2\text{O}$	5 - 10
Caulinita	3 - 15

FARUQI et alii (1967) estudaram a adsorção do azul de metileno para quatro amostras de caulinita, variando o pH da suspensão água + argila.

Na Figura 2.2 são apresentados os resultados obtidos por estes autores. Em abcissas está representado o pH da suspensão utilizada no ensaio e em ordenadas, a adsorção do corante azul de metileno. Através dessa pesquisa, FARUQI et alii (1967) concluíram que, quanto maior o pH da suspensão água + argila, maior a adsorção de azul de metileno.

Figura 2.2 - Variação da adsorção de azul de metileno em função do pH da suspensão para quatro caulinitas, segundo FARUQI et alii (1967).

PHELPS & HARRIS (1968) correlacionaram os resultados da superfície específica (SE), determinada pela adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, com a capacidade de troca catiônica (pelo método do acetato de amônio) e da capacidade de troca catiônica, determinada pela adsorção de azul de metileno, com o módulo de ruptura de argilas utilizadas para cerâmica, conforme mostrado nas Figuras 2.3 e 2.4.

A Figura 2.3 mostra a variação da capacidade de troca catiônica em função da superfície específica, obtida do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha, para vinte e nove argilas. A relação é direta e apresenta um coeficiente de correlação de 0,926.

Figura 2.3 - Capacidade de troca catiônica versus superfície específica, segundo PHELPS & HARRIS (1970).

Na Figura 2.4 são apresentados os resultados da capacidade de troca catiônica, através do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha versus o módulo de ruptura de misturas argilosas. A relação é direta e apresenta um coeficiente de correlação de 0,847. Os resultados permitiram prever o módulo de ruptura das argilas a partir da capacidade de troca catiônica determinada com o ensaio de azul de metileno pelo método da mancha.

Figura 2.4 - Capacidade de troca catiônica versus módulo de ruptura de misturas argilosas, segundo PHELPS & HARRIS (1970).

HANG & BRINDLEY (1970) concluíram, por meio de difração de raio X, que a face da molécula de azul de metileno que é adsorvida pelo solo possui uma área entre 130 e 135 Å², sendo um paralelogramo de lados com dimensões aproximadas de 17,0 x 7,6 x 3,25 Å. Ainda segundo os autores, a determinação da superfície específica, SE, (área interna + área externa) é possível quando a superfície dos argilo-minerais fica recoberta por uma camada monomolecular de cátions azul de metileno, permitindo, desta forma, conhecida as dimensões desta molécula, conhecer-se a área total recoberta.

A partir disto, estes autores determinaram a superfície específica (SE) e a capacidade de troca catiônica (CTC) de duas caulinitas, uma ilita e uma montmorilonita utilizando o ensaio de azul de metileno pelo método colorímetro.

O ensaio de azul de metileno pelo método do colorímetro fundamenta-se no princípio que a intensidade de coloração de uma solução de azul de metileno é proporcional a sua concentração. Desta forma, obtendo-se a curva padrão para o azul de metileno e conhecendo-se a concentração inicial da solução, pode-se, após um intervalo de tempo de contato entre a solução de azul de metileno e uma suspensão aquosa de material argiloso ou de solo, determinar-se, por meio de um colorímetro, a concentração de azul de metileno na solução restante, obtendo-se, por diferença de concentração, a quantidade de azul de metileno adsorvido.

Estes autores discutiram e classificaram o mecanismo de interação do azul de metileno com argilo-minerais em dois tipos: troca catiônica e adsorção.

Na troca catiônica, a molécula do azul de metileno dissocia-se na água e forma cátion de azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3S^+$), que pode permutar com os cátions das argilas. Esta troca é uma reação preferencial que fixa o cátion de azul de metileno na superfície dos argilo-minerais; também, após os cátions das argilas terem sido trocados pelo cátion de azul de metileno, as superfícies de argilas transformam-se num estado não-molhável ou hidrofóbico. A troca catiônica de azul de metileno é considerada uma reação química irreversível. Quando os cátions de azul de metileno na solução foram totalmente trocados, a solução fica límpida e incolor e as argilas assumem a cor azul. Já a adsorção de azul de metileno inclui primeiro o mecanismo de absorção¹ e, em seguida, o de adsorção²; assim, segundo estes autores, a interação da solução aquosa de azul de metileno com argilo-minerais é melhor escrita como uma “ab-adsorção”.

CHEN et alii (1974) determinaram a superfície específica (SE) e capacidade de troca catiônica (CTC) de argilas brasileiras com o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e fizeram correlações com os resultados das seguintes propriedades tecnológicas: composição química, umidade de prensagem, retração linear, tensão de ruptura, absorção de água, porosidade e perda ao fogo.

¹ Absorção: penetração de uma substância nos interstícios do corpo de outra.

² Adsorção: incorporação de uma substância à superfície de outra.

Segundo estes autores, o cátion azul de metileno substitui os cátions Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} e H_3O^+ adsorvidos nos argilo-minerais, ocorrendo um processo de adsorção irreversível, caracterizando-se como uma forma de medida da capacidade de troca de cátions. Concluíram que os resultados permitem prever algumas propriedades tecnológicas utilizadas na indústria cerâmica.

LAN (1977), do LCPC (Laboratoires des Ponts et Chaussées), estudou o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha para caracterização de solos e correlacionou os resultados com o índice de plasticidade e com o equivalente areia. Com este trabalho, as pesquisas no LCPC evoluíram e em 1979 foi publicado o anteprojeto de padronização do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

Neste anteprojeto no LCPC, foi definido o coeficiente de atividade das frações granulométricas dos solos como sendo a razão entre o “valor de azul” (Vb) do solo multiplicado por 100 e a porcentagem que o solo possui na peneira em análise (por exemplo, para $\% < 2\mu\text{m}$). Dessa forma, o coeficiente de atividade da fração granulométrica menor que 0,002 mm é calculado segundo a expressão:

$$CA_2 = \frac{Vb \times 100}{\% < 2\mu\text{m}} \quad (2.2)$$

onde:

CA_2 : coeficiente de atividade do solo para a fração menor que 0,002 mm;

Vb: valor de azul do solo (g/100 g de solo);

$\% < 2\mu\text{m}$: porcentagem do solo menor que 0,002 mm.

O valor de azul (Vb) foi definido como a quantidade de corante adsorvido por 100 g de solo. Assim, pode-se avaliar o grau de poluição de areias e de materiais granulares pelas argilas, bem como a argilosidade de solos dentro do domínio da geotecnia, em

função do consumo de corante ou da superfície específica do material analisado. No Quadro 2.4 estão os valores de superfície específica de argilo-minerais típicos apresentados nesse anteprojeto no LCPC (1979).

Quadro 2.4 - Superfície específica de argilo-minerais obtidas pelo ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, segundo LCPC (1979).

Tipo de argila	Superfície Específica (m²/g)
montmorilonita	800
vermiculita	200
ilita	40-60
caulinita	5-20

Lan (1980) apresentou dados da variação do consumo de azul de metileno por misturas artificiais de argilas (bentonita + ilita, bentonita + caulinita e ilita + caulinita) com variação de teor de 0 a 100%. Estes resultados são apresentados na Figura 2.5.

Pode-se observar, através da Figura 2.5, que o consumo de azul de metileno por misturas artificiais de argilas variou linearmente em função da porcentagem de cada tipo de argila. O autor concluiu que a quantidade de azul de metileno adsorvida por uma mistura foi igual à soma ponderada das quantidades de azul de metileno adsorvidas pelos tipos argilosos que estão presentes em sua composição.

Figura 2.5 - Variação do consumo de azul de metileno em função da quantidade e do tipo de argila nas misturas, segundo LAN (1980).

DENNIS et alii (1980) utilizaram o ensaio de azul de metileno pelo método da mancha para medir a capacidade de absorção de água e expansão de solos e rochas. Segundo estes autores, certas alterações que ocorreram em rochas e solos resultaram no aparecimento de minerais hidrófilos (filosilicatos, argilas, silicatos e óxidos de ferro hidratado) trazendo conseqüências a certas propriedades geotécnicas. O azul de metileno tem a vantagem de não se fixar sobre os minerais inertes (quartzo, calcita) podendo, assim, caracterizar uma certa “atividade” da fase argilosa sem haver a necessidade de se separar essas partículas da rocha ou solo.

O cálculo da superfície específica resulta da adsorção do azul de metileno na face externa e interna da argila, portanto de toda superfície acessível à água. DENNIS et alii (1980) compararam medidas de superfície específica obtidas pelos métodos BET e do etileno-glicol com as obtidas pelo de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e os resultados são apresentados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Superfície Específica das argilas, segundo DENNIS et alii (1980)

Métodos utilizados	Superfície Específica (m ² /g)			Tipo de superfície medida
	Caulinita	Ilita	Montmorilonita	
BET	22	113	82	externa
Etileno-glicol	45	90	750-800	externa + interna
Adsorção de azul de metileno pelo método da mancha	48	74	860	externa + interna

Foram estudadas ainda, por DENNIS et alii (1980), rochas magmáticas que apresentaram vários estados de alteração. Observando-se os resultados apresentados no Quadro 2.6, nota-se que com o aumento do grau de alteração das rochas há um crescimento do valor de azul de metileno consumido, indicando, possivelmente, a presença de uma quantidade maior de argilo-minerais nestas rochas. Já os resultados apresentados no Quadro 2.7 indicaram que, para o basalto, quanto maior a resistência à compressão da amostra, menor a porcentagem de poros e menor o consumo de azul de metileno, ou seja, o valor de azul de metileno foi relacionado com algumas propriedades das rochas.

LAN (1981) descreveu o ensaio de azul de metileno pelo método da mancha e o coeficiente Vb^3 calculado a partir do resultado deste ensaio. Apresentou correlações entre o Vb e o coeficiente de atividade de Skempton, expondo sua proposta de complementação da classificação de solos RTR (Recommandation pour Terrassements Routiers) com a introdução deste ensaio.

³ Valor de azul do solo (g de azul de metileno/100 g de solo).

Quadro 2.6 - Adsorção de azul de metileno versus estados de alterações de rochas magmáticas, segundo DENNIS et alii (1980).

Rochas		Microscópio	Raios X	Valor de Azul (g de azul de metileno/100 g de material)
Granito LH 1	Profundidade de extração crescente ↑	Ortoclásio	Cloritas +	0,11
Granito LH 2		Quartzo Biotita	Cloritas +	0,34
Granito LH 3		Alteração crescente de feldspatos	Cloritas ++	0,46
Rocha 1	Alteração crescente ↓	Augita Nefélina Plagioclásio	Montmor +	0,60
Rocha 2		Augita Nefélina Plagioclásio	Montmor ++ Goetita +	2,97
Rocha 3		Plagioclásio: alteração total de Augita e feldspatóides	Montmor ++++ Goetita ++	6,60

CASANOVA (1986) analisou trinta e cinco amostras de solos lateríticos brasileiros, abrangendo uma ampla faixa de variação granulométrica, de plasticidade e de composição químico-mineralógica, com o objetivo de caracterização e controle de qualidade aplicados à pavimentação. Foram estudados solos lateríticos com razão sílica-alumina (Ki) entre 0,37 a 1,97 e razão sílica-sesquióxidos (Kr) variando de 0,27 a 1,93. Nesses solos foram determinadas a superfície específica (SE) e a capacidade de troca catiônica (CTC) pelos métodos tradicionais e os resultados foram comparados com os obtidos a partir de ensaios de azul de metileno pelo método da mancha. Os resultados indicaram uma boa correlação entre a CTC obtida pelos métodos tradicionais e a obtida pelo ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, sendo que, para todos os solos analisados, a CTC pelo ensaio de azul de metileno pelo método da mancha foi sempre menor que a obtida pelo método tradicional.

Quadro 2.7 - Comparação entre propriedades geotécnicas e valor de azul de certas rochas, segundo DENNIS et alii (1980).

Rochas Naturais	Ref.	Porosidade (%)	Aumento de Volume 10^{-4}	Valor de Azul (g %)	Resistência à Compressão (R_{cw}) (MPa)	(1) (ΔR_c) (%)	(2) Δ Desgaste
Granito	LH1	0,8	0,5	0,11	192	19	7
Granito	LH4	5	2,3	0,14	41	37	28
Granito	LA1	1,4	1,1	0,14	153	26	8
Granito	LA2	3,6	2,1	0,14	82	27	18
Aplito	SC1	0,3	0,7	0,25	365	19	1
Aplito	SC2	0,9	1,7	0,34	249	13	5
Gabro	NA	0,2	0	0,04	250	-	1
Basalto	RE	0,4	0	0,11	400	-	4
Basalto	RO	1,2	4,8	1,25	242	21	26
Rocha A	NO1	2	1,9	0,60	170	24	7
Rocha B	NO2	6,3	10	2,97	132	24	26
Calcário	MA	0,5	0	0,06	138	0	10
Calcário	BE	16,5	7,6	0,97	50	64	70
Calcário	AN	5	0,6	0,1	166	22	13
Arenito	AN	10,5	5	0,32	71	41	61
Arenito	LO	4	3	0,43	182	26	24
Arenito	CF1	0,8	0,6	0,14	247	21	5
Arenito	CF2	5,8	8	0,18	64	28	50
Arenito	CH	0,3	0	0,07	378	-	7
Pelito	EA1	0,4	0,5	0,64	137	13	11
Pelito	EA2	15	60	2,50	20	80	82

(1) R_{cw} = Resistência da rocha saturada.

(2) Aumento de desgaste em presença de água no ensaio Micro Deval.

CASANOVA (1986) citou ainda que não houve uma completa adsorção do azul de metileno pela matéria humificada; que os materiais paracristalinos e amorfos adsorviam pequena quantidade de azul de metileno e que não houve adsorção de azul de metileno pelos óxidos e hidróxidos livres de ferro e alumínio (goetita, gibsit). Tais fatores contribuíram para a aplicação do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, pois como a matéria orgânica, os oxi-hidróxidos livres e o material amorfo praticamente não adsorviam azul de metileno, o método media

essencialmente a capacidade de troca catiônica dos argilo-minerais presentes nas amostras. Este autor concluiu que o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha deve ser adotado como meio para a caracterização de solos lateríticos, uma vez que propiciou uma maneira rápida, simples e eficaz de determinar as propriedades químicas e físico-químicas de superfície dos solos lateríticos.

LAUTRIN (1987) estudou 99 amostras de solos contendo proporções variadas de argilo-minerais e definiu um método para identificação do tipo de argilo-mineral a partir do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

Foi definido, por LAUTRIN (1987), um índice de nocividade (N), como sendo a razão entre a massa de azul de metileno necessária para recobrir com uma camada monomolecular as partículas contidas em 100 g de um solo e a porcentagem da fração do solo menor que # 0,002 mm, conforme mostra a expressão apresentada a seguir:

$$N = \frac{100 \times Vb}{C_2} \quad (2.2)$$

onde:

N: índice de nocividade;

Vb: valor de azul adsorvido (g/100 g de solo);

C₂: porcentagem do solo que passa na # 0,002 mm.

LAUTRIN (1987) procurou associar o valor da adsorção de azul de metileno (Vb) com a mineralogia das argilas. Desta forma, estabeleceu a influência da mineralogia das argilas sobre a adsorção do azul de metileno.

O Quadro 2.8 apresenta as composições das amostras e a Figura 2.6 apresenta a influência da composição no Vb. Nesta figura verifica-se que houve relação direta entre o aumento da porcentagem de argila e o aumento da adsorção de azul de metileno. Nota-se ainda que, com a variação da proporção de diferentes tipos de argila dentro da fração argilosa, ocorreram mudanças na quantidade adsorvida.

Quadro 2.8 - Composições das frações argila utilizadas por LAUTRIN (1987).

Amostra	Caulinita (%)	Ilita (%)	Montmorilonita (%)
A	100	0	0
B	95	5	0
C	95	0	5
D	0	100	0
E	80	0	20
F	10	45	45
G	0	98	2
H	15	0	85
I	10	0	90

Figura 2.6 - Variação da adsorção de azul de metileno em função da composição das argilas, segundo LAUTRIN (1987).

Segundo LAUTRIN (1987), para argilo-minerais puros, encontraram-se os seguintes valores do índice de nocividade: 1 a 2 para caulinitas, 4 e 5 para as ilitas e 18 a 20 para as montmorilonitas. Sua conclusão foi que o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha é um excelente ensaio para a caracterização de solos, fornecendo um meio de qualificar sua fração fina.

HIGGS (1988) utilizou o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha para verificar a presença de argilo-minerais (esmectitas) em rochas sedimentares e materiais provenientes de brechas. Utilizou amostras moídas e passadas na #0,074 mm, tratadas com uma solução de azul de metileno com concentração de 4,5 g/l.

SAMESHIMA (1980) et alii, segundo HIGGS (1988), relataram alguns valores básicos de adsorção de azul de metileno, conforme apresentado no Quadro 2.9.

Quadro 2.9 - Valores de adsorção de azul de metileno relatados por SAMESHIMA et alii (1980) segundo HIGGS (1988).

argilo- minerais	esmectita- sódica	esmectita- cálcica	ilita pura	caulinita e halosita	clorita	nontronita
MBA(ml/2g)	148,0	49,0	14,6	7,0	4,8	39,0

Segundo HIGGS (1988), o limite de adsorção de azul de metileno para as argilas do grupo das esmectitas é de 15 ml para 1g de amostra. Portanto, se amostra tem uma adsorção maior que 15, conterà, necessariamente, esmectita em sua constituição.

TOURENQ & LAN (1989) descreveram o princípio do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha e sua aplicação na caracterização de rochas, no controle de misturas estabilizadas granulometricamente, na avaliação da argilosidade de solos e no controle de qualidade de agregados para construção.

HUET (1989) utilizou o ensaio de azul de metileno pelo método da mancha para a qualificação de “filler” para misturas asfálticas e estabeleceu que, para garantir um produto de boa qualidade, o agregado utilizado deve possuir um equivalente de areia superior a 60% ou um valor de azul (Vb) inferior a 1.

FABBRI & SÓRIA (1991) utilizaram o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha para fins de classificação de solos, tendo sido ensaiadas quarenta e cinco amostras de solos provenientes de diversos locais do estado de São Paulo, com a finalidade de verificar a variação do consumo de corante em função da classe dos solos obtida da classificação MCT⁴.

Para a avaliação da “atividade” dos argilo-minerais presentes nos solos, estes autores definiram um coeficiente de atividade (CA), semelhante ao índice de nocividade de LAUTRIN (1987), conforme a expressão apresentada a seguir:

$$CA = 100 \frac{VT}{P_F} \quad (2.3)$$

onde:

CA: coeficiente de atividade ($10^{-3} \text{ g/g\%}$);

P_F: porcentagem, em peso, que o solo contém da fração que se quer avaliar a atividade;

VT: volume total de solução de azul de metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral seco (ml) (com concentração de 1,0 g de sal anidro por litro de solução).

Como o ensaio foi executado com 1 g da fração do solo que passa na #0,074 mm, para o cálculo do volume total (VT) tornou-se necessário levar em consideração a

⁴ A classificação MCT é um sistema de classificação de solos proposto por NOGAMI & VILLIBOR (1981), que, entre outras características, permite agrupar os solos em duas classes, conforme seu comportamento quando compactado, a saber: laterítico (L) e não laterítico (N). Esta nova metodologia foi designada de MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) devido ao fato de usar corpos de prova de dimensões reduzidas.

porcentagem que o solo teve nesta peneira e o teor de umidade que possui no momento do ensaio. Este cálculo foi realizado segundo a seguinte expressão:

$$VT = V \times \frac{P_{200}}{100} \times \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad (2.4)$$

onde:

VT: volume total de azul de metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral (ml);

V: volume de azul de metileno adicionado à suspensão durante o ensaio (ml);

P_{200} : porcentagem de solo que passa na #0,074 mm;

w: teor de umidade do solo (%).

Esses autores verificaram que existe uma boa concordância entre o índice e' da classificação MCT (índice que caracteriza o “caráter” laterítico do solo) e o coeficiente de atividade proposto (CA), tanto para ensaios com variação de pH como para os diferentes diâmetros que definem a fração ativa.

PEJON (1992) utilizou o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha para caracterizar solos para fins de mapeamento geotécnico. Foi realizado o ensaio com a fração granulométrica passada na #2,00 mm e com uma concentração da solução de azul de metileno de 1,5 g/l, devido à baixa adsorção do corante pelos solos tropicais.

Com os resultados dos ensaios, foram calculados a capacidade de troca catiônica (CTC), a superfície específica (SE), o valor de azul do solo (V_b) e o valor de azul da fração argila (A_{cb}). A CTC obtida do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha foi comparada, para cinquenta e três amostras, com a obtida pelo método utilizado no Instituto Agronômico de Campinas, sendo conseguida uma boa correlação entre os dois resultados, conforme mostrado na Figura 2.7. Obteve-se um coeficiente de correlação igual a 0,90.

PEJON (1992) avaliou ainda o comportamento laterítico ou não dos solos utilizando o Vb (quantidade de azul de metileno, em peso, consumida por 100 g de solo) juntamente com os resultados da classificação MCT. Concluiu que, para as cento e oito amostras analisadas, o Vb distinguiu, com uma probabilidade de 85% de acerto, os solos de comportamento laterítico dos de comportamento não laterítico. Este autor utilizou ainda o valor de azul da fração argila do solo - Acb (quantidade de azul de metileno, em peso, consumida por 100 g da fração argilosa do solo) para avaliar a atividade do argilo-mineral presente.

Figura 2.7 - Comparação da capacidade de troca catiônica obtida pelo método do Instituto Agronômico de Campinas e pelo ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, segundo PEJON (1992).

FABBRI (1994) apresentou uma proposta para caracterização da fração fina de solos tropicais, baseada na superfície específica dos argilo-minerais nela presentes, medida pelo ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha. A partir da superfície específica, determinada pela adsorção do corante azul de metileno, foram

estabelecidos graus de atividade para os solos analisados. Esta atividade foi então comparada com a previsão de comportamento dos solos, obtida da classificação MCT. Este autor concluiu que a utilização da adsorção de azul de metileno é promissora para a caracterização da fração fina de solos tropicais, permitindo estabelecer, com razoável segurança, a atividade dos argilo-minerais presentes e ainda que existe uma boa concordância entre os resultados da adsorção de azul de metileno e os fornecidos pela classificação MCT para solos tropicais.

CAPÍTULO 3: AMOSTRAS ESTUDADAS

3.1 INTRODUÇÃO

Foram estudadas nove amostras de rochas basálticas provenientes de afloramentos da Bacia Sedimentar do Paraná. Estas amostras foram coletadas aos pares em cinco pedreiras do interior do estado de São Paulo, ou seja, uma amostra considerada “comercializada” e outra “alterada” para cada pedreira, com exceção da Pedreira de Dois Córregos, onde coletou-se somente uma amostra considerada “alterada”, por esta pedreira estar desativada.

As amostras que foram denominadas “alteradas” são aquelas que apresentavam indícios visuais de alteração (cor e textura) e foram coletadas em forma de blocos de rocha, que estavam armazenados em pilha de rejeitos das pedreiras.

As amostras denominadas “comercializadas” são as que apresentavam melhores indicadores de qualidade em relação ao seu par “alterada” para a mesma pedreira e foram coletadas já britadas, diretamente nas saídas das correias transportadoras dos britadores das pedreiras.

Cabe ressaltar que a única amostra coletada da Pedreira de Dois Córregos, denominada como “alterada”, apresenta características macroscópicas próprias como a presença de vidro vulcânico¹ e um menor grau de alteração em relação as amostras denominadas “alteradas” das outras pedreiras.

¹ Material não cristalino presente em rochas resultantes do magmatismo extrusivo decorrente de um resfriamento extremamente rápido.

3.2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DAS AMOSTRAS

Todos os afloramentos em que as amostras foram retiradas pertencem a municípios do interior do Estado de São Paulo (Araraquara, Dois Córregos e São Carlos), conforme apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Procedência e localização das amostras coletadas.

Procedência	Localização
Pedreira Bandeirantes	Município de São Carlos (SP), no Jardim Beatriz
Pedreira Dois Córregos	Rodovia Eng. Paulo Nilo Romano (SP-225), quilômetro 156, situada no município de Dois Córregos (SP)
Pedreira Multipedras	Estrada vicinal ARA-466, a cinco quilômetros da Rodovia Washington Luís (SP 310), situada no município de Araraquara (SP)
Pedreira Ouro Fino	Estrada vicinal Abílio A. Corrêa (ARA-050), a cinco quilômetros da Rodovia Washington Luís (SP 310), situada no município de Araraquara (SP)
Pedreira Santo Antonio	Estrada vicinal Abílio A. Corrêa (ARA-050), a quatro quilômetros da Rodovia Washington Luís (SP 310), situada no município de Araraquara (SP)

As amostras estudadas pertencem a Formação Serra Geral que se encontra no Grupo São Bento, caracterizando-se por rochas vulcânicas toleíticas dispostas em derrames basálticos, com coloração cinza a negra e textura afanítica, segundo o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (IPT-1981).

3.3. COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram coletadas manualmente, em uma quantidade aproximada de 200 quilogramas cada, e transportadas até o Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC.

As amostras “alteradas” foram coletadas em forma de blocos de rocha, que estavam armazenados na pilha de rejeitos das pedreiras. Os blocos de rocha foram quebrados, no laboratório, em pedaços menores com o auxílio de uma marreta, resultando numa amostragem média do grau de alteração dos blocos, para que fossem posteriormente submetidos à fragmentação, por meio de um britador de mandíbula Briterpa 1020 com abertura de saída regulada ($\frac{3}{4}$ ” e $\frac{1}{2}$ ”), no Laboratório de Geologia do Departamento de Geotecnia da EESC.

As amostras “comercializadas” foram coletadas já britadas, diretamente nas saídas das correias transportadoras dos britadores de mandíbulas das pedreiras, para brita 0 (diâmetro 9,5-1,2 mm), brita 1 (diâmetro 19,0-4,8 mm), brita 2 (diâmetro 25,0-9,5 mm) e brita 3 (diâmetro 50,0-25,0 mm), que são destinadas pelas pedreiras à pavimentação.

O Anexo II apresenta as figuras² que ilustram os locais de coleta (pedreiras) das amostras “comercializadas” e “alteradas” utilizadas neste estudo.

Após a etapa de coleta, os materiais foram separados em diferentes faixas granulométricas e quantidades, conforme Quadro 3.2, de acordo com as especificações de cada ensaio a realizar. Esta separação efetuou-se através do peneiramento manual, em seguida os materiais foram embalados em sacos plásticos e numerados para facilitar a identificação durante o estudo experimental.

² Todas as figuras são fotos originais e coloridas.

Quadro 3.2 - Relação das faixas granulométricas e quantidades de material utilizadas na fase experimental.

Ensaio	Passa na peneira (mm)	Retido na peneira (mm)	Amostras (g)
Densidade real do agregado miúdo	4,76	2,0	500
Análise granulométrica por sedimentação	0,074	-	60
Desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” (Graduação B)	19,1 12,7	12,7 9,52	2500 ± 50 2500 ± 50
Determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton	19,1	15,9	15 a 20 fragmentos
Esmagamento	12,7	9,52	3000
Avaliação da resistência mecânica de agregado pelo método dos 10 % de finos	12,7	9,52	3000
Adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso	19,1	12,7	500
Adesividade de agregado miúdo a ligante betuminoso	4,76	2,38	50
Lixiviação contínua com extrator “Soxhlet”	19,1	12,7	4000
	12,7	9,52	4000
Avaliação da durabil. de agreg. pelo empr. de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio	12,7	9,52	1000
Adsorção de azul de metileno pelo método da mancha	0,074	-	100

As amostras foram numeradas, no laboratório, em função de seu local de origem. Para os locais onde foram coletados pares de amostras, identificou-se as amostras “comercializadas” por números ímpares e as “alteradas” por números pares, sendo

que as amostras provenientes de uma mesma pedreira receberam números consecutivos, como mostra o Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Identificação das amostras ensaiadas.

Local	Identificação	Local	Identificação
Pedreira Santo Antonio Rocha Comercializada	1	Pedreira Santo Antonio Rocha Alterada	2
Pedreira Multipedras Rocha Comercializada	3	Pedreira Multipedras Rocha Alterada	4
Pedreira Ouro Fino Rocha Comercializada	5	Pedreira Ouro Fino Rocha Alterada	6
Pedreira Bandeirantes Rocha Comercializada	7	Pedreira Bandeirantes Rocha Alterada	8
		Pedreira Dois Córregos Rocha Alterada	10

CAPÍTULO 4: PROGRAMA DE ENSAIOS

4.1. INTRODUÇÃO

A utilização de agregados rochosos em engenharia civil exige certas características mínimas de qualidade, notadamente para uso em pavimentação. Para isso devem ser conhecidas algumas propriedades que influem no comportamento da rocha, tais como: composição mineralógica, textura, estrutura, índices físicos, presença de substâncias deletérias (argilo-minerais), resistência ao desgaste, resistência ao impacto (tenacidade), resistência ao esmagamento e alterabilidade. Para tal fim, existem inúmeros ensaios de laboratório que procuram estabelecer a qualidade dos agregados em função da sua utilização.

Neste capítulo são descritos os ensaios realizados durante a pesquisa e que foram divididos em seis grupos:

- a) Determinações analíticas: Difratometria de raios X, Análise petrográfica macroscópica e Análise petrográfica microscópica;
- b) Determinações complementares: Densidade real de agregado miúdo (método do picnômetro) e Análise granulométrica por Sedimentação (método do densímetro);
- c) Ensaio físico-mecânicos: Desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, Determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton, Esmagamento e Avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos;
- d) Ensaio de adesividade: Adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso e Adesividade de agregado miúdo a ligante betuminoso;

- e) Ensaio de alteração: Lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” e Avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4) ou de magnésio (MgSO_4);
- f) Ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

Descrevem-se, a seguir, todas as etapas e os procedimentos realizados no laboratório para a caracterização das amostras “comercializadas” e “alteradas” coletadas nas pedreiras.

4.2. DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS

4.2.1. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Os ensaios de difratometria de Raios X têm a finalidade de identificar os minerais cristalinos presentes na rocha. O fato dos cristais funcionarem como redes de difração para os raios X faz com que possam ser identificados pela mencionada radiação.

As amostras submetidas a este ensaio, obtidas através de peneiramento de finos produzidos no ensaio de Desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, foram passadas na peneira #0,074 mm e submetidas à difratometria de raios X pelo Método do Pó, no Laboratório de Cristalografia do Departamento de Química e Física Molecular do Instituto de Química de São Carlos da USP. Utilizou-se tubo de raios X de cobre, corrente de 20 mA, diferença de potencial de 40 kV.

No Anexo II apresenta-se a interpretação dos difratogramas de raios X, para detectar a presença de minerais, que foi realizada com o auxílio de informações contidas em BRINDLEY & BROWN (1980).

4.2.2. ANÁLISE PETROGRÁFICA MACROSCÓPICA

As análises petrográficas macroscópicas foram realizadas seguindo-se o roteiro adotado no IPT, segundo FRAZÃO & AUGUSTO (1994), conforme apresentado no Quadro 4.1.

Neste quadro foram reunidas as principais características macroscópicas das rochas e suas relações com o seu estado de alteração e coerência. Estes critérios podem ser adotados em caráter preliminar para caracterização rotineira de rochas para uso na construção civil.

SCHNEIDER & PIRES (1968) citaram como indicadores de boa qualidade as seguintes características macroscópicas dos basaltos: cor preta, fratura uniforme, arestas e cantos vivos, ausência de vazios e de fissuras. Ao contrário, as características indicadoras de má qualidade seriam: cores claras (cinza-claro, cinza-esverdeado, etc), abundância de vazios, fraturas irregulares, arestas e cantos arredondados e alta produção de pó na britagem.

A estas características pode-se acrescentar o teste de impacto com martelo que, para basaltos sãos, haverá emissão de sons agudos, enquanto que para basaltos alterados resultará sons abafados (sons graves).

Pode-se, também, submeter a amostra a umedecimento com água, que, para basaltos alterados, resultará em escurecimento, com demora na recuperação da cor original.

As características macroscópicas não são, entretanto, suficientes para avaliar a qualidade da rocha, havendo necessidade de efetuar-se a uma análise petrográfica microscópica, que fornecerá informações para uma melhor interpretação dos ensaios realizados.

Quadro 4.1 - Roteiro para avaliação preliminar do estado de alteração e do grau de coerência de rochas, segundo FRAZÃO & AUGUSTO (1994).

Parâmetro	Rocha	Sigla	Característica
ALTERAÇÃO	Sã	A1	- Macroscopicamente não há indícios de alterações físicas e/ou químicas dos minerais. - Minerais apresentam brilho.
	Pouco Alterada	A2	- Alteração incipiente dos minerais. - Em geral a rocha exibe pouca descoloração.
	Medianamente Alterada	A3	- Minerais medianamente alterados, geralmente não apresentam brilho. - Rocha bastante descolorida.
	Muito Alterada	A4	- Minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis, totalmente sem brilho.
COERÊNCIA	Coerente	C1	- Quebra com dificuldade ao golpe do martelo produzindo poucos fragmentos e com bordas cortantes. - Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço.
	Medianamente Coerente	C2	- Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo produzindo fragmentos com bordas quebradiças por pressão dos dedos. Superfície riscável com lâmina de aço, deixando sulcos leves.
	Pouco Coerente	C3	- Quebra com muita facilidade ao golpe do martelo (esfarela) produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície riscável com lâmina de aço, deixando sulcos profundos.
	Incoerente	C4	- Quebra facilmente com pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço.

4.2.3. ANÁLISE PETROGRÁFICA MICROSCÓPICA

A análise petrográfica microscópica foi executada através de exame de lâminas delgadas em microscópio óptico. Através destas análises microscópicas pode-se qualificar os minerais são e alterados existentes em uma rocha a partir da análise da interferência sofrida pela luz polarizada ao atravessar lâminas delgadas de rocha. Para isto, as lâminas foram preparadas, através de corte e desgaste com materiais abrasivos e posteriormente analisadas no Laboratório de Geologia do Departamento de Geotecnia da EESC.

4.3. DETERMINAÇÕES COMPLEMENTARES

4.3.1. DENSIDADE REAL DE AGREGADO MIÚDO - MÉTODO DO PICNÔMETRO

Os ensaios de densidade real de agregado miúdo pelo método do picnômetro foram realizados conforme o método ME 84-64 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

4.3.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO MÉTODO DO DENSÍMETRO

Foram realizados um ensaio de análise granulométrica por sedimentação pelo método do densímetro para cada amostra, segundo o método ME 51-64 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Os resultados são apresentados no Anexo III.

4.4. ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS

4.4.1. DESGASTE DE AGREGADO POR ABRASÃO “LOS ANGELES”

É um ensaio onde a rocha é submetida tanto ao desgaste superficial, através do atrito entre os agregados e as cargas abrasivas e os agregados entre si, como também a impactos, devido à ação da queda que os agregados sofrem, em cada volta, com a parede interna da máquina de abrasão “Los Angeles”.

Foram executados três ensaios de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” para cada amostra, segundo o método ME 35-64 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, na graduação B e determinou-se a média aritmética.

4.4.2. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TENACIDADE DE AGREGADOS PELO APARELHO TRETON

O ensaio de determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton, adaptado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT - ME - 52), foi desenvolvido para medir quantitativamente o comportamento de uma amostra de rocha ao impacto. O valor obtido é importante nos casos onde a rocha é submetida a impactos repetidos, seja como material solto, seja com ligante. Sua principal aplicação é na escolha de materiais rochosos para pavimentos, pistas de aeroportos e lastros para vias férreas.

Segundo YOSHIDA (1972), a resistência ao impacto é influenciada pelas características petrográficas, tais como: composição mineralógica e textura. Em

rochas ígneas, os grãos cristalinos geralmente estão fortemente interligados constituindo uma textura densa e ocasionando elevadas resistências ao impacto.

4.4.3. ENSAIO DE ESMAGAMENTO

É um ensaio que procura mostrar o comportamento da rocha (agregado) quanto à sua fragmentação, quando submetida a esforços de compressão. Este tipo de solicitação é bastante comum em lastro ferroviário e pavimentação rodoviária, onde o fenômeno ocorre desde a fase de construção e continua por toda a vida útil. Assim como as demais propriedades mecânicas, a resistência ao esmagamento da rocha está intimamente ligada às suas características petrográficas.

Os ensaios de esmagamento foram realizados, um para cada amostra, segundo o método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT - ME - 53). Neste ensaio, foram utilizadas 3000 g de amostra que passam na peneira de #12,7 mm e ficam retidas na de #9,52 mm.

Com este material encheu-se um recipiente cilíndrico, de dimensões padronizadas, com três camadas sucessivas de mesma altura, aplicando-se, em cada camada, 25 golpes com o auxílio de uma haste de socamento. O excesso de material foi removido rasando-se a amostra no recipiente cilíndrico com a própria haste de socamento. Determinou-se a massa do agregado contido no recipiente cilíndrico (P_a).

Colocou-se esta quantidade de amostra (P_a) no cilindro da prensa e inseriu-se o êmbolo para compressão no cilindro. Este conjunto foi, em seguida, colocado no prato da prensa e cuidadosamente centrado. Aplicou-se então a carga de compressão estática de 40 toneladas. A velocidade de carregamento foi de 4 ton/min. Aplicada a carga total, o conjunto foi retirado da prensa, removendo-se todo o material contido no cilindro de ensaio. Após o ensaio, o material é passado na peneira de #2,38 mm.

A perda do agregado ao esmagamento é calculada pela relação porcentual entre a diferença entre as massas inicial e final e a massa inicial.

$$P = 100 \times \frac{P_i - P_f}{P_i} \quad (4.1)$$

onde:

P: perda do agregado ao esmagamento (%);

P_i: massa total da amostra seca, antes do ensaio (g);

P_f: massa do material retido na peneira de #2,38 mm, após o ensaio (g).

4.4.4. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE AGREGADOS PELO MÉTODO DOS 10% DE FINOS

Este ensaio consiste na determinação da carga necessária para que se produzam, em uma amostra de agregado gráudo submetido a esmagamento, 10% de finos, mantendo-se análogas a amostragem e aparelhagem utilizadas para o ensaio de esmagamento citado anteriormente.

Os ensaios foram executados segundo o método ME 096 - 94 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Realizou-se um ensaio para cada amostra.

4.5. ADESIVIDADE DE AGREGADO A LIGANTE BETUMINOSO

Na pavimentação, o material betuminoso age como um aglutinante para os agregados, que recebem e transmitem às camadas inferiores os esforços oriundos do tráfego. O material betuminoso deve envolver completamente o agregado, formando uma massa coesa que resista às solicitações provenientes do tráfego, às intempéries e dê

flexibilidade ao pavimento. Para que não ocorra desagregação prematura do pavimento, deve sempre haver uma perfeita adesividade entre o agregado e o ligante betuminoso. A adesividade de agregado a ligante betuminoso depende dos tipos, das características das rochas e dos materiais betuminosos empregados.

Segundo PICCOLO & ADISSY (1970), algumas características dos agregados podem influir na adesividade, a saber:

- a) Textura: A área de contato agregado-ligante betuminoso depende do tamanho e da disposição dos minerais que constituem as rochas. Quanto mais irregular for a superfície do agregado maior será a área de contato, favorecendo a adesividade;
- b) Porosidade: A absorção física em relação ao ligante betuminoso, devida a forças capilares ocasionadas pela presença de poros, beneficia a adesividade;
- c) Minerais: A adsorção química, devida à estrutura cristalina e à composição química dos minerais, influi na adesividade;
- d) Limpeza: os agregados devem estar isentos de substâncias nocivas tais como matéria orgânica, argila, pó de pedra etc. A presença de finos ou água, na superfície ou nos poros, dificulta a aderência entre os materiais, prejudicando a adesividade.

Os ensaios de adesividade a ligante betuminoso utilizados no Brasil são os do “Road Research Laboratory” modificado e o de “Riedel-Weber”, adaptados pelo DNER e DER-SP, respectivamente. Estes métodos de ensaio, segundo DEGANI et alii (1979), foram baseados nas normas norte-americanas, onde os estudos de desenvolvimento de rodovias envolvem a fixação de parâmetros empíricos, válidos para as condições climáticas representativas daquele país. O clima temperado, predominante na maior parte da América do Norte, apresenta características climáticas rígidas como temperaturas baixas e congelamento. No Brasil, de clima tropical, as circunstâncias são severas, mas inversas, ou seja, temperaturas altas. Sendo assim, há uma

discrepância entre as condições em que foram desenvolvidos os métodos de ensaio e as existentes onde são aplicados.

Os métodos de ensaio de adesividade utilizados nesta pesquisa são descritos a seguir.

4.5.1. ADESIVIDADE DE AGREGADO GRAÚDO A LIGANTE BETUMINOSO

Realizou-se um ensaio de adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso para cada amostra, segundo o método ME 78 -63 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

4.5.2. ADESIVIDADE DE AGREGADO MIÚDO A LIGANTE BETUMINOSO

Foram realizados um ensaio de adesividade de agregado miúdo para cada amostra segundo o método M 149 -61 do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo.

Este ensaio consiste da avaliação do deslocamento da película de asfalto quando a mistura agregado-ligante é submetida à ação de água destilada em ebulição e à ação das soluções de carbonato de sódio (Na_2CO_3) com diferentes concentrações, também em ebulição.

4.6. ENSAIOS DE ALTERAÇÃO

O objetivo dos ensaios de alteração é simular em laboratório a ação de agentes de alterações naturais através de solicitações físicas e físico-químicas. De um modo geral, estes ensaios procuram exagerar as condições ambientais e, através de agentes simuladores, solicitar eficientemente as propriedades que possam prever as alterações da rocha em estudo.

4.6.1. ENSAIO DE ALTERAÇÃO POR LIXIVIAÇÃO CONTÍNUA COM EXTRATOR “SOXHLET” CONJUGADO COM DESGASTE DE AGREGADO POR ABRASÃO “LOS ANGELES”

A alteração experimental de rochas em laboratório, manipulando extratores tipo “Soxhlet”, foi descrita no trabalho de GEORGES PÉDRO (1964) segundo FARJALLAT (1971). Este autor preocupou-se com os aspectos mineralógicos e geoquímicos, isto é, com o comportamento dinâmico dos elementos químicos e neoformações de minerais. MELFI, segundo FARJALLAT (1972), introduziu o uso desta técnica para estudo geoquímico da evolução de rochas.

FARJALLAT (1971) implantou este ensaio no laboratório de alteração experimental de rochas montado no IPT, em São Paulo, estudando a mineralogia, geoquímica e os aspectos mecânicos do processo de alteração experimental, de maior interesse para a Engenharia Civil.

Segundo FRAZÃO & AUGUSTO (1994), este ensaio solicita as rochas por remoção iônica (a diminuição de elementos alcalinos e alcalino-terrosos indica que a rocha encontra-se em processo de alteração), além de promover a hidratação de minerais secundários através da saturação em água aquecida. A alteração acelerada no extrator

“Soxhlet” provoca uma lixiviação contínua, pelo fato da água percolar pela amostra a uma temperatura de 60 a 70° C, possibilitando o arrastamento em solução de certos produtos de alteração. O ambiente climático no interior do extrator assemelha-se a um clima tropical úmido de alta temperatura e alta pluviosidade, simulando condições climáticas de vastas regiões brasileiras.

Para avaliação da alterabilidade dos agregados, utilizou-se o processo de lixiviação contínua com extrator “Soxhlet”.

O extrator utilizado foi de grandes dimensões (8 kg de amostra), conforme apresentado na Figura 4.1. Foram realizados dez e quarenta ciclos de lixiviação para cada amostra, sendo que cada ciclo de enchimento - esvaziamento demorou aproximadamente cinco horas.

O extrator “Soxhlet”, conforme ilustra a Figura 4.2, consiste essencialmente de um balão, um tubo extrator, uma unidade de condensação e um sifão. A água evaporada no balão é condensada graças a uma unidade de aquecimento controlável e se precipita sobre a amostra, infiltrando-se nos fragmentos. Quando a água atinge o nível do sifão, é sifonada de volta para o balão, iniciando um novo ciclo.

Neste equipamento, pode-se distinguir três regiões:

- a) Zona Atmosférica: velocidade de percolação da água muito grande;
- b) Zona de Flutuação do Nível Freático: amostras alternadamente imersas e emersas;
- c) Zona de Saturação Permanente: amostras permanentemente imersas.

O extrator “Soxhlet” tenta simular no laboratório as condições naturais de alteração, mas em velocidade muito maior, graças a temperatura mais alta e velocidade de percolação de água também muito maior que a encontrada na natureza.

Após o término do ensaio de lixiviação, optou-se por executar o ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, como parâmetro auxiliar para quantificar a eventual queda de resistência mecânica originada pelo ensaio de alteração.

Figura 4.1 - Equipamento utilizado no ensaio de alteração por lixiviação contínua com o extrator “Soxhlet”.

Figura 4.2 - Esquema do equipamento para o ensaio de alteração por lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” (Figura sem dimensões).

O ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” foi selecionado dentre os outros ensaios mecânicos pelos seguintes fatores:

- ensaio relativamente simples de executar e amplamente conhecido;
- o valor de desgaste a abrasão “Los Angeles” é muito utilizado em especificações para pré-avaliação da qualidade de agregados rochosos para pavimento e concreto;
- facilidade na preparação das amostras para o ensaio;
- a resistência a abrasão “Los Angeles” depende da tenacidade e do desgaste por abrasão das rochas, propriedades ligadas à alteração.

As amostras utilizadas no ensaio para avaliação da alterabilidade de rochas e posteriormente no ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, tiveram o seguinte procedimento:

Preparou-se dezesseis quilogramas de cada amostra, sendo divididas em oito quilogramas para o ensaio de lixiviação contínua de 10 ciclos e oito quilogramas para o de quarenta ciclos.

Estas amostras foram preparadas na graduação B, escolhida para a execução do ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”. Após os dez e quarenta ciclos, as amostras foram secas em estufa a 100°C, esfriadas à temperatura ambiente e peneiradas para a realização do ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.

Após o término dos números de ciclos programados (10 e 40) de lixiviação contínua para cada amostra, foram coletadas, no balão, as soluções aquosas destes ensaios, para obter-se informações sobre o estado de alteração da rocha, pois o processo intempérico provoca a remoção de íons (lixiviação), modificando a composição química original da água, como citado anteriormente.

A dosagem de cada elemento, para todas as amostras, foi determinada por espectrofotometria de absorção atômica, no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC. As influências das contaminações devidas aos recipientes utilizados foram determinadas pelo uso sistemático de “brancos”. As análises químicas foram realizadas para os seguintes constituintes: Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ e Na^+ .

Para estes elementos, PARKER (1970) definiu o índice de proporções de metais alcalinos e alcalino-terrosos (I) presentes na amostra:

$$I = \left(\frac{(\text{Na})_a}{(\text{Na}-\text{O})_b} + \frac{(\text{Mg})_a}{(\text{Mg}-\text{O})_b} + \frac{(\text{K})_a}{(\text{K}-\text{O})_b} + \frac{(\text{Ca})_a}{(\text{Ca}-\text{O})_b} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

onde:

$(X)_a$: proporção atômica do elemento “X”, definida como a porcentagem atômica dividida pelo peso atômico;

$(X-\text{O})_b$: força da ligação do elemento “X” com o oxigênio. Usando os valores de NICHOLL’S (1963), segundo PARKER (1970), obteve-se:

$$I = \left(\frac{(\text{Na})_a}{0,35} + \frac{(\text{Mg})_a}{0,90} + \frac{(\text{K})_a}{0,25} + \frac{(\text{Ca})_a}{0,70} \right) \times 100 \quad (4.3)$$

Segundo PARKER (1970), através deste índice pode-se medir o grau de alteração alcançado em relação à rocha original. Este índice é aplicável a rochas ígneas e é válido em todas as situações onde a hidrólise é a principal reação no processo de decomposição. Os valores deste índice diminuem com o aumento do grau de alteração, quando não ocorre um enriquecimento temporário dos elementos.

4.6.2. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE AGREGADOS PELO EMPREGO DE SOLUÇÕES DE SULFATO DE SÓDIO OU DE MAGNÉSIO

As alterações devidas à cristalização de sais são freqüentes em ambientes desérticos, mediterrâneos e tropicais. A resistência de rochas à desagregação por cristalização de sais, segundo YOSHIDA (1972), é mais relacionada à sua estrutura petrográfica que à sua composição química e é função de sua densidade.

Conforme YOSHIDA (1972), o que ocorre com a rocha é uma ação superficial marcante, seja por uma regularização das rugosidades superficiais, seja por descalçamento de minerais no caso de rochas granulares.

Isto é possível pois as tensões geradas por certos sais quando se cristalizam ou se hidratam nos vazios de uma rocha, devido ao estado de confinamento, tendem a fragmentar as partículas do agregado, degradando sua granulometria. Este ensaio tem como objetivo indicar as condições de intemperismo pela cristalização dos sais nos poros e microfissuras dos agregados, simulando a alterabilidade dos materiais quando sujeitos a agentes climáticos (em especial baixas temperaturas).

Foi realizado um ensaio por amostra, utilizando-se o método ME 89 - 64, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, com sulfato de sódio (Na_2SO_4) e cinco ciclos de alteração.

Pode-se determinar a resistência à desagregação dos agregados sujeitos à ação do tempo pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio (Na_2SO_4) ou de sulfato de magnésio (MgSO_4).

As soluções de sulfato de sódio foram preparadas dissolvendo-se aproximadamente 10 quilogramas de sal em 15 litros de água destilada, a uma temperatura entre 25° e 30°C, assegurando a saturação e a presença de excesso de cristais nas soluções após a

preparação. Durante a adição do sal, as soluções foram vigorosamente agitadas a intervalos freqüentes. Depois deste processo, as soluções foram resfriadas à temperatura de 21°C e mantidas nesta temperatura por 48 horas.

As amostras foram preparadas, colocadas em redes de arame e imersas num recipiente com a solução de sulfato de sódio por um período de 16 horas, de modo que o nível da solução ficasse 1 cm acima da amostra, a uma temperatura de 21°C para manter a concentração da solução constante. Após este período, a amostra foi retirada da solução, drenada durante 15 minutos e colocada em estufa a 100°C para secar. O processo de imersão e secagem alternadas constitui um ciclo e, como citado anteriormente, foram realizados cinco ciclos para cada amostra.

Após completar o ciclo final e depois do resfriamento, das amostras, foram lavadas em solução de cloreto de bário a 10%, para a retirada do excesso de sulfato de sódio.

O valor de durabilidade resulta da porcentagem da amostra que, após o ensaio, passa através da peneira na qual a fração inicial foi originariamente retida.

4.7. ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA

Foram executados dois ensaios de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha para cada amostra, segundo o método desenvolvido por FABBRI (1994), e determinou-se a média aritmética dos resultados dos ensaios.

4.7.1. APARELHAGEM E MATERIAIS

Para a execução do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, são necessários os seguintes materiais:

- peneira de malha quadrada de #0,074 mm;
- agitador magnético para soluções aquosas com possibilidade de regulação do número de rotações;
- cronômetro, com resolução de segundos;
- baguete cilíndrica de vidro, com aproximadamente 8 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento;
- bureta de vidro de 25 ml de capacidade e graduada de 0,1 em 0,1 ml;
- suporte para bureta;
- béquer de vidro com capacidade para 250 ml;
- provetas de vidro com capacidade 100 e 1000 ml;
- papel de filtro circular, com diâmetro entre 120 e 150 mm, para micro-cristais, com teor de cinzas inferior a 0,01%, do tipo Reagen R-42, Whatman 42 ou similar;
- solução aquosa padrão de azul de metileno, com concentração de 1,0 g de sal anidro por litro de solução;
- água destilada.

4.7.2. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra de pó de rocha a ser ensaiada foi obtida dos finos produzidos no ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” e passada na peneira de #0,074 mm, pois o ensaio é realizado nesta fração granulométrica. Após o peneiramento, determina-se o teor de umidade (w) desta fração.

4.7.3 EXECUÇÃO DO ENSAIO

A execução do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha segue os seguintes procedimentos:

- a) pesar 1,00 g da fração de pó da rocha passado na #0,074 mm e colocá-lo no bequer de 250 ml;
- b) adicionar 100 ml de água destilada ao bequer;
- c) colocar o bequer contendo a suspensão pó de rocha + água destilada no agitador magnético;
- d) através da bureta graduada, colocar no bequer 1,0 ml de solução padrão de azul de metileno e acionar o cronômetro, aguardando cerca de 1 minuto;
- e) introduzir a baguete de vidro na suspensão, sem desligar o agitador magnético, capturar uma gota de suspensão e pingá-la em uma folha de papel de filtro;
- f) observar a difusão da gota no papel de filtro. Deverá aparecer uma mancha circular, composta de um núcleo escuro que contém as partículas sólidas da suspensão (pó de rocha), circundada por uma borda de cor mais clara, correspondente à fase líquida da suspensão filtrada pelo papel de filtro (ver Figura 4.3.a);
 - se houver, após a difusão da água, o aparecimento de uma aura azulada ou esverdeada em torno da borda que circunda o núcleo escuro da mancha (ver Figura 4.3.b), esperar por mais 3 minutos e repetir os itens e) e f). Se a aura persistir, após passados os 3 minutos (ver Figura 4.3.c), significa que há excesso de corante na solução e o ponto de viragem foi atingido;
 - se não houver o aparecimento da aura, ou esta desaparecer após os 3 minutos de espera, repetir a operação a partir do item d), até que o teste da mancha persista por 3 minutos ou mais, conforme descrito acima;
- g) anotar a quantidade de solução padrão de azul de metileno (V) correspondente ao ponto de viragem do teste de mancha, expressa em ml.

4.7.4 RESULTADOS

Sabendo-se a quantidade de solução padrão de azul de metileno adicionada à suspensão (V) e o teor de umidade da fração do pó de rocha ensaiada (w), calcula-se o valor de azul, conforme segue-se:

$$V_a = V \times \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad (4.4)$$

onde:

V_a : valor de azul, em mg de azul de metileno por g de amostra;

V : quantidade de solução padrão de azul de metileno (ml), com concentração de 1,0 g por litro de solução;

w : teor de umidade da amostra (%).

Figura 4.3 - Fluxograma do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA

5.1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo são apresentados os resultados e as discussões dos ensaios analíticos, físico-mecânicos, de adesividade, de alteração e de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

Inicialmente analisam-se os resultados obtidos para cada ensaio individualmente, comparando-os com os valores recomendados pela literatura. Dessa forma, avalia-se a aplicabilidade e a validade dos índices fornecidos para a previsão do comportamento dos materiais quando em serviço.

Em seguida, relaciona-se os resultados dos ensaios de adsorção de azul de metileno com os resultados dos ensaios físico-mecânicos e de alteração. Posteriormente, faz-se o confronto entre os resultados dos ensaios físico-mecânicos e de alteração entre si. Pretende-se, com isto, verificar a existência de relações entre os resultados dos ensaios físico-mecânicos, de alteração e de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

5.2. DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS

5.2.1 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Nas análises de raios X foi detectada a presença de piroxênio e feldspato em todas as nove amostras; nas amostras 1, 2, 3, 4 e 5 a presença de quartzo, nas amostras 6, 8 e 10 a presença de magnetita e na amostra 4 a presença de esmectita, conforme apresentado no Anexo II.

As análises de difratometria de raios X indicaram a presença de argilo-minerais apenas na amostra 4. Este fato não significa que as demais amostras não contenham argilo-minerais pois, durante a interpretação dos difratogramas, leva-se em consideração somente os picos mais acentuados e é possível que se os argilo-minerais estiverem presentes em pequena quantidade, seus picos se apresentem pouco acentuados, não aparentando sua presença.

5.2.2. ANÁLISES PETROGRÁFICAS MACROSCÓPICAS

Todas as amostras analisadas macroscopicamente revelaram-se basaltos compactos com textura afanítica¹.

¹ Rocha de granulação muito fina cujos constituintes minerais não podem ser distinguidos a olho nu.

Os resultados da avaliação do estado de alteração e do grau de coerência das amostras obtidos através das análises petrográficas macroscópicas das amostras, são apresentados no Quadro 5.1.

Observando-se os resultados apresentados no Quadro 5.1 verifica-se que todas as amostras que apresentaram descoloração acentuada (amostras 2, 4 e 6) foram classificadas, segundo o IPT (1990), como medianamente alterada/medianamente coerente e muito alterada/incoerente.

Quadro 5.1 - Descrição das características macroscópica e avaliação preliminar do estado de alteração e do grau de coerência de rochas.

Análise Macroscópica		
Amostras - Local	Cor	IPT(1990)
1 - Santo Antonio (C*)	melanocrática (preta)	pouco alterada (A ₂) e coerente (C ₁)
2 - Santo Antonio (A*)	leucocrática (castanho-amarelada)	medianamente alterada (A ₃) e medianamente coerente (C ₂)
3 - Multipedras (C*)	melanocrática (preto-esverdeada)	pouco alterada (A ₂) e coerente (C ₁)
4 - Multipedras (A*)	leucocrática (castanho-amarelada)	muito alterada (A ₄) e incoerente (C ₄)
5 - Ouro Fino (C*)	melanocrática (preta)	medianamente alterada (A ₃) e medianamente coerente (C ₂)
6 - Ouro Fino (A*)	leucocrática (castanho-amarelada)	muito alterada (A ₄) e incoerente (C ₄)
7 - Bandeirantes (C*)	melanocrática (preto-acinzentada)	sã (A ₁) e coerente (C ₁)
8 - Bandeirantes (A*)	melanocrática (preta)	medianamente alterada (A ₃) e medianamente coerente (C ₂)
10 - Dois Córregos (A*)	melanocrática (preta)	medianamente alterada (A ₃) e coerente (C ₁)

C* = amostra de rocha comercializada; A* = amostra de rocha alterada.

5.2.3. ANÁLISES PETROGRÁFICAS MICROSCÓPICAS

De maneira geral, os basaltos da Formação Serra Geral apresentam minerais hidrotermais expansivos, que poderão segundo o estado microfissural da rocha sofrerem expansões por hidratação pelo acesso da água.

Durante a análise petrográfica microscópica das amostras observou-se a presença dos minerais que se encontram na constituição dos basaltos, como piroxênio e plagioclásio.

5.3. ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS E DENSIDADE REAL DE AGREGADO MIÚDO

No Quadro 5.2 estão apresentados os resultados de Densidade real de agregado miúdo (método do picnômetro) e dos ensaios físico-mecânicos, tais como: Desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, Determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton, Esmagamento e Avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos . Analisa-se, a seguir, os resultados obtidos em cada ensaio.

Quadro 5.2 - Resultados de densidade real de agregado miúdo (método do picnômetro) e dos ensaios físico-mecânicos.

Ensaio	Densidade Real de Agregado (g/cm ³)	Desgaste de Agregado por Abrasão "Los Angeles" (%)	Determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton (%)	Esmagamento (%)	Avaliação da Resistência Mecânica de Agregados pelo Método dos 10 % de Finos (kN)
Amostras - Local					
1 - Santo Antonio (C*)	2,901	14,84	10,86	19,5	257,85
2 - Santo Antonio (A*)	2,908	16,65	11,78	21,7	311,22
3 - Multipedras (C*)	2,911	16,17	12,38	22,95	207,95
4 - Multipedras (A*)	2,839	13,76	11,52	25,86	256,46
5 - Ouro Fino (C*)	2,865	13,64	11,88	18,0	265,09
6- Ouro Fino (A*)	2,879	17,65	15,70	20,44	235,54
7 - Bandeirantes (C*)	2,971	13,09	11,21	16,79	342,87
8- Bandeirantes (A*)	2,924	18,25	12,72	16,10	249,60
10 - Dois Córregos (A*)	2,913	21,34	15,08	19,65	211,01

C* = amostra de rocha comercializada; A* = amostra de rocha alterada.

5.3.1. DENSIDADE REAL DE AGREGADO MIÚDO - MÉTODO DO PICNÔMETRO

Os valores de densidade real de agregado graúdo variaram entre $2,839 \text{ g/cm}^3$ e $2,971 \text{ g/cm}^3$, como pode-se observar na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Valores da densidade real de agregado miúdo.

5.3.2. DESGASTE DE AGREGADO POR ABRASÃO “LOS ANGELES”

Os valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, determinados pela média de três ensaios para cada amostra, variaram de 13,1% a 21,2%. Observa-se que todas as amostras são utilizáveis para pavimentação, segundo este ensaio (valores $\leq 40\%$, DER-SP (1991)), conforme mostrado na Figura 5.2.

Entretanto, as amostras 2, 4, 6 e 8 são considerados materiais não aceitáveis. Isto indica que esse ensaio não deve ser utilizado sozinho na qualificação de agregados, pois é incapaz de identificar materiais com elevado grau de alteração e impróprios para utilização em pavimentação.

De acordo com os resultados, as amostras “comercializadas” apresentaram um desgaste por abrasão “Los Angeles” menor que as amostras “alteradas” para o mesmo local de origem, com exceção do par de amostras 3 e 4.

Figura 5.2 - Valores de Desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” e o valor máximo recomendado, segundo DER-SP (1991).

5.3.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TENACIDADE DE AGREGADOS PELO APARELHO TRETON

Os valores das perdas ao impacto Treton são apresentados na Figura 5.3. Analisando-se esta figura pode-se perceber que as amostras “comercializadas” (1, 5 e 7) apresentaram “perdas” menores que seus respectivos pares “alteradas” (2, 6 e 8).

Comparando os resultados com o valor máximo recomendado para a perda de resistência ao impacto Treton (perdas $\leq 20\%$, segundo FRAZÃO (1987)), verifica-se que todas as amostras seriam aceitáveis, indicando, também, que este ensaio não distingue materiais com maior ou menor grau de alteração.

Figura 5.3 - Valores do índice de tenacidade Treton e o valor máximo recomendado, segundo FRAZÃO (1987).

5.3.4. ENSAIO DE ESMAGAMENTO

Os valores das perdas de agregado ao esmagamento variaram de 16,1% a 25,9%, abaixo, portanto, do limite recomendado segundo MACEDO et alii (1988) (valores $\leq 30\%$), conforme mostrado na Figura 5.4.

Comparando-se os valores obtidos para os agregados “comercializados” com os dos “alterados” de mesmo local de origem, verifica-se que a resistência ao esmagamento dos “comercializados” é superior à dos “alterados”, com exceção das amostras 7 e 8, onde a amostra 7 (“comercializada”) apresenta um valor ligeiramente maior do que o seu par “alterado”.

Figura 5.4 - Valores das perdas do agregado ao esmagamento e o valor máximo recomendado, segundo MACEDO et alii (1988).

5.3.5. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE AGREGADOS PELO MÉTODO DOS 10% DE FINOS

Os valores de resistência mecânica de agregado pelo método dos 10% de Finos variaram de 207,95 kN a 342,87 kN, acima do mínimo exigido que, segundo MACEDO et alii (1988), deve ser 100 kN para agregados quando utilizados em concretos sujeitos a desgastes superficiais e 50 kN para outros concretos.

Observando-se a Figura 5.5, pode-se perceber que não há um comportamento homogêneo das amostras “comercializadas” em relação às “alteradas” para a resistência mecânica de agregado pelo método dos 10% de Finos. Nos pares (5 e 6) e (7 e 8) as “comercializadas” apresentaram resistência mecânica superior às alteradas, enquanto que, para os pares (1 e 2) e (3 e 4) ocorreu o inverso, contrariando o previsto.

Figura 5.5 - Valores de resistência mecânica de agregado pelo método dos 10% de Finos e o valor máximo recomendado, segundo MACEDO et alii (1988).

5.4. ENSAIOS DE ADESIVIDADE DE AGREGADO A LIGANTE BETUMINOSO

5.4.1. ENSAIO DE ADESIVIDADE DE AGREGADO GRAÚDO A LIGANTE BETUMINOSO

Na avaliação do ensaio de adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso, somente as amostras 3 e 7 apresentaram um comportamento satisfatório, conforme mostrado no Quadro 5.3. Durante a inspeção visual das amostras, segundo DNER ME 149-61, foi realizada uma estimativa do grau de descolamento da película betuminosa nas amostras e os resultados são apresentados também no Quadro 5.3.

Os resultados do ensaio de adesividade de agregado graúdo são apresentados no Anexo IV, por meio de fotos originais e coloridas do ensaio.

As amostras 3 e 7, como já foi dito, foram classificadas como satisfatórias pelo ensaio de adesividade de agregado graúdo, ou seja, não houve descolamento da película betuminosa.

As amostras restantes foram classificadas como insatisfatórias pelo ensaio de adesividade de agregado graúdo, onde foram observadas as presenças de bolhas de ar e de betume aderido às bordas dos béqueres, fatores que sugerem o descolamento da película betuminosa do agregado. Estes problemas podem ser observados, também, nas amostras 1 e 6, quando vistas pela parte superior (ver Anexo IV).

Nas fotografias apresentadas no Anexo IV pode-se observar também a aparência do par de amostras 7 e 8 (Figura IV.12), de um mesmo local de origem, submetidas ao ensaio de adesividade. Nesta fotografia percebe-se a diferença de aspecto quanto a adesividade da amostra “comercializada” para a “alterada”.

Quadro 5.3 - Resultados dos ensaios de adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso e estimativa do grau de descolamento da película betuminosa.

Amostras	Procedência	Denominação na coleta	Classificação	Grau de descolamento
7	Bandeirantes	Comercializada	satisfatória	menor descolamento ↓
3	Multipedras			
10	Dois Córregos	Alterada	não satisfatória	maior descolamento ↓
1	Santo Antonio	Comercializada		
8	Bandeirantes	Alterada		
4	Multipedras			
5	Ouro Fino	Comercializada		
2	Santo Antonio	Alterada		
6	Ouro Fino			

5.4.2. ENSAIO DE ADESIVIDADE DE AGREGADO MIÚDO A LIGANTE BETUMINOSO

As amostras “comercializadas” (1, 3 e 5) foram classificadas como aceitáveis e todas as amostras “alteradas” apresentaram má adesividade, ocorrendo o deslocamento da película betuminosa na solução de água destilada, como mostra o Quadro 5.4.

Comparando-se os resultados dos dois ensaios de adesividade de agregado a ligante betuminoso, observa-se que:

- a amostra 3 foi a única considerada satisfatória pelos dois métodos de adesividade de agregado;
- a amostra 7 apresentou um comportamento satisfatório pelo ensaio de adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso e não aceitável pelo ensaio de adesividade de agregado miúdo a ligante betuminoso.

Quadro 5.4 - Resultados do ensaio de adesividade de agregado miúdo a ligante betuminoso.

Amostras	Procedência	Denominação na coleta	Adesividade	Classificação
1	Santo Antonio	Comercializada	1-2	aceitável
2	Santo Antonio	Alterada	0	má
3	Multipedras	Comercializada	3-4	aceitável-bom
4	Multipedras	Alterada	0	má
5	Ouro Fino	Comercializada	2-3	aceitável
6	Ouro Fino	Alterada	0-1	má-aceitável
7	Bandeirantes	Comercializada	0-1	má-aceitável
8	Bandeirantes	Alterada	0	má
10	Dois Córregos	Alterada	0	má

As diferenças ocorridas nos resultados dos dois métodos de adesividade deve-se, possivelmente, ao fato de que no ensaio de adesividade de agregado graúdo os materiais são ensaiados com água destilada à temperatura de 40°C e no ensaio de adesividade de agregado miúdo, além da água destilada, os agregados ficam sujeitos

ao ataque de soluções de carbonato de sódio (Na_2CO_3) à temperatura de aproximada de 110°C . Logo, o segundo ensaio produz efeitos mais severos em relação ao primeiro ensaio.

Entretanto, este fato não explica o que aconteceu com as amostras 1 e 5, que foram aceitas pelo ensaio de adesividade de agregado miúdo e não aceitas pelo de adesividade de agregado graúdo.

5.5. ENSAIOS DE ALTERAÇÃO

5.5.1. ALTERAÇÃO POR LIXIVIAÇÃO CONTÍNUA COM EXTRATOR “SOXHLET” CONJUGADO COM DESGASTE DE AGREGADO POR ABRASÃO “LOS ANGELES”

A alteração por lixiviação foi “medida” através da evolução do desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.

No Quadro 5.5 estão apresentados os resultados dos ensaios de alteração por lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” para 10 e 40 ciclos conjugado com o ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.

Os resultados revelaram que os desgastes aumentaram para as amostras 4, 6 e 8 à medida que o número de ciclos cresceu (0, 10 e 40 ciclos), como mostra a Figura 5.6. Isto pode acontecer devido à expansão de argilo-minerais presentes na rocha quando em contato com a água. Desta forma, as pressões causam uma desestruturação da rocha e uma conseqüente diminuição da resistência mecânica. Já para as amostras 2 e

10 aconteceu o inverso, ou seja, os desgastes diminuíram com o aumento do número de ciclos.

Quadro 5.5 - Resultados dos ensaios de alteração por lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” para 10 e 40 ciclos conjugado com desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.

Amostras	Procedência	Denominação na coleta	Abrasão “Los Angeles” após lixiviação (10 ciclos) (%)	Abrasão “Los Angeles” após lixiviação (40 ciclos) (%)
1	Santo Antonio	Comercializada	15,54	14,64
2	Santo Antonio	Alterada	16,20	16,04
3	Multipedras	Comercializada	15,76	13,88
4	Multipedras	Alterada	24,86	28,86
5	Ouro Fino	Comercializada	16,44	15,60
6	Ouro Fino	Alterada	22,04	25,06
7	Bandeirantes	Comercializada	13,94	11,28
8	Bandeirantes	Alterada	20,26	24,92
10	Dois Córregos	Alterada	19,48	18,58

Analisando-se, ainda, a Figura 5.6 verifica-se que as amostras “comercializadas” (1, 5 e 7) apresentaram um aumento do desgaste por abrasão com o crescimento de 0 para 10 ciclos e posteriormente uma diminuição do desgaste de 10 para 40 ciclos. Já para a amostra 3, os desgastes diminuíram com o aumento do número de ciclos.

Figura 5.6 - Valores de desgaste de agregado por abrasão "Los Angeles" após o ensaio de alteração por lixiviação contínua para 0, 10 e 40 ciclos.

No Quadro 5.6 são apresentadas as análises químicas realizadas nas soluções resultantes do ensaio de lixiviação contínua dos agregados, para dosagens dos elementos Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} e Na^{+} .

Observa-se, analisando-se o Quadro 5.6, que na maioria das amostras houve um crescimento do número de íons alcalinos e alcalino-terrosos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} e Na^{+}) lixiviados, modificando a composição química da água original para os 10 e 40 ciclos. Estes resultados indicam, possivelmente, que as rochas não se encontram num processo de alteração para este número de ciclos.

Quadro 5.6 - Análise química da água utilizada no ensaio de lixiviação contínua com extrator “Soxhlet”.

Ciclos	Amostras	Cálcio (mg/l)	Magnésio (mg/l)	Sódio (mg/l)	Potássio (mg/l)
	Água destilada	0,07	0,04	N.D.*	N.D.*
10	1	0,14	0,16	8,50	2,00
	2	0,22	0,27	4,80	3,30
	3	0,11	0,09	5,60	3,80
	4	0,11	0,33	12,00	8,30
	5	0,18	0,29	6,40	4,50
	6	0,10	0,16	3,50	2,30
	7	0,59	0,23	7,40	5,30
	8	0,24	0,16	9,60	6,50
	10	1,24	0,26	9,30	6,30
40	1	0,39	0,07	24,00	6,50
	2	0,23	0,15	10,50	3,50
	3	0,22	0,18	21,00	4,50
	4	0,10	0,24	20,00	13,50
	5	0,14	0,15	20,50	11,80
	6	0,13	0,17	6,00	2,30
	7	1,51	0,06	12,50	10,00
	8	0,87	0,07	20,50	23,50
	10	1,12	0,11	20,50	8,00

*N.D.: não detectado

Através da dosagem dos elementos Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ e Na^+ , calculou-se o índice de proporções de metais alcalinos e alcalino-terrosos presentes em cada amostra, conforme apresentado no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 - Índice de proporções de metais alcalinos e alcalino-terrosos (I).

Ciclos	Amostras	I*	Ciclos	Amostras	I*
10	1	0,127	40	1	0,366
	2	0,087		2	0,167
	3	0,108		3	0,308
	4	0,236		4	0,388
	5	0,127		5	0,376
	6	0,068		6	0,989
	7	0,149		7	0,263
	8	0,187		8	0,498
	10	0,185		10	0,341

*I = Índice de Proporções de Metais Alcalinos e Alcalino-terrosos.

Os índices de proporções de metais alcalinos e alcalino-terrosos, apresentados no Quadro 5.7, progrediram com o aumento do número de ciclos, ou seja, para as condições que foram realizados os ensaios, o índice apenas indicou o enriquecimento temporário destes elementos.

Para melhor visualização, os índices de proporções de metais alcalinos e alcalino-terrosos estão apresentados, em forma de gráfico, na Figura 5.7. Observando-se esta figura nota-se que, para 10 ciclos, as amostras “comercializadas” (1 e 5) apresentaram índices maiores que seus respectivos pares “alterados” (2 e 6), enquanto que para os outros dois pares ((3 e 4) e (7 e 8)) o comportamento foi o inverso, ou seja, os índices das “comercializadas” foi inferior ao das “alteradas”.

Analisando-se esta mesma figura para 40 ciclos, percebe-se que a maioria das amostras “comercializadas” apresentaram índices menores que os dos seus respectivos

pares. Deve-se notar ainda que a amostra 5, que apresentava índice maior que seu par para 10 ciclos, passou a apresentá-lo menor para 40 ciclos, indicando, possivelmente, início do processo de intemperismo químico (simulado).

Figura 5.7 - Valores dos índices de proporções de metais alcalinos e alcalino-terrosos (I), para 10 e 40 ciclos.

5.5.2. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE AGREGADOS PELO EMPREGO DE SOLUÇÕES DE SULFATO DE SÓDIO

Os resultados do ensaio de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio são apresentados no Quadro 5.8 e na Figura 5.8.

Quadro 5.8 - Resultados do ensaio de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

Amostras	Procedência	Denominação na coleta	Avaliação da Durabilidade ao Sulfato de Sódio (%)
1	Santo Antonio	Comercializada	11,20
2	Santo Antonio	Alterada	13,00
3	Multipedras	Comercializada	17,20
4	Multipedras	Alterada	41,40
5	Ouro Fino	Comercializada	14,00
6	Ouro Fino	Alterada	27,90
7	Bandeirantes	Comercializada	11,10
8	Bandeirantes	Alterada	26,90
10	Dois Córregos	Alterada	9,40

Observa-se que cerca de 67% das amostras apresentaram perdas inferiores ao especificado pela norma (valores $\leq 20\%$, DER-SP(1991)), conforme mostrado na Figura 5.8. Destas, apenas duas, as amostras 2 e 10, são consideradas “alteradas”. As demais amostras “alteradas” apresentaram perdas superiores a 20% (entre 26,9% e 41,4%), indicando um maior grau de intemperismo sofrido.

Neste ensaio é interessante notar que a amostra 10 apresentou uma tendência para menores perdas em relação as outras amostras “alteradas” e também apresenta menores características visuais de alteração, conforme já comentado no Capítulo 3.

Figura 5.8 - Valores de Avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio e valor máximo recomendado, segundo DER-SP (1991).

5.6. ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA

Os resultados dos ensaios de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, expressos em termos dos valores de azul (V_a , Fórmula 4.4), são apresentados no Quadro 5.9 e na Figura 5.9. Observando-se estes resultados pode-se verificar que, para amostras de mesma origem, as “comercializadas” apresentaram consumo de corante ou superfície específica inferior às “alteradas”.

Este fato revela que o valor de azul dever estar indicando a presença de argilo-minerais nas amostras “alteradas”, ou a presença de microfissuramento mais

acentuado ou a diferença de distribuição granulométrica ou ainda o conjunto destes fatores.

Considerando que os ensaios de raios X não indicaram a presença significativa de argilo-minerais nas amostras e que a hipótese de haver microfissuramento nas frações utilizadas no ensaio de adsorção de azul de metileno é improvável, resolveu-se investigar possíveis diferenças granulométricas das frações utilizadas nos ensaios de adsorção.

Para tanto, foram executados ensaios de sedimentação nas frações das amostras utilizadas para a adsorção de azul de metileno e resultantes dos ensaios de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.

A partir das curvas de distribuição granulométrica, obtidas dos ensaios de sedimentação, e admitindo-se que as partículas são aproximadamente esféricas, calculou-se a “área” aproximada de cada uma das amostras (ver Anexo III).

De posse dos valores das “áreas” aproximadas das amostras construiu-se o gráfico apresentado na Figura 5.10. Nela as “área” aproximadas são lançadas contra os valores de azul para cada amostra.

Observando-se a Figura 5.10 pode-se notar que a amostra 10, que teve um consumo baixo de corante apresenta uma área, conforme calculado, também baixa, portanto de acordo com o esperado, uma vez que seu aspecto é de rocha de boa qualidade, a menos da presença de “vidro” em sua constituição.

Por outro lado pode-se observar também o seguinte comportamento: quanto maior a área da amostra (calculada) maior o valor de azul, ou seja, maior o consumo de corante. Nos casos onde as áreas calculadas são similares (amostras “comercializadas” e “alteradas”), as diferenças de consumo podem realmente estar associadas à presença de materiais deletérios.

Assim sendo, parece que o consumo de corante, ou seja, o valor de azul, para as amostras estudadas, está intimamente ligado à distribuição granulométrica e à presença de argilo-minerais. Para quase todos os pares de amostras (exceção (5 e 6)), as amostras “alteradas” submetidas ao ensaio de desgaste por abrasão “Los Angeles”, produziram uma maior quantidade de finos.

Analisando-se, ainda, a Figura 5.10, percebe-se que existe uma separação entre as amostras “comercializadas” e as “alteradas”, para um valor de azul (V_a) aproximado de 12,5 mg/g.

Quadro 5.9 - Resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

Amostras	Procedência	Denominação na coleta	V_a (mg/g)
1	Santo Antonio	Comercializada	9,43
2	Santo Antonio	Alterada	17,71
3	Multipedras	Comercializada	11,82
4	Multipedras	Alterada	20,39
5	Ouro Fino	Comercializada	11,01
6	Ouro Fino	Alterada	13,78
7	Bandeirantes	Comercializada	4,57
8	Bandeirantes	Alterada	12,92
10	Dois Córregos	Alterada	5,77

Figura 5.9 - Valores de azul de metileno (Va).

Figura 5.10 - Valor de azul (Va) versus "área" aproximada da "fração fina" da rocha.

5.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA *VERSUS* OUTROS ENSAIOS

Nos próximos itens os resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, expressos em termos dos valores de azul (V_a , Expressão 4.4), são confrontados com os resultados obtidos dos ensaios físico-mecânicos e de alteração.

Para se tentar estabelecer relações coerentes, primeiramente comparam-se resultados da adsorção de azul de metileno para amostras “comercializadas” com resultados de outros ensaios, também obtidos para amostras “comercializadas”, procedendo-se da mesma forma para as amostras “alteradas”. Assim, trabalha-se com “universos” mais homogêneos do ponto de vista da caracterização macroscópica.

Posteriormente, os resultados são comparados para o conjunto de amostras estudados (“comercializadas” e “alteradas”).

Foram efetuadas também análise de regressão linear para estas comparações realizadas entre os resultados das amostras e com a apresentação do valor do coeficiente de correlação (R^2), quando mostrou-se satisfatório ($R^2 > 0,5$).

5.7.1. VALOR DE AZUL (V_a) *VERSUS* RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS

Nas Figuras 5.11 a 5.14 são apresentados os valores de azul *versus* os valores dos ensaios físico-mecânicos.

A Figuras 5.11 mostra a relação entre ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e o de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.

Observando-se esta figura nota-se que as amostras “comercializadas” apresentam uma relação direta com um coeficiente de correlação de 0,50. Nota-se também que existe uma concordância, ainda para as amostras “comercializadas”, entre os resultados destes dois tipos de ensaios pois, para um aumento no valor de azul (V_a), há um decréscimo correspondente na resistência à abrasão, ou seja, a perda no ensaio de desgaste de agregado por abrasão aumenta.

Já para as amostras “alteradas”, a relação é inversa e o coeficiente de correlação é igual a 0,96. Neste caso, não se verifica o esperado, isto é, para um aumento do V_a não ocorre um aumento do desgaste à abrasão e sim uma diminuição da “perda”.

Figura 5.11 - Valores de azul *versus* valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”.

Observando-se ainda a Figura 5.11 pode-se verificar também que não há relação clara entre o valor de azul (V_a) e o desgaste a abrasão “Los Angeles” para o conjunto de amostras pois, como já foi dito, a relação obtida para as amostras “comercializadas” varia de forma contrária à obtida para as amostras “alteradas”, o que impede que haja uma relação coerente para o conjunto das amostras.

A Figura 5.12 apresenta a relação entre o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e o de determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton.

Figura 5.12 - Valores de azul *versus* valores do índice de tenacidade Treton.

Para amostras “comercializadas” a relação apresenta-se direta com um coeficiente de correlação sofrível, entretanto, mostra uma relação coerente, resultando num aumento do valor de azul (V_a) quando aumenta a perda no ensaio de impacto Treton. Já as

amostras “alteradas” possuem uma relação inversa com um coeficiente de correlação igual a 0,55.

Observando-se estes resultados pode-se averiguar que ocorre a mesma tendência que houve no caso dos ensaios de desgaste à abrasão, ou seja, para as amostras “comercializadas” os resultados concordam com o previsto (para aumento do V_a há aumento da perda), porém, para as amostras “alteradas” ocorre justamente o contrário. Este fato faz com que, considerando-se o conjunto das amostras (“comercializadas” e “alteradas”), a relação obtida seja muito pobre.

A Figura 5.13 mostra a relação entre o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e o ensaio de esmagamento.

Figura 5.13 - Valores de azul *versus* valores de perdas do agregado ao esmagamento.

Analisando-se a Figura 5.13, nota-se que as amostras “comercializadas” apresentam relação direta com um coeficiente de correlação igual a 0,53. Já as amostras

“alteradas” também apresentam relação direta e um coeficiente de correlação sofrível. Para o conjunto das amostras (“comercializadas” + “alteradas”) a relação também é direta, com um coeficiente de correlação sofrível.

Observa-se ainda, nesta figura, um comportamento semelhante para as amostras “comercializadas” e “alteradas”, pois à medida em que aumenta o valor de azul (V_a) a perda no ensaio de esmagamento também aumenta.

A Figura 5.14 apresenta a relação entre os ensaios de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e o de avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos.

Neste confronto, as amostras “comercializadas” apresentam uma relação inversa com um coeficiente de correlação igual a 0,72, observando-se que o valor de azul (V_a) decresce à medida que a carga necessária a produção de 10% de finos cresce. Este resultado era esperado, pois indica que quanto mais “sadia” a amostra, ou seja, com menor presença de microfissuramento e materiais deletérios, maior a carga necessária à produção dos 10% finos e menor a quantidade de corante adsorvido.

Por outro lado, tanto para as amostras “alteradas”, como para o conjunto de amostras, as relações apresentaram-se diretas e com coeficientes de correlação sofríveis

Estes resultados, mais uma vez, são semelhantes aos esperados, ou seja, para as amostras “comercializadas” concordam com o esperado e, para as “alteradas”, discordam.

Figura 5.14 - Valores de azul *versus* valores da carga para a produção de 10% de finos.

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 5.11 a 5.14, percebe-se que, para as amostras “comercializadas”, os resultados concordam com o que se poderia esperar, ou seja, para consumos maiores de corantes, têm-se resistência mecânica menor.

Por outro lado, para as amostras “alteradas”, os resultados de três dos quatro ensaios aqui testados indicam comportamento não previsível e contrário ao encontrado para as amostras “comercializadas”, ou seja, para consumos maiores de corante têm-se resistência mecânica maior também.

5.7.2. VALOR DE AZUL (VA) *VERSUS* RESULTADOS DO ENSAIO DE ALTERAÇÃO

A Figura 5.15 apresenta a relação entre o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e o ensaio de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

Analisando-se a Figura 5.15, nota-se que as amostras “comercializadas” apresentam uma relação direta com coeficiente de correlação igual a 0,57. Já as amostras “alteradas” apresentaram uma relação direta com coeficiente de correlação sofrível. Para todas as amostras a relação é direta e com um coeficiente de correlação igual a 0,53.

Figura 5.15 - Valores de azul *versus* valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

Nesta figura, observa-se a concordância entre os dois ensaios, porque apresentam tanto para as amostras “comercializadas” como “alteradas” um comportamento previsto, ou seja, o valor de azul (V_a) aumenta à medida que o valor de durabilidade ao sulfato de sódio aumenta.

5.8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS OUTROS ENSAIOS ENTRE SI

Para fim de análise, os resultados dos ensaios físico-mecânicos e do ensaio de alteração são confrontados entre si. Deseja-se com isto, somente verificar a existência de relações entre os resultados de ensaios distintos.

5.8.1. DESGASTE DE AGREGADO POR ABRASÃO “LOS ANGELES” *VERSUS* OUTROS ENSAIOS

A Figura 5.16 mostra a relação entre o ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” e o de determinação do índice de tenacidade de agregado pelo aparelho Treton.

Observando-se esta figura nota-se que as amostras “comercializadas” e “alteradas” apresentam uma relação direta, com coeficiente de correlação sofrível. Já para as nove amostras (“comercializadas” + “alteradas”) a relação também é direta, com um coeficiente de correlação de 0,70.

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 5.16 pode-se constatar que, o valor de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” aumenta juntamente com o valor do índice de tenacidade Treton, sendo que os dois métodos são físico-mecânicos

e “medem”, quantitativamente, o comportamento de uma amostra de rocha ao impacto.

Figura 5.16 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” *versus* valores do índice de tenacidade Treton.

A Figura 5.17 apresenta a relação entre o ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” e o de esmagamento.

Neste confronto, as amostras “comercializadas” apresentam uma relação direta, com um coeficiente de correlação igual a 0,98, observando-se um comportamento diferenciado para as amostras 1, 3, 5 e 7, pois ocorre um aumento do valor de desgaste a abrasão “Los Angeles” à medida que os valores de resistência do agregado ao esmagamento diminuem.

Já para as amostras “alteradas” a relação é inversa com coeficiente de correlação igual a 0,51. Para todas as amostras, a relação também é inversa e com um coeficiente de correlação sofrível.

Figura 5.17 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” *versus* valores do ensaio de esmagamento.

A Figura 5.18 mostra a relação entre o ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” e avaliação da resistência mecânica pelo métodos dos 10% de Finos.

Observando-se esta figura nota-se que para as amostras “comercializadas” a relação é inversa e com coeficiente de correlação igual a 0,91. Nota-se, novamente, um comportamento distinto para as amostras 1, 3, 5 e 7, pois ocorre uma tendência em diminuir o desgaste a abrasão “Los Angeles” com o aumento do valor da carga necessária para a produção de 10% de Finos. Os resultados são compatíveis, pois para um agregado que apresenta uma maior resistência mecânica é necessário uma carga de compressão mais elevada para a produção de finos.

Já para as amostras “alteradas”, como para o conjunto das amostras (“comercializadas” + “alteradas”), as relações se apresentaram inversas e com coeficientes de correlação sofríveis.

Figura 5.18 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” *versus* valores de avaliação da resistência mecânica de agregado pelo método dos 10% de Finos.

A Figura 5.19 apresenta a relação entre o ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” e avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

Para as amostras “comercializadas”, a relação é direta com coeficiente de correlação sofrível. Para as amostras 1, 3, 5 e 7, a tendência apresenta-se satisfatória, pois para um aumento do desgaste à abrasão “Los Angeles” (menor resistência mecânica) ocorre um aumento do valor de durabilidade (maior susceptibilidade ao processo de intemperismo físico).

Por outro lado, as amostras “alteradas” apresentaram uma relação inversa com coeficiente de correlação igual a 0,60. Neste caso, não se verifica o previsto, ou seja, para uma diminuição do desgaste a abrasão não ocorre uma diminuição do valor de durabilidade.

Observando-se ainda a Figura 5.19 pode-se notar também que não há relação clara entre o desgaste à abrasão e o valor de durabilidade para o conjunto das amostras pois, como já foi dito a relação obtida para as amostras “comercializadas”, variam de forma contrária à obtida para as amostras “alteradas”, o que torna difícil que tenha uma relação coerente para o conjunto das amostras.

Figura 5.19 - Valores de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” *versus* valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

5.8.2. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TENACIDADE DE AGREGADO PELO APARELHO TRETON *VERSUS* OUTROS ENSAIOS

A Figura 5.20 mostra a relação entre o ensaio de determinação do índice de tenacidade de agregado pelo aparelho Treton e de esmagamento.

Para as amostras “comercializadas” a relação é direta com coeficiente de correlação sofrível. Já as amostras “alteradas” a relação é inversa e também um coeficiente de correlação sofrível.

Figura 5.20 - Valores do índice de tenacidade Treton *versus* valores de perda do agregado ao esmagamento.

Observando-se estes resultados pode-se verificar que para as amostras “comercializadas” os resultados concordam com o previsto (para aumento da perda

ao esmagamento há aumento da perda por impacto Treton), porém, para as amostras “alteradas” ocorre justamente o contrário. Este fato faz com que, considerando-se o conjunto das amostras (“comercializadas” e “alteradas”), a relação obtida seja fraca.

A Figura 5.21 apresenta a relação entre o ensaio de determinação do índice de tenacidade de agregado pelo aparelho Treton e avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de Finos.

Para as amostras “comercializadas” e “alteradas” a relação é inversa e com coeficiente de correlação sofrível. No geral, para as nove amostras, a relação é inversa com coeficiente de correlação também sofrível.

Figura 5.21 - Valores do índice de tenacidade Treton *versus* valores de avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de Finos.

A Figura 5.22 mostra a relação entre o ensaio de determinação do índice de tenacidade de agregado pelo aparelho Treton e avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

Para as amostras “comercializadas” a relação é direta com coeficiente de correlação é igual a 0,93. Verifica-se que para as amostras 1, 3, 5 e 7 ocorre um aumento do valor do índice de tenacidade Treton com o aumento do valor de durabilidade. É interessante notar que são ensaios que avaliam propriedades diferentes da rocha tais como resistência ao impacto e resistência à desagregação por cristalização dos sais.

Para as amostras “alteradas” a relação é inversa com coeficiente de correlação sofrível. Já para o conjunto de amostras, a relação é direta e também com um coeficiente de correlação sofrível.

Figura 5.22 - Valores de índice de tenacidade Treton *versus* valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

5.8.3. ENSAIO DE ESMAGAMENTO *VERSUS* OUTROS ENSAIOS

Segundo MACEDO et alii (1988), existe uma boa correlação entre os ensaios de esmagamento e avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de Finos, principalmente nos agregados mais resistentes. Este fato ocorreu para as amostras “comercializadas” (1, 3, 5 e 7), conforme mostra a Figura 5.23, que apresenta uma relação inversa com um coeficiente de correlação de 0,96.

Já as amostras “alteradas” apresentaram uma relação direta com um coeficiente de correlação sofrível e para o conjunto das amostras obteve-se uma relação inversa com coeficiente de correlação também sofrível.

Figura 5.23 - Valores do ensaio de esmagamento *versus* valores de avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de Finos.

A Figura 5.24 apresenta a relação entre o ensaio de esmagamento e avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

Para as amostras “comercializadas” a relação é direta com coeficiente de correlação igual a 0,64 e para as amostras “alteradas” a relação é direta com coeficiente de correlação sofrível. Já para o conjunto de amostras, a relação é direta com coeficiente de correlação sofrível.

Figura 5.24 - Valores do ensaio de esmagamento *versus* valores de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

A Figura 5.25 mostra a relação entre o ensaio de avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos e do ensaio de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

Para as amostras “comercializadas” a relação é inversa com coeficiente de correlação igual a 0,74. Verifica-se que para um aumento do valor da carga necessária a produção de 10% de finos ocorre uma diminuição do valor de durabilidade, sendo uma relação satisfatória, mesmo os ensaios avaliando propriedades diferentes da rocha (agregado). Isto é possível porque dependendo do grau de alteração de uma rocha há a necessidade de um maior ou menor esforço de compressão para a produção de finos.

Por outro lado, tanto para as amostras “alteradas”, como para o conjunto de amostras, as relações se apresentaram inversas e com coeficientes de correlação sofríveis.

Figura 5.25 - Valores da avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos *versus* valores da avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio.

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 5.16 a 5.25, observa-se que os confrontos obtidos entre o ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” e os ensaios (determinação do índice de tenacidade de agregado pelo aparelho Treton, avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos), entre avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio e ensaio de esmagamento e entre determinação do índice de tenacidade de agregado pelo aparelho Treton e avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos apresentaram relações coerentes para as amostras “comercializadas” e para as amostras “alteradas”, os resultados estão de acordo com o previsto, ou seja, para aumento do desgaste à abrasão, têm-se resistência mecânica menor e também um aumento do valor de durabilidade.

Por outro lado, o confronto entre o ensaio de esmagamento e os ensaios (desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos e determinação do índice de tenacidade de agregado pelo aparelho Treton), entre avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio e os ensaios (desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, determinação do índice de tenacidade de agregado pelo aparelho Treton e avaliação da resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos) apresentaram tendências satisfatórias somente para as amostras consideradas “comercializadas”, ou seja, para as amostras “alteradas” os resultados indicam comportamento contrário ao encontrado pelas amostras “comercializadas”.

5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para melhor visualização do comportamento das amostras em relação a cada ensaio, apresenta-se no Quadro 5.10 os resultados hierarquizados dos ensaios analíticos, físico-mecânicos, adesividade, alteração e o de adsorção de azul de metileno pelo

método da mancha. Observando este quadro nota-se que as amostras apresentam trocas de posições entre elas para cada ensaio.

Analisando-se este mesmo quadro, percebe-se que dos resultados de oito dos doze ensaios aqui avaliados, a amostra 7 apresenta-se na primeira posição, portanto de acordo com o esperado, uma vez que seu aspecto é de rocha de boa qualidade.

Observando-se ainda o Quadro 5.10 pode-se verificar também o comportamento da amostra 10, que teve um resultado insatisfatório nos ensaios de adesividade, isto deve-se possivelmente a presença de “vidro” em sua constituição, o que pode dificultar a adesividade entre os materiais. Por outro lado, pode-se notar também que no ensaio de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio a amostra 10 apresentou-se em primeira posição.

A partir dos resultados apresentados no Quadro 5.10, formulou-se uma sequência de alteração decrescente, que permite discriminar o grau de alteração entre as amostras. Para determinação desta sequência foi observado o maior número de vezes em que cada amostra apresentou em relação aos doze ensaios avaliados e está apresentada a seguir:

amostra 7 > amostra 3 > amostra 1 > amostra 2 > amostra 5 > amostra 8 > amostra 6
> amostra 10 > amostra 4

Quadro 5.10 - Posições das amostras em relação a cada ensaio.

Ordem Crescente de Alteração	Abrasão “Los Angeles”	Abrasão “Los Angeles” após lixiviação (10 ciclos)	Abrasão “Los Angeles” após lixiviação (40 ciclos)	Índice de tenacidade Treton	Esmagam.	10 % de Finos	Durab. ao Sulfato de Sódio	Adsorção de Azul de Metileno pelo método da mancha	Ades. graúda	Ades. miúda	Análise Macro.
↓	7	7	7	1	8	7	10	7	7	3	7
	5	1	3	7	7	2	7	10	3	5	3
	4	3	1	4	5	5	1	1	10	1	1
	1	2	5	2	1	1	2	5	1	7	10
	3	5	2	5	10	4	5	3	8	6	2
	2	10	10	3	6	8	3	8	4	8	5
	6	8	8	8	2	6	8	6	5	10	8
	8	6	6	10	3	10	6	2	2	2	4
	10	4	4	6	4	3	4	4	6	4	6

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

6.1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas da avaliação do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha utilizados para a qualificação de agregados.

Deve-se ressaltar que as conclusões restringem-se ao universo de amostras efetivamente ensaiado. Para facilitar a apresentação, as conclusões foram agrupadas por tipo de ensaio e, quando possível, foram realizados comentários quanto aos resultados obtidos e aqueles que se espera obter.

6.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

6.2.1. QUANTO AO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA

- a) o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha é promissor para a identificação de materiais alterados, indicando a possibilidade da sua utilização na caracterização de agregados basálticos para pavimentação.
- b) há grande diferença no consumo de azul de metileno para as rochas “comercializadas” e “alteradas” de mesmo local de origem. As rochas “comercializadas” adsorvem, aproximadamente, metade da quantidade adsorvida

pelas rochas “alteradas”, conforme apresentado no Quadro 6.1. Para rochas de origens diferentes, as “comercializadas” também adsorvem menor quantidade de corante em relação às “alteradas”, com exceção da amostra 10, de Dois Córregos, que apresentou baixo consumo devido às razões explicitadas no capítulo anterior;

Quadro 6.1 - Relação entre o consumo de azul de metileno entre os pares de rochas de mesmo local de origem.

Amostras	Procedência	Denominação na coleta	Va (mg/g)	$\frac{Va_{\text{comercializada}}}{Va_{\text{alterada}}}$
1	Santo Antonio	Comercializada	9,43	0,53
2	Santo Antonio	Alterada	17,71	
3	Multipedras	Comercializada	11,82	0,58
4	Multipedras	Alterada	20,39	
5	Ouro Fino	Comercializada	11,01	0,80
6	Ouro Fino	Alterada	13,78	
7	Bandeirantes	Comercializada	4,57	0,35
8	Bandeirantes	Alterada	12,92	
10	Dois Córregos	Alterada	5,77	-

- c) pelo estudo, recomenda-se, como valor tentativo, a adoção de um valor de azul (Va) $\leq 12,5$ mg/g para indicador de rochas basálticas “comercializadas”, de acordo com a Figura 5.11 apresentada no Capítulo 5.

6.2.2. QUANTO AOS ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS

- a) os ensaios de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” mostraram-se incapazes de distinguir os materiais “alterados” dos “comercializados”. Os resultados concordam com pesquisa realizada por PARAGUASSU et alii (1987), que indicaram a necessidade de outras técnicas para qualificar agregados para pavimentação;
- b) considerando que o ensaio de desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” é largamente utilizado para pré-avaliação da qualidade de agregados, recomenda-se certos cuidados, pois nesta pesquisa todos os agregados (“comercializados” e “alterados”) Apresentaram resultados inferiores ao limite especificado em norma (valores $\leq 40\%$, DER-SP (1991)). A utilização na pavimentação de agregados aceitáveis segundo este ensaio, mas que na verdade não apresentam resistência mecânica satisfatória, podem causar a ruptura do pavimento e/ou sua degradação;
- c) o índice de tenacidade Treton não foi capaz de distinguir agregados “comercializados” dos “alterados” e, para todas as amostras, apresentou-se sempre menor que o exigido em norma (valores $\leq 20\%$, FRAZÃO (1987)), devendo, à semelhança do desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” ser utilizado com cautela;
- d) os ensaios de esmagamento e avaliação da resistência mecânica de agregado pelo método dos 10% de finos são similares quanto a execução do ensaio e aos resultados. Ambos não conseguem diferenciar os materiais “alterados” dos “comercializados”.

6.2.3. QUANTO AOS ENSAIOS DE ADESIVIDADE

- a) os resultados dos ensaios de adesividade a ligante betuminoso (graúda e miúda), apresentaram-se insatisfatórios para todas as amostras “alteradas”;
- b) o ensaio de adesividade de agregado miúdo a ligante betuminoso reflete exatamente com as denominações dos agregados das pedreiras, ou seja, exibindo resultados não-aceitáveis para as amostras “alteradas” e aceitáveis para as “comercializadas”.

6.2.4. QUANTO AOS ENSAIOS DE ALTERAÇÃO

- a) o ensaio de alteração por lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” conjugado com desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles” revelou uma tendência de aumento dos desgastes para as amostras “alteradas” à medida que o número de ciclos cresceu (0, 10 e 40 ciclos);
- b) no ensaio de alteração por lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” conjugado com desgaste de agregado por Abrasão “Los Angeles” verificou-se uma tendência, para as amostras “comercializadas”, de aumento do desgaste por abrasão com o crescimento de 0 para 10 ciclos e posteriormente uma diminuição do desgaste de 10 para 40 ciclos;
- c) o índice de proporção de metais alcalinos e alcalino-terrosos (I) para uma diferença de 30 ciclos para cada amostra somente revelou um enriquecimento temporário dos elementos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} e Na^{+}), ou seja, para os números de ciclos utilizados não foi possível simular alterações nas amostras estudadas;
- d) o ensaio de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4) mostrou-se eficaz para diferenciar materiais “alterados”

dos “comercializados”. Isto foi verificado pois as amostras “alteradas”, com exceção da número 10, apresentaram valores de durabilidade acima do valor máximo recomendado pela norma (valores $\leq 20\%$, DER-SP(1991)) e as amostras “comercializadas”, valores abaixo.

6.2.5. OUTRAS CONCLUSÕES

a) do confronto realizado entre o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e os ensaios físico-mecânicos percebe-se que, para as amostras “comercializadas”, os resultados concordam com o esperado, ou seja, para consumos maiores de corante, têm-se resistências mecânicas menores.

Por outro lado, para as amostras “alteradas”, os resultados da maioria dos ensaios aqui testados indicam comportamento não previsível e contrário ao encontrado para as amostras “comercializadas”, ou seja, para consumos maiores de corante têm-se resistência mecânica também maior;

b) observou-se a concordância entre os resultados de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha e de alteração. Tanto para as amostras “comercializadas” como para as “alteradas”, para valores de azul (V_a) maiores têm-se também valores maiores de durabilidade, de acordo com o que se poderia esperar;

c) o confronto realizado entre os outros ensaios (físico-mecânicos e alteração) apresentou relação coerente para as amostras “comercializadas”. Os resultados estão de acordo com o previsto, ou seja, por exemplo, para um aumento do desgaste à abrasão, têm-se resistência mecânica menor e também um aumento do valor de durabilidade. No caso das amostras “alteradas”, os resultados deste confronto nem sempre foram os esperados, obtendo-se, às vezes, comportamento contrários ao das “comercializadas”;

d) de um modo geral, as rochas de alta resistência mecânica inicial são pouco afetadas

pelos processos de alteração, fato este comprovado pelos ensaios de avaliação da durabilidade de agregados pelo emprego de soluções de sulfato de sódio e alteração por lixiviação contínua com extrator “Soxhlet” conjugado com desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”;

- e) reconhece-se, por meio das análises individuais de cada ensaio, que existem falhas em alguns dos ensaios usualmente empregados em pavimentação, principalmente quanto à diferenciação entre rochas de comportamentos distintos (“comercializadas” e “alteradas”) e quanto aos valores máximos recomendados pelas normas, que muitas vezes não são adequados, como foi mostrado nesta pesquisa.

6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa constatou-se que alguns ensaios usualmente utilizados na qualificação de agregados para pavimentação não são capazes de distinguir materiais “comercializados” dos “alterados”. Além disto, em certos casos, os valores máximos recomendados nas especificações de materiais são também inadequados para o conjunto de amostras aqui estudadas.

Verificou-se também que o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha mostrou-se promissor para a caracterização de agregados basálticos, revelando diferenças de consumo de corante significativas para as amostras “comercializadas” e “alteradas”.

Recomenda-se, portanto, que sejam realizadas investigações futuras no sentido de avaliar o ensaio de adsorção de azul de metileno quando utilizado para outros tipos de rochas (granitos, gnaisses etc). Sugere-se, também, que os ensaios físico mecânicos (Desgaste de agregado por abrasão “Los Angeles”, Determinação do índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton, Esmagamento e Avaliação da

resistência mecânica de agregados pelo método dos 10% de finos) sejam reestudados, ampliando-se o universo de amostras, a fim de se determinar suas adequações e de se estabelecerem limites de aceitação realísticos em função da utilização e dos tipos de agregados analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRINDLEY, G. W.; BROWN, G. (1980) - *Crystal Structures of Clays Minerals and their X-Ray Identification*. Mineralogical Society Monograph nº 5 Chapter Five p. 348-357 Inglaterra.

CASANOVA, F.J. (1986) - *O Ensaio de Azul de Metileno na Caracterização de Solos Lateríticos*. Anais da XXI Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. Salvador, BA..

CHEN, T.J.; SANTOS, P. S.; FERREIRA, H. C.; CALIL, S.F.; ZANDONADI, A. R.; CAMPOS, L. V. (1974) - *Determinação da Capacidade de Troca de Cátions e da Área Específica de Algumas Argilas e Caulins Cerâmicos Brasileiros pelo Azul de Metileno e sua Correlação com Algumas Propriedades Tecnológicas*. Cerâmica. Vol XX, Nº 79. São Paulo, SP.

DEGANI, A.; GONCALVES, A. C.; ROSSETTI, J. B. (1979) - *Estudo sobre os Ensaio de Adesividade*. Departamento de Transportes - STT - USP - São Carlos.

DENNIS, A.; TOURENQ, C.; LAN, T. N. (1980) - *Capacite d'Adsorption d'Eau des Sols et des Roches*. Bulletin de l' Association Internationale de Géologie de l' Ingenieur. Nº 22. Krefeld. França..

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1974) - *Métodos de Ensaio*. São Paulo.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991) - *Manual de Normas de Pavimentação*. São Paulo.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1968) - *Manual de Ensaio*. Rio de Janeiro.

FABBRI, G. T. P.; SÓRIA, M. H. A. (1991) - *Aplicação do Ensaio de Azul de Metileno à Classificação de Solos - Uma Primeira Aproximação*. Anais da XXV Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. São Paulo, SP.

FABBRI, G. T. P. (1994) - *Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais Através da Adsorção de Azul de Metileno*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos, SP.

FARJALLAT, J. E. S. (1971) - *Crêterios de Avaliação de Alterabilidade de Rochas*. VII Simpósio de Pesquisas Rodoviárias, IPR. Rio de Janeiro, RJ.

FARJALLAT, J. E. S. (1972) - *Desagregabilidade de Rochas e Problemas relativos à sua Aplicabilidade*. IV Semana Paulista de Geologia Aplicada, APGA. São Paulo, SP.

FARUQI, F. A.; SUSUMU, O.; WILLIANSO, W. O. (1967) - *Chemisorption of Methylene Blue by Kaolinite*. Clay Minerals. Vol. 19, Nº 7.

FERNANDES, J. L. J. (1989) - *Efeito da Defloculação no Ensaio de Granulometria de alguns Solos utilizados em Obras Viárias no Estado de São Paulo*. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos, SP.

FRAZÃO, E. B. (1987) - *A Importância das Características Tecnológicas da Pedra para Lastro Ferroviário*. Revista Solos e Rochas. Nº 3, Vol. 10.

FRAZÃO, E. B.; AUGUSTO, F. J. (1994) - *Procedimentos para Avaliação da Alterabilidade de Rochas*. Anais da XXVIII Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. Belo Horizonte, MG.

- GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A. B.; RODRIGUES, J. E.; MARINO, L.; MATTIELLO, F. (1983) - *Ensaio de Laboratórios em Geologia*. Publicação 046/91 - USP.p.69 São Carlos, SP.
- HANG, P.T.; BRINDLEY, G. W. (1970) - *Methylene Blue Adsorption by Clay Minerals - determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities (Clay-Organic Studies XVIII)*. *Clays and Clay Minerals*. Vol.18 Inglaterra.
- HIGGS, N. B. (1988) - *Methylene Blue Adsorption as a Rapid and Economical Method of Detecting Smectite*. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM. Nº 1, Vol.11 USA.
- HUET, M. (1989) - *Incidence de la Variation de la Valeur de Bleu sur Certaines Caractéristiques des Fines et des Enrobés*. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. Nº 161. França.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1980) - *Características Tecnológicas das Rochas Utilizadas como Material Natural de Construção Civil no Estado de São Paulo*. Relatório Nº 14.710.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1981) - *Mapa Geológico do Estado de São Paulo - escala 1:500.000*. Série Monografias (6), Vol. I.
- JONES, F. O. (1964) - *New Fast, Accurate Test Measures Bentonite in Drilling Mud*. *Oil Gas Journal*. Vol. 62, p. 76-78.
- KIPLING, J. J.; WILSON, R. B. (1960) - *Adsorption of Methylene Blue in the Determination of Surface Areas*. *Journal of Applied Chemistry*. Nº 10.

LAN, T. N. (1977) - *Un Nouvel Essai d' Identification des Sols - L' Essai au Bleu de Methylene*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 88. França.

LAN, T. N. (1980) - *L'Essai au Bleu de Méthylène - Un Progrès dans la Mesure et le Contrôle de la Propreté des Granulats*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 107. França.

LAN, T. N. (1981) - *Utilisation de l'Essai au Bleu de Methylene en Terrassement Routier*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 111. França.

LAUTRIN, D. (1987) - *Une Procédure Rapide d' Identification des Argiles*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 152. França.

MACEDO, P. H. S.; CORREA, W. G.; ABREU, J. A. A. K. P. (1988) - *Caracterização Tecnológica dos Agregados destinados a Pavimentação com Concreto de Cimento Portland*. Anais da XXIII Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. Florianópolis, SC.

MITCHELL, G.; POOLE, P.; SEGROVE, H. D. (1955) - *Adsorption of Methylene Bleu by High-Silica Sands*. Nature. N° 26. França.

NEVINS, M. J.; WEINTRITT, D.J. (1967) - *Determination of Cation Exchange Capacity by Methylene Bleu Adsorption*. Ceramic Bulletin. N° 6, Vol. 46.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1981) - *Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias*. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro, RJ.

- PARAGUASSU, A. B.; GANDOLFI, N.; FABBRI, G. T. P. (1987) - *Influência das Partículas Finas no Ensaio de Abrasão Los Angeles*. Anais do Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. ABGE. Vol. 2, p. 367-370 São Paulo, SP.
- PARKER, A. (1970) - *An Index of Weathering for Silicate Rocks*. Geological Magazine. Vol. 107, p. 501-504.
- PEJON, O. J. (1992) - *Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba - SP (escala 1:1000000): Estudo de Aspectos Metodológicos de Caracterização e de Apresentação de Atributos*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da USP.
- PHELPS, G. W.; HARRIS, D. L. (1968) - *Specific Surface and Dry Strength Methylene Bleu Adsorption*. Ceramic Bulletin. Nº 12, Vol. 47.
- PICCOLO, J. R.; ADISSY, M. A. (1970) - *Adesividade de Agregado a Ligante Betuminoso*. Anais do Congresso da Segunda Semana Paulista de Geologia Aplicada. APGA. Vol. 2, p. 587-599 São Paulo, SP.
- SCHNEIDER, A. M.; PIRES DA ROCHA, F. X. (1968) - *Emprego de Basaltos em Pavimentação Rodoviária*. IPR, Nº 433, p.43 Rio de Janeiro.
- SHREVE, R. N.; BRINK, J. A. (1980) - *Indústrias de Processos Químicos*. Guanabara Dois. Cap. 39, p. 638-675 Rio de Janeiro.
- TOURENQ, C.; LAN, T. N. (1989) - *Mise en Évidence des Argiles par l'Essai au Bleu de Methylene - Application aux Sols, Roches et Granulats*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Nº 159. França.

YOSHIDA, R. . (1972) - *Contribuição ao Conhecimento de Características Tecnológicas de Materiais*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, SP.

ANEXO I

FOTOS DOS LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS

Figura I.1 - Detalhe da amostra “comercializada” pertencente a Pedreira Santo Antonio.

Figura I.2 - Detalhe da amostra “alterada” pertencente a Pedreira Santo Antonio.

Figura I.3 - Detalhe da amostra “comercializada” pertencente a Pedreira Multipedras.

Figura I.4 - Detalhe da amostra “alterada” pertencente a Pedreira Multipedras.

Figura I.5 - Detalhe da amostra “comercializada” pertencente a Pedreira Ouro Fino.

Figura I.6 - Detalhe da amostra “alterada” pertencente a Pedreira Ouro Fino.

Figura I.7 - Detalhe da amostra “comercializada” pertencente a Pedreira Bandeirantes.

Figura I.8 - Detalhe da amostra “alterada” pertencente a Pedreira Bandeirantes.

Figura I.9 - Detalhe da amostra “alterada” pertencente a Pedreira Dois Córregos.

ANEXO II

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Fd: Feldspato

Pi: Piroxênio

Qz: Quartzo

Fd: Feldspato

Pi: Piroxênio

Qz: Quartzo

Fd: Feldspato

Pi: Piroxênio

Qz: Quartzo

Em: Esmectita
Qz: Quartzo

Fd: Feldspato

Pi: Piroxênio

Fd: Feldspato

Pi: Piroxênio

Qz: Quartzo

Fd: Feldspato

Mg: Magnetita

Pi: Piroxênio

Fd: Feldspato

Pi: Piroxênio

Fd: Feldspato
Qz: Quartzo

Mg: Magnetita

Pi: Piroxênio

Fd: Feldspato

Mg: Magnetita

Pi: Piroxênio

ANEXO III

MÉTODO DE CÁLCULO DA “ÁREA” APROXIMADA DAS AMOSTRAS E OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO

III - Método de Cálculo da “Área” aproximada das amostras

A “área” aproximada de cada uma das amostra foi calculada a partir das curvas de distribuição granulométrica de ϕ_1 (0,002 mm) a ϕ_{10} (0,074 mm), obtidas do ensaio de granulometria conjunta, de acordo com o procedimento descrito a seguir.

Divide-se o intervalo arbitrário (ϕ_1 a ϕ_{10}) em 10 subintervalos como mostra a Figura III.1, onde têm-se, a título de exemplo, o seguinte:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_5 + \phi_6}{2} \quad (1)$$

$$\Delta P = P_5 - P_6 \quad (2)$$

Admitindo-se que as partículas são esféricas, define-se a sua área , como:

$$A_{\text{partícula}} = \frac{A}{V \times \rho} = \frac{3}{\Delta\phi \times \rho}$$

onde:

$A_{\text{partícula}}$: área da partícula (cm^2/g);

A : área da esfera (cm^2);

V : volume da esfera (cm^3);

$\Delta\phi$: diâmetros médio das partículas (cm);

ρ : peso específico (g/cm^3).

Então, define-se a “Área” aproximada total como sendo:

$$A_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{10} \Delta P \times A_{\text{partícula}}$$

Figura III.1 - Curva granulométrica utilizada e os seus respectivos pontos para o cálculo aproximado da “área”.

Este método de cálculo para a “área” não é preciso, pois nele são considerados apenas os diâmetros e as porcentagens efetivamente medidos no ensaio de granulometria. Assim sendo, neste processo não se consideram aquelas partículas cujos diâmetros são inferiores ao menor medido (0,002 mm) e que, na verdade, têm maior superfície específica.

Quadro III.1 - Análise granulométrica por Sedimentação e o valor de azul (Va) para o par de amostras 1 e 2 (Pedreira Santo Antonio).

ϕ (mm)	Porcentagem que passa (%)	
	Amostra 1 (comercializada)	Amostra 2 (alterada)
0,074	100,00	100,00
0,034	57,29	63,39
0,025	41,25	53,94
0,017	32,05	41,64
0,013	24,08	32,54
0,009	19,56	25,58
0,007	15,31	18,09
0,005	12,03	16,67
0,003	9,27	10,72
0,002	5,78	9,05
Va (mg/g)	9,43	17,71

Figura III.2 - Curva granulométrica das amostras 1 (comercializada) e 2 (alterada).

Quadro III.2 - Análise granulométrica por Sedimentação e o valor de azul (Va) para o par de amostras 3 e 4 (Pedreira Multipedras).

ϕ (mm)	Porcentagem que passa (%)	
	Amostra 3 (comercializada)	Amostra 4 (alterada)
0,074	100,00	100,00
0,034	65,59	75,73
0,025	55,20	62,32
0,018	43,50	48,91
0,013	34,41	38,19
0,010	24,02	28,00
0,007	16,74	22,64
0,005	11,85	17,59
0,003	8,03	10,96
0,002	3,87	6,67
Va (mg/g)	11,82	20,39

Figura III.3 - Curva granulométrica das amostras 3 (comercializada) e 4 (alterada).

Quadro III.3 - Análise granulométrica por Sedimentação e o valor de azul (Va) para o par de amostras 5 e 6 (Pedreira Ouro Fino).

ϕ (mm)	Porcentagem que passa (%)	
	Amostra 5 (comercializada)	Amostra 6 (alterada)
0,074	100,00	100,00
0,035	69,04	65,43
0,025	58,31	51,93
0,018	43,56	41,14
0,013	35,51	33,04
0,010	26,13	25,48
0,007	19,96	20,89
0,005	15,45	15,01
0,003	11,50	11,03
0,002	9,35	9,41
Va (mg/g)	11,01	13,78

Figura III.4 - Curva granulométrica das amostras 5 (comercializada) e 6 (alterada).

Quadro III.4 - Análise granulométrica por Sedimentação e o valor de azul (Va) para o par de amostras 7 e 8 (Pedreira Ouro Fino).

ϕ (mm)	Porcentagem que passa (%)	
	Amostra 7 (comercializada)	Amostra 8 (alterada)
0,074	100,00	100,00
0,034	57,53	69,46
0,024	44,78	59,00
0,017	32,54	44,62
0,013	24,38	34,94
0,009	16,73	27,62
0,007	12,14	21,08
0,005	7,47	15,51
0,003	3,80	11,21
0,002	3,00	6,99
Va (mg/g)	4,57	12,92

Figura III.5 - Curva granulométrica das amostras 7 (comercializada) e 8 (alterada).

Quadro III.5 - Análise granulométrica por Sedimentação e o valor de azul (Va) para o amostra 10 (Pedreira Dois Córregos).

ϕ (mm)	Porcentagem que passa (%)
	Amostra 10 (alterada)
0,074	100,00
0,034	67,46
0,025	51,42
0,018	36,72
0,013	27,90
0,010	19,35
0,007	12,67
0,005	10,85
0,003	5,58
0,002	1,31
Va (mg/g)	5,77

Figura III.6 - Curva granulométrica da amostra 10 (alterada).

ANEXO IV

FOTOS DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ADESIVIDADE DE AGREGADO GRAÚDO A LIGANTE BETUMINOSO

Figura IV.1 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 1 ("comercializada").

Figura IV.2 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 2 ("alterada").

Figura IV.3 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 3 ("comercializada").

Figura IV.4 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 4 ("alterada").

Figura IV.5 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 5 ("comercializada").

Figura IV.6 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 6 ("alterada").

Figura IV.7 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 7 ("comercializada").

Figura IV.8 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 8 ("alterada").

Figura IV.9 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 10 ("alterada").

Figura IV.10 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 1 ("comercializada"), vista pela parte superior.

Figura IV.11 - Aspectos do ensaio de adesividade de agregado graúdo para a amostra 6 ("alterada"), vista pela parte superior.

Figura IV.12 - Comparação entre a amostra 7 ("comercializada") e a amostra 8 ("alterada"), da mesma pedreira, no ensaio de adesividade de agregado graúdo.